

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y
Puertos**

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente



**Estimación y distribución de parámetros del suelo
para la modelación hidrológica**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

D. Marino M. Puricelli

Dirigida por:

D. Félix Francés García

Octubre de 2003

A mis viejos

Agradecimientos

Ante todo, debo agradecer a las autoridades y cuerpo de profesores del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica del Valencia, por brindarme la oportunidad de poder continuar mi formación profesional en este área de conocimiento.

Debo agradecer también a mi director de tesis, Don Félix Francés García, por brindarme la oportunidad concreta de desarrollar mis estudios de doctorado.

Es absolutamente necesario agradecer a D. Carlos A. Puricelli, porque es gracias él que elaboré las bases de este trabajo. Debo destacar su paciente labor de corrección de textos, su permanente asesoramiento, sus opiniones críticas y sus numerosas aportaciones de experiencia técnica y científica.

Agradezco la colaboración con que he contado de mis compañeros Ilona Vašková, Eduardo Albentosa Hernández, Joan Palomares Escrihuela y Andrés Ochoa Jaramillo.

Debo agradecer a Eduardo Cassiraga, a Silvia Falco, a David Martínez y a Guillermo Collazos por todo lo que me han dado, y por todo lo que siguen entregando, a mi persona y a los que los rodean.

No puedo dejar pasar esta oportunidad para agradecer a todo el personal de maestría de esta Universidad. A ellos les debo innumerables favores. De ellos he recibido infinitas muestras de respeto y compañerismo para el que trabaja. Tampoco quiero olvidar al personal de vigilancia de esta casa, de la cual recuerdo y destaco su actitud de trabajo, profesionalidad y solidaridad, bienes escasos en estos tiempos.

Más allá de lo técnico y lo académico, allí estuvo siempre Luis Ángel Alonso.

No me olvido tampoco del personal de Urgencias, Radiología, Cuidados Intensivos y Tercera Planta del Hospital Clínico de Valencia, porque les debo la vida.

Gracias a todos aquellos que no menciono, pero que saben que los estoy nombrando.

Resumen

Las necesidades de la Hidrología, lejos de disminuir, se incrementan conforme pasa el tiempo. La dinámica del desarrollo humano, y sus necesidades son los argumento de más fuerza que dan razón a su existencia en la actualidad. Los constantes cambios en la superficie terrestre, como resultado de la actividad humana, así como la creciente necesidad de contar con medios hídricos para cubrir las demandas poblacionales, industriales, etc. son un ejemplos de ello.

Es necesario conocer el porqué de las particular distribución en el terreno de ciertos parámetros edafológicos, utilizados en la modelación hidrológica. La razones son tanto científicas como técnicas. Sin embargo no siempre es posible contar con todos los medios potencialmente necesarios. Es sólo a partir de la *convergencia de criterios y evidencias provenientes de fuentes diferentes e independientes entre sí* que es posible avanzar en el tema por la vía de la estimación y la modelación. Por otra parte, además de su precisión, es que los resultados obtenidos *agreguen conocimiento* a lo que ya se cuenta en ese caso concreto.

A partir del trabajo expuesto en la presente tesis se pueden extraer conclusiones en tres tema claramente definidos: *base conceptual del trabajo, base de valores de referencia y distribución espacial de parámetros hidrológicos para la modelación hidrológica.*

El primero es fundamental para el avance de esta tesis y la garantía de los resultados expuestos. El segundo punto expresa una visión del conocimiento científico aplicado concreto y en determinadas áreas de estudio. Finalmente, el tercer tema trata de los resultados esperables de obtener en la modelación hidrológica a partir de tener en cuenta o no la variabilidad espacial. Para ello es necesario analizar tanto los resultados obtenidos por el procedimiento propuesto en eta tesis, como los efectos que éstos producen en la simulación hidrológica.

Desde un primer momento se reconoció la necesidad de contar con un esquema que permita explicar y predecir el comportamiento hidrológico del terreno a partir las hipótesis científicas y de los modelos. Para formular unas y otros se totalmente necesario distinguir y organizar un conjunto de ideas que hagan del trabajo una labor organizada, objetiva y operativa.

En los capítulos 2 y 3 de esta tesis se expusieron, los conceptos de modelos, modelación y escala. Además se ordenaron y elaboraron de criterios de interpretación y

análisis del terreno. Los tuvieron como referencia a los suelos. En estos capítulos se destacó que el análisis hidrológico en sistemas naturales se basa en dos elementos clave: *la distinción entre información y datos*. Destacando que es a partir de la información cuando se pueden generar datos concretos. La información posee una estructura que le es propia. Además la misma se puede expresar de diferentes forma: *cualitativa, cuantitativa*, etc. A partir de este elementos la misma es definida y procesada. De la misma forma, se marcó claramente la necesidad de conocer el medio y definirlo correctamente. Para ello *se relacionaron lo conceptos genéticos tradicionales en el análisis del terreno y los de jerarquía y escala mediante diferentes vías de análisis*. Así por una parte se destacó la existencia en el terreno una o más *componentes sistemáticas*, con las cuales guiar análisis más detallados.

En el Capítulo 4 de esta tesis se exponen los resultados de un minucioso proceso de *revisión, ordenamiento y síntesis de valores de referencia para diferentes parámetros hidrológicos del suelo*. Se destaca al evidente posibilidad con la que se cuenta para integrar información externa global al análisis en concreto que se desarrolla.

A partir de los conceptos revisados y elaborados en esta Tesis, en el Capítulo 5 se expone la metodología propuesta para la estimación espacial de tres parámetros hidrológicos en particular: *capacidad de almacenamiento del suelo, conductividad hidráulica saturada del suelo y conductividad hidráulica saturada del substrato del suelo*.

Concretamente, la base del procedimiento propuesto en esta Tesis trata, en esencia, de analizar los gradientes más destacados en las variables principales a partir de su relación con los gradientes observados en las variables ambientales.

El procedimiento propuesto fue aplicado en *tres casos diferentes*, en localidades localizadas en España el sur de Francia. Los tres casos permiten analizar diferentes situaciones, en distintos tipos de terreno, donde la calidad y la cantidad de la información no es la misma.

Los resultados obtenidos reproducen la información original con precisión y permiten estimar la variabilidad espacial de las características y cualidades de los suelos. Resulta muy destacado que en todos los casos analizados el grado de explicación logrados por el ajuste supera el 80 por ciento de la variabilidad expuesta por los valores analizados.

En lo que respecta a la modelación distribuida de caudales, se pudo comprobar los *excelentes resultados obtenidos a partir de utilizar los valores estimados de las variables ambientales seleccionadas*. Los resultados indican que no sólo se logra obtener una alta precisión en la *calibración* sino que *validación espacial* permitió comprobar la bondad de los resultados. Ambos hechos permiten que la modelación hidrológica distribuida, a partir de la información estimada por le procedimiento propuesto, haya sido exitosa, en los casos analizados.

Se advierte con claridad que la *estimación espacial coherente* de las variables principales en un modelo distribuido genera resultados claramente mejores y reproducibles en eventos de validación.

Los resultados obtenidos permitieron comprobar la *validez de las hipótesis de trabajo* planteadas al inicio de esta Tesis.

Finalmente, existe en los resultados la evidencia clara *que la variabilidad espacial de los parámetros de modelación del suelo es fundamental en la modelación hidrológica.*

Abstract

The necessities of the Hydrology are increasing. The main reasons of existence of Hydrology as a science are the constant changes in the terrestrial surface, as a result of the human activities, as well as the growing demand of water resources to cover the human and industrial demands.

It is necessary to know the reason of the particular distribution of certain soil parameters in the landscape used in the hydrological modelling. The reasons are so much scientific as technical. However, not always it is possible to do so. An advance in the topic of the estimation and modelling is allowed starting from the convergence of approaches and evidences that comes from different and independent sources to each other. On the other hand, besides the precision the knowledge is required.

Conclusions exposed in the present thesis can be clearly defined within the three following topics: the conceptual base, the reference values and the space distribution of hydrological parameters used for the hydrological modelling.

The first one is fundamental for the advance of this Thesis and the guarantee of the exposed results. The second point deals with application of the scientific knowledge in certain study areas. Finally, the third topic is related to the expected results of the hydrological modelling in the when the space variability is taken into account or it is not. Thus, it is necessary to analyse the results obtained by the procedure proposed in this Thesis but also its effects in the hydrological simulation.

From a first moment it is recognized the necessity to get an outline that allows to explain and to predict the hydrological behaviour of the landscape in order to apply the scientific hypotheses and the models. All the ideas have to be organized in order to formulate the above mentioned hypotheses that lead to the operative work

Approaches of interpretation and analysis of the landscape were elaborated, exposed and finally ordered in Chapter 2 and 3 of this thesis. The soils were basic information for this kind of analysis. Of the above-mentioned, a general conclusion arises on which the procedure is elaborated exposed in this thesis. It was stressed in these chapters that the hydrological analysis in natural systems is based on two key elements: *the information and the data*. The information is characterized by

own structure. The same one it can be expressed in a different way: qualitative, quantitative, etc. Detailed knowledge of the terrain, is one of the most important requirements for the data analysis. In this way, the traditional genetic concepts of the terrain analysis have been related to the concepts of *hierarchy and scale* by means of different ways of analysis. Thus, the results show the existence of *trends* that allow advances of the analysis.

The soil is considered from different points of view. The results of the detailed revision process, classification and synthesis of reference values for different soil hydrological parameters are exposed in the Chapter 4 of this thesis. The integration of global external information to the analysis is developed.

In Chapter 5, a procedure for de spatial estimation of certain parameters is proposed. These parameters were: water holding capacity of soils, saturated hydraulic conductivity of soils and saturated hydraulic conductivity of the soil substratum.

The base of the procedure proposed in this Thesis consists of the trend analyses which are shown in the main variables and its relationship with the gradients observed in the environmental variables.

The proposed procedure was applied in three different cases, located in Spain and in the south part of France. Those three cases allow to analyze different situations, different land types, and also different information quality and quantity.

The obtained results reproduce the original information accurately and allow the estimation of the spatial variability of the soils. The adjustment overcomes 80 percent of the variability exposed by the analyzed values in the case of all the study areas.

The excellent results of the hydrological distributed modelling of flows using the above mentioned results were obtained. The results indicate that it is possible to obtain a high precision in the calibration but also in the space validation.

All the hypotheses proposed at first time of this Thesis were confirmed.

Finally, it is evident the existence of the space variability of the soil parameters which are fundamental in the hydrological flow simulation.

Resum

Les necessitats de la Hidrologia, lluny de disminuir, se incrementen a mesura que passa el temps. La dinàmica del desenrotllament humà, i les seues necessitats són els argument de més força que donen raó a la seua existència en l'actualitat. Els constants canvis en la superfície terrestre, com resultat de l'activitat humana, així com la creixent necessitat de comptar amb mitjos hídrics per a cobrir les demandes poblacionales, industrials, etc. són un exemple d'això.

És necessari conèixer el perquè de les particular distribució en el terreny de certs paràmetres edafològics, utilitzats en la modelació hidrològica. les raons són tant científiques com tècniques. No obstant no sempre és possible comptar amb tots els mitjos potencialment necessaris. És només a partir de la convergència de criteris i evidències provinents de fonts diferents i independents entre si permeten avançar en el tema per la via de l'estimació i la modelació. D'altra banda, a més de la seua precisió, és que els resultats obtinguts agreguen coneixement al que ja es compte en eixe cas concret.

A partir del treball exposat en la present tesi es poden extraure conclusions en tres temes clarament definits: base conceptual del treball, base de valors de referència i distribució espacial de paràmetres hidrològics per a la modelació hidrològica.

El primer és fonamental per a l'avanç d'esta tesi i la garantia dels resultats exposats. El segon punt expressa una visió del coneixement científic aplicat concret i en determinades àrees d'estudi. Finalment, el tercer tema tracta de els resultats esperables d'obtenir en la modelació hidrològica a partir de tindre en compte o no la variabilitat espacial. Per a això és necessari analitzar tant els resultats obtinguts per el procediment proposat en esta tesi, com els efectes que estos produïxen en la simulació hidrològica.

Des d'un primer moment es va reconèixer la necessitat de comptar amb un esquema que permeta explicar i predir el comportament hidrològic del terreny a partir les hipòtesis científiques i els models. Per a formular unes i altres se totalment necessari distingir i organitzar un conjunt d'idees que facen del treball una labor organitzada, objectiva i operativa.

D'una banda, es va destacar que l'anàlisi hidrològica en sistemes naturals es basa en dos elements clau: la distinció entre informació i dades, i la forma en què estos

dos són obtinguts a partir de la realitat observable. Destacant que és a partir de la informació quan es poden generar dades concretes. La informació posseïx una estructura que li és pròpia. A més la mateixa es pot expressar de diferents forma: qualitativa, quantitativa, etc.

En esta la Tesi s'ha insistit en diferents ocasions en la necessitat de conèixer el mig i definir-lo correctament. Per a això es van relacionar el conceptes genètics tradicionals en el anàlisi del terreny i els de jerarquia i escala per mitjà de diferents vies d'anàlisi. Així d'una banda es va destacar la existència en el paisatge una o més components sistemàtiques, amb les quals guiar anàlisi més detallada.

En el Capítol 4 d'esta tesi s'exposen els resultats d'un minuciós procés de revisió, ordenament i síntesi de valors de referència per a diferents paràmetres hidrològics del sòl. Es destaca a l'evident possibilitat amb què se compte per a integrar informació global a l'anàlisi en concret que es desenrotlla.

En el Capítol 3 d'esta tesi es van exposar, van ordenar i van elaborar de criteris d'interpretació i anàlisi del terreny. Els van tindre com a referència als sòls, en quant als característiques i qualitats físiques i la seua relació amb el passatge.

Concretament, la base del procediment proposat en esta tesi tràfic, en essència, d'anàlitzar els gradients més destacats en les variables principals a partir de la seua relació amb els gradients observats en les variables ambientals.

El procediment proposat va ser aplicat en tres casos diferents, en localitats localitzades a Espanya el sud de França. Els tres casos permeten analitzar diferents situacions, en distints tipus de terreny, done la qualitat i la quantitat de la informació no és la mateixa.

Els resultats obtinguts reproduïxen la informació original amb precisió i permeten estimar la variabilitat espacial de les qualitats y característiques dels sòls de forma tal que la seua estructura espacial coincidisca amb l'estructura general de la informació de la qual va procedir. Resulta molt destacat que en tots els casos analitzats el grau d'explicació aconseguits per l'ajust supera el 80 porcient de la variabilitat exposada pels valors analitzats.

Pel que fa a la modelación distribuïda de cabals, se va poder comprovar els excel·lents resultats obtinguts a partir de utilitzar els valors estimats de les variables ambientals seleccionades. Els resultats indiquen que no sols s'aconsegueix obtindre una alta precisió en la calibratge sinó que validació espacial va permetre comprovar la bondat dels resultats. Estos dos fets permeten que la modelación hidrològica distribuïda, a partir de la informació estimada per li procediment proposat, haja sigut reeixida, en els casos analitzats.

S'advertix amb claredat que l'estimació espacial coherent de les variables principals en un model distribuït genera resultats clarament millors i reproduïbles en esdeveniments de validació.

Finalment, es pot concloure que existix en els resultats l'evidència clara que la variabilitat espacial dels paràmetres de modelació del sòl és fonamental en la modelació hidrològica.

Índice general

1. Introducción y estructura de la Tesis	35
1.1. Las necesidades actuales en Hidrología	35
1.2. Objetivos	40
1.3. Hipótesis	42
1.4. Condicionantes en el desarrollo del trabajo	44
1.4.1. Las componentes del terreno	44
1.4.2. La información disponible	46
1.4.3. Los <i>valores de referencia</i> que caracterizan al comportamiento hidrológico del terreno	46
1.5. Trabajo de tesis desarrollado	48
1.6. Referencias	49
2. El medio natural y la modelación	51
2.1. Sistemas hidrológicos y variabilidad	51
2.1.1. El terreno analizado	51
2.1.2. Sistemas y jerarquía	52
2.1.3. Concepto de escala	52
2.1.4. Heterogeneidad y anisotropía	55
2.1.4.1. Heterogeneidad y escalas	56
2.1.4.2. Áreas y volúmenes representativos	59
2.1.4.3. Organización y jerarquía	61
2.1.5. Relación entre sistemas, jerarquía y escala	63
2.1.6. Concepto de interacción	64
2.2. Los modelos en Hidrología	65
2.2.1. Concepto de modelos y modelación	66
2.2.2. Tipos de modelos	66
2.2.2.1. Modelos determinísticos y estocásticos	66
2.2.2.2. Modelos de base física y modelos conceptuales	67
2.2.2.3. Modelos agregados y distribuidos	68
2.2.3. Parámetros de modelación	70
2.2.3.1. Calibración y validación	70
2.2.3.2. Parametrización y modelos	73
2.3. La modelación hidrológica y el medio a modelar	74

2.3.1.	El terreno visto como sistema	74
2.3.1.1.	Los sistemas en la morfología del terreno	74
2.3.1.2.	Los sistemas en los suelos	75
2.3.1.3.	Los sistemas y la cubierta vegetal	75
2.3.2.	Variabilidad espacial y problemas de modelación	76
2.3.2.1.	Teoría vs. práctica	76
2.3.2.2.	Casos generales vs. casos particulares	77
2.3.3.	Escalas de observación y de modelación. Problemas de escala	78
2.3.3.1.	Scaling, upscaling y downscaling	80
2.3.3.2.	Scaling y modelación	81
2.4.	Referencias	83
3.	Una base conceptual	89
3.1.	Información, datos y modelación	90
3.1.1.	Los parámetros de modelación, los datos y la información	90
3.1.2.	Diferencia entre dato e información	91
3.1.3.	Estructura de la información	91
3.1.4.	Representación de la información	92
3.2.	La definición del medio a analizar	93
3.2.1.	Principios básicos	94
3.2.1.1.	Génesis y evolución del paisaje	94
3.2.1.2.	Geoformas y procesos en el terreno	97
3.2.1.3.	Las unidades litológicas y litoestratigráficas	98
3.2.1.4.	El concepto de <i>facies</i>	98
3.2.1.5.	El concepto de <i>elemento arquitectónico</i>	100
3.2.2.	El suelo como el elemento clave	101
3.2.2.1.	La definición del suelo	101
3.2.2.2.	Definición puntual de la unidad de suelo	104
3.2.2.3.	Perfiles de suelos y unidades taxonómicas	105
3.2.2.4.	El pedón de suelo como unidad	106
3.2.2.5.	Distribución de las unidades de suelos en el paisaje	107
3.2.2.6.	El concepto dinámico del suelo	108
3.2.2.7.	Geoformas, facies, pedones y catenas: integración de conceptos	109
3.3.	Enfoques operativos de análisis	113
3.3.1.	Definiciones	114
3.3.2.	Complementariedad de los enfoques	115
3.3.3.	Magnitudes escalares y cartográficas del análisis	116
3.3.3.1.	Las dimensiones del análisis	117
3.4.	Secuencia de etapas	120
3.4.1.	El análisis fisiográfico	121
3.4.1.1.	La generación de unidades cartográficas	123
3.4.1.2.	Jerarquía y dinámica de las unidades cartográficas	124

3.4.1.3.	Diseño de unidades cartográficas en las Ciencias de la Tierra	124
3.4.1.4.	Precisión y fuentes de error en la delimitación de unidades cartográficas	126
3.4.1.5.	Heterogeneidad interna y externa a las unidades cartográficas	127
3.4.1.6.	Utilización e interpretación de las unidades cartográficas en la modelación hidrológica	128
3.4.1.7.	Ventajas e inconvenientes de las unidades cartográficas en la modelación hidrológica	131
3.4.2.	El suelo como criterio guía en los estudios hidrológicos . . .	131
3.4.2.1.	Cartografía de suelos	132
3.4.2.2.	Unidades cartográficas y perfiles modales	135
3.4.2.3.	Mapas de suelo y práctica hidrológica	135
3.4.3.	La estrategia de muestreo	137
3.4.3.1.	Toma de muestras y análisis de la información . . .	138
3.4.3.2.	Los enfoques tradicionales	139
3.4.3.3.	La interacción como clave para el muestreo	142
3.4.4.	El análisis paramétrico	145
3.4.4.1.	La asignación de valores	146
3.4.4.2.	El análisis paramétrico y las funciones de transferencia	146
3.4.4.3.	Funciones de pedotransferencia	148
3.4.4.4.	El análisis paramétrico y los valores de referencia .	150
3.4.4.5.	El análisis paramétrico y la información externa . .	151
3.4.4.6.	La estimación cuantitativa de la variabilidad espacial	152
3.4.4.7.	El análisis paramétrico y la interpolación	155
3.5.	La herramienta: el Sistema Geográfico de Información	157
3.5.1.	Definición	158
3.5.2.	Estructura de los datos y la información	159
3.5.2.1.	Capas	159
3.5.2.2.	Bases de datos y temas	160
3.5.2.3.	El formato de las capas	161
3.5.3.	Manipulación de capas ráster y vectoriales	162
3.5.4.	La utilización de Sistemas de Información Geográficas en la modelización hidrológica	163
3.6.	Referencias	164
4.	Valores de referencia	177
4.1.	La elaboración de valores de referencia	177
4.1.1.	Método de selección y análisis	178
4.1.2.	Ambiente de aplicación	180
4.2.	Conductividad hidráulica de suelos y rocas	182

4.2.1.	Definición	182
4.2.2.	Fuentes de variación	182
4.2.3.	Valores de referencia	187
4.2.3.1.	Rocas	187
4.2.3.2.	Sedimentos no consolidados	190
4.2.3.3.	Suelos	195
4.3.	Almacenamiento del agua en el suelo	196
4.3.1.	Definiciones	196
4.3.1.1.	Contenido de humedad en suelos	196
4.3.1.2.	Densidad aparente	197
4.3.1.3.	Potencial matricial y curvas características	197
4.3.1.4.	Capacidad de campo	198
4.3.1.5.	Punto de marchitez permanente	201
4.3.1.6.	Agua disponible	202
4.3.1.7.	Materia orgánica	203
4.3.2.	Fuentes de variación	204
4.3.3.	Agua disponible: Valores de referencia	205
4.3.4.	Densidad aparente: Valores de referencia	208
4.3.5.	Materia orgánica: valores de referencia	210
4.4.	Disponibilidad de información a nivel global	212
4.4.0.1.	Datos e información disponible	213
4.4.1.	Disponibilidad y aprovechamiento de datos e información en España	218
4.5.	Referencias	218
5.	Método de estimación distribuida	221
5.1.	Introducción	221
5.1.1.	Un ejemplo	222
5.1.2.	Tendencia y valores modales	225
5.2.	Modelo de variabilidad	227
5.3.	Estimación del modelo de variación espacial	230
5.3.1.	Estimación de los coeficientes del ajuste	232
5.3.2.	Evaluación de la calidad de los ajustes	232
5.3.3.	Aplicación de las relaciones funcionales	234
5.3.4.	Evaluación de la distribución espacial elaborada	235
5.4.	Selección de las variables principales y ambientales	235
5.4.1.	Generación de capas temáticas	236
5.4.2.	Asignación de los valores modales de las variables principales	238
5.4.3.	Parametrización de las variables ambientales	239
5.4.3.1.	Estructura del terreno	240
5.4.3.2.	Morfología del terreno	241
5.4.3.3.	Cubierta del suelo	242
5.5.	Referencias	243

6. Resultados	245
6.1. Introducción	245
6.2. Desarrollo del trabajo	245
6.3. Caso 1: Cuenca del Tajo	248
6.3.1. Descripción del área de trabajo	248
6.3.1.1. Tectónica y morfología regional	248
6.3.1.2. Litoestratigrafía regional	251
6.3.1.3. Suelos	254
6.3.1.4. Cubierta del suelo	260
6.3.2. Información utilizada	262
6.3.3. Variables empleadas	263
6.3.3.1. Variables principales	263
6.3.3.2. Variables ambientales	271
6.3.4. Resultados de la estimación de parámetros	274
6.3.5. Análisis de la precisión en las estimaciones	278
6.3.6. Calibración y validación del modelo TETIS en la cuenca del Tajo	289
6.3.6.1. Información de trabajo	289
6.3.6.2. Calibración y validación	289
6.4. Caso 2: País Vasco	296
6.4.1. Descripción del área de trabajo	296
6.4.1.1. Estructura regional	296
6.4.1.2. Dominios Hidrogeológicos	299
6.4.1.3. Litología y litoestratigrafía regional	304
6.4.1.4. Suelos	306
6.4.1.5. Cubierta del suelo	312
6.4.2. Información utilizada	314
6.4.2.1. Segmentación y origen de la información	314
6.4.2.2. Formato y escala de la información utilizada	315
6.4.2.3. Grado de integración	316
6.4.3. Variables empleadas	317
6.4.3.1. Variables principales	317
6.4.3.2. Variables ambientales	328
6.4.4. Resultados de la estimación de los parámetros	332
6.4.4.1. Ajuste de las regresiones	332
6.4.5. Análisis de la precisión en las estimaciones	339
6.4.6. Calibración	352
6.4.6.1. Ibaizábal	352
6.4.6.2. Oria	354
6.4.6.3. Zadorra	355
6.5. Caso 3: Réal Collobrièr	359
6.5.1. Descripción del área de trabajo	359

6.5.1.1.	Litología y estructura	359
6.5.1.2.	Morfología del terreno	362
6.5.1.3.	Suelos	363
6.5.1.4.	Cubierta del suelo	367
6.5.2.	Información utilizada	369
6.5.3.	Variables empleadas	370
6.5.3.1.	Variables principales	370
6.5.3.2.	Variables ambientales	374
6.5.4.	Resultados de la estimación de los parámetros	375
6.5.4.1.	Ajuste de las regresiones	375
6.5.5.	Análisis de la precisión en las estimaciones	381
6.5.6.	Calibración y validación del modelo TETIS en la cuenca del Réal Collobrières	388
6.5.6.1.	Información de los eventos	388
6.5.6.2.	Calibración del modelo TETIS	388
6.5.6.3.	Validación del modelo	389
6.5.7.	Influencia de la variabilidad espacial en la modelación	392
6.5.8.	Información utilizada	393
6.5.8.1.	Eventos hidrológicos y red de observación	393
6.5.8.2.	Escenarios de simulación	394
6.5.9.	La capacidad de validación de las calibraciones realizadas con modelos distribuidos	395
6.5.10.	El efecto de la variabilidad espacial en la modelación hi- drológica	396
7.	Resumen y conclusiones	399
7.1.	El terreno	399
7.2.	La valores de referencia	402
7.3.	El procedimiento de estimación propuesto	403
7.4.	La distribución espacial de las variables	405
7.5.	Consideraciones finales	408
7.6.	Recomendaciones y futuras líneas de investigación	410
A.	Descripción del modelo TETIS	413
A.1.	Introducción	413
A.2.	La producción de escorrentía	413
A.2.1.	El aporte por fusión de nieve	415
A.2.2.	El almacenamiento estático	417
A.2.3.	Almacenamiento superficial	418
A.2.4.	Almacenamiento gravitacional	420
A.2.5.	El acuífero	422
A.3.	Estructura de los parámetros del modelo	424
A.4.	Laminación en embalses	425

A.5. La traslación del flujo por el cauce	425
A.5.1. La red de drenaje y la geometría hidráulica	426
A.5.2. La rugosidad	427
A.5.3. La velocidad del flujo	428
A.5.4. La ecuación de continuidad	429
A.5.5. Los parámetros de propagación	429
A.6. Variables de estado al inicio del episodio	430
A.7. Resultados del modelo TETIS	432
A.8. Referencias	432

Índice de figuras

1.1. Dimensiones de los diferentes problemas a resolver en Hidrología (Blöschl y Sivapalan, 1995; p.: 10)	37
1.2. Esquema del trabajo desarrollado en esta tesis	48
2.1. Dimensiones escalares de los proceso hidrológicos según Klemeš (1983; p.: 4)	53
2.2. Procesos hidrológicos y su rango escalar característico (en Blöschl y Sivapalan; 1995; p.: 11).	54
2.3. Relación entre la estructura interna del material sedimentario y la variabilidad de la conductividad hidráulica y porosidad	58
2.4. Variación del volumen de muestreo, dado un medio heterogéneo (Miyazaki, et al., 1993).	60
2.5. Variación de los valores medidos de densidad aparente y contenido de agua en suelos (Miyazaki et al., 1993; p.: 260)	61
2.6. Escalas y jerarquías en sedimentología	63
2.7. Escalas y jerarquías en Hidrología	63
2.8. Modelación agregada y distribuida. Agregación y Escala. En: Wood 1995; p.: 4)	72
2.9. Concepto de scaling, upscaling y downscaling, según Blöschl y Sivapalan (1995, p.: 18)	81
3.1. Columna de suelo (Costa y Baker, 1981; p: 147)	103
3.2. Catena de suelos	111
3.3. Relación mutua entre facies y unidades de suelos	113
3.4. Dos regiones	143
3.5. Interacción entre regiones	144
4.1. Ambiente y escenarios de trabajo	182
4.2. Influencia de la dirección de flujo en basaltos (En Davis; 1969; p.: 68).184	
4.3. Características que influyen el valor de la conductividad hidráulica y la porosidad.	184
4.4. Influencia de la estructura edáfica en los valores de conductividad hidráulica.	186

4.5. Variación de la conductividad hidráulica y la porosidad con la profundidad.	186
4.6. Valores medios de K en materiales consolidados	187
4.7. Rangos de la conductividad hidráulica en materiales consolidados.	189
4.8. Valores de conductividad hidráulica en función de la densidad de fracturación.	189
4.9. Categorías básicas de K en mezclas sedimentarias	190
4.10. Relación entre la conductividad hidráulica y el tamaño mediano y la selección de los sedimentos.	192
4.11. Conductividad hidráulica como función del tamaño de grano de un material granular (Tomado de Poireé y Ollier; 1986; p.: 182).	193
4.12. Relación entre conductividad hidráulica y textura, según Dürbaum (en Custodio y Llamas, 1976).	193
4.13. Relación entre conductividad hidráulica y textura, según Breddin (en Custodio y Llamas, 1976).	194
4.14. Rangos de conductividad hidráulica en materiales sedimentarios no consolidados.	194
4.15. Conductividad hidráulica saturada en suelos [<i>cm/h</i>].	195
4.16. Curva característica para un suelo.	198
4.17. Contenido de humedad del suelo.	199
4.18. Drenaje de un suelo y capacidad de campo.	199
4.19. Evolución temporal del contenido de humedad del suelo.	201
4.20. Variación de la transpiración vegetal en función del contenido de agua en el suelo.	203
4.21. Valores medios de agua disponible.	206
4.22. Contenido de humedad a capacidad de campo ([%].	207
4.23. Contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ([%].	207
4.24. Valores medios de la densidad aparente.	208
4.25. Densidad aparente de la fracción mineral	210
5.1. Perfil ejemplo	222
5.2. Ejemplo bidimensional	225
5.3. Variabilidad espacial	227
5.4. Obtención de la intersección entre capas diferentes	230
5.5. Proceso de obtención de los valores muestrales para el análisis	231
5.6. Proceso de digitalización y generación de capas temáticas	236
5.7. Síntesis de capas temáticas	237
5.8. Filtro digital utilizado para la generación de la curvatura del terreno	241
6.1. Grupos estructurales definido en el área de trabajo	249
6.2. Distribución de las unidades litológicas en el área de estudio	252
6.3. Distribución de las unidades estratigráficas en el área de estudio	253

6.4. Distribución de las principales categorías de suelos, según Guerra (1968)	256
6.5. Principales clases texturales superficiales en el área de trabajo . . .	259
6.6. Distribución de las principales tipos de uso del suelo en el área de estudio	260
6.7. Regiones de información	263
6.8. Unidades hidrológicas analizadas en este trabajo	263
6.9. Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales	265
6.10. Valores modales En la cuenca del Tajo	266
6.11. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidimensionales	267
6.12. Estructura espacial de los parámetros analizados en la sub-unidad Alagón. Variogramas omnidimensionales	268
6.13. Estructura espacial de los parámetros analizados en la cuenca Alberche. Variogramas omnidimensionales	269
6.14. Estructura espacial de los parámetros analizados en la sub-unidad Henares. Variogramas omnidimensionales	270
6.15. Estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico y conductividades hidráulicas en la cuenca del Tajo	274
6.16. Evolución del los ajustes según R^2	281
6.17. Residuales	282
6.18. Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales	283
6.19. Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Tajo. Variogramas omnidimensionales	284
6.20. Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alagón. Variogramas omnidimensionales	285
6.21. Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Alberche. Variogramas omnidimensionales . .	286
6.22. Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Henares. Variogramas omnidimensionales . .	287
6.23. Puntos de aforo utilizados en la calibración y validación del modelo	290
6.24. Calibración de Tetis. Cuenca de Alagón en cabeceras (Garcibuey y Ambroz) y cuenca media (Los Ángeles).	291
6.25. Calibración del Tetis. Cuenca del Henares en cabeceras(Pozo de los Ramos), en la cuenca media (Bujalaro) y cuenca inferior (Espinillos)	291
6.26. Validación en Tetis. Cabeceras y cuenca media del Alagón (Garcibuey y Gabriel y Galán) y cuenca superior del Alberche (Navaluenga)	294
6.27. Distribución de los Dominios Hidrogeológicos	300
6.28. Distribución del Cretácico en el terreno analizado	305
6.29. Categorías de conductividad según EVE (1999)	306

6.30. Distribución de las principales categorías de suelos	308
6.31. Presencia de concentración de carbonatos en el perfil, y de características indicadoras de procesos de gleyzación en la zona de estudio	309
6.32. Distribución de la presencia de Rendsinas y de sus suelos asociados	310
6.33. Distribución de las principales tipos de uso del suelo en el área de estudio	313
6.34. Distribución de las regiones de información	315
6.35. Unidades hidrológicas analizadas en este trabajo	317
6.36. Tamaño medio de las unidades cartográficas analizadas (A= Álava; GB= Guipúzcoa-Vizcaya, N= Navarra; CyL= Castilla y León) . . .	319
6.37. Mapa de valores modales	320
6.38. Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales	321
6.39. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidireccionales	322
6.40. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Región Norte. Variogramas omnidireccionales	323
6.41. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Región Sur. Variogramas omnidireccionales	324
6.42. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Ibaizábal. Variogramas omnidireccionales	325
6.43. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Oria. Variogramas omnidireccionales	326
6.44. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Zadorra. Variogramas omnidireccionales	327
6.45. Valores estimados	333
6.46. Evolución del los ajustes según R^2 y el MCE	340
6.47. Residuales	344
6.48. Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales	345
6.49. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Variogramas omnidireccionales	346
6.50. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Región Norte. Variogramas omnidireccionales	347
6.51. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Región Sur. Variogramas omnidireccionales	348
6.52. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Ibaizábal. Variogramas omnidireccionales	349
6.53. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Oria. Variogramas omnidireccionales	350
6.54. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Zadorra. Variogramas omnidireccionales	351

6.55. Hidrograma observado y simulado con los factores correctores de calibración.	353
6.56. Hidrogramas diarios parciales observado y simulado de calibración en la estación D9Z1 Lasarte	355
6.57. Hidrograma observado y simulado con los factores correctores de calibración	357
6.58. Litología global del sector	360
6.59. Estimación independiente de la fracturación media	361
6.60. Geomorfología de la cuenca	363
6.61. Grandes grupos de suelos sus clases texturales principales	365
6.62. Distribución de la densidad y estratificación de la vegetación en el área de trabajo	368
6.63. Mapa de valores modales	371
6.64. Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales	372
6.65. Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidireccionales	373
6.66. Valores estimados	376
6.67. Evolución del los ajustes según R^2 y el MCE	381
6.68. Residuales	385
6.69. Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales	386
6.70. Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Variogramas omnidireccionales	387
6.71. Calibración de TETIS. Evento 1	389
6.72. Validación de TETIS. Evento 2	390
6.73. Validación de TETIS. Evento 2	390
6.74. Validación de TETIS. Evento 3	391
6.75. Simulaciones con diferentes tipos de información	397
A.1. Esquema conceptual del movimiento vertical en cada celda según el modelo TETIS	414
A.2. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS. (Tomado de Vélez, 2001)	415
A.3. Variación temporal del índice de vegetación λ , utilizado para estimar la evapotranspiración en el modelo TETIS	418
A.4. Variación espacial y temporal de coeficiente α , empleando diferentes valores de pendiente s_o	421
A.5. Variación espacial y temporal de coeficiente α , empleando diferentes valores de conductividad hidráulica (k_{ss}^*)	423

Índice de cuadros

2.1. Tamaños de REV, según diferentes escalas y objetivos (Miyazaki et al.; 1993; p. 263)	61
2.2. Escalas en la vegetación	76
3.1. Escalas espaciales y temporales en geomorfología. Tomado de Baker, 1992; p.: 334.	118
3.2. Escala de las unidades ecológicas . Tomado de Westman, 1985; p.: 202.	118
3.3. Unidades geomórficas y órdenes de escala (Baker, 1992; p.: 334)	119
3.4. Escalas de homogeneidad y heterogeneidad en Edafología. Tomado de Elrick y Clothier, 1990, p.: 95.	119
3.5. Ejemplo de tabla de asignación	160
4.1. Unidades utilizadas en los valores de referencia.	181
4.2. División de las rocas consolidadas según su grado de fracturación.	188
4.3. Valores de conductividad hidráulica saturada según el grado de fracturación de rocas consolidadas.	188
4.4. Conductividad hidráulica en mezclas sedimentarias	190
4.5. Mezcla de gravas.	191
4.6. Comparación entre valores de conductividad hidráulica, mediana y selección, en sedimentos no consolidados.	191
4.7. Autores mencionados en cuadros referidos a la conductividad hidráulica saturada de suelos, rocas y material sedimentario	195
4.8. Tipos texturales.	205
4.9. Valores medios del agua disponible en suelos.	206
4.10. Valores medios de la densidad aparente.	208
4.11. Densidad real de los componentes del suelo.	209
4.12. Densidad aparente de horizontes de suelo.	209
4.13. Contenidos materia orgánica en suelos.	211
4.14. Valores de contenido de materia orgánica en suelos.	211
4.15. Contenido de materia orgánica en suelos forestales (pinos)	211
6.1. Coordenadas de los extremos del área de trabajo.	248

6.2. Grupos estructurales definidos en el área de trabajo	249
6.3. Unidades litológicas generales para el área de estudio	252
6.4. Agrupación de unidades estratigráficas en el área de estudio	253
6.5. Categorías básicas de los suelos	255
6.6. División de los suelos más desarrollados	256
6.7. Clases texturales definidas para el área de trabajo	259
6.8. Principales categorías del uso del suelo, basado en la leyenda del inventario CORINE	260
6.9. Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos	262
6.10. Detalle de las variables principales, y su forma de expresión	264
6.11. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales	267
6.12. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Alagón	268
6.13. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Alberche	269
6.14. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Henares	270
6.15. Transformaciones aplicadas a las variables principales	271
6.16. Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión. Ref. MED: Modelo de Elevación Digital	272
6.17. Criterios de separación en variables indicadoras	273
6.18. Detalle del ajuste obtenido para la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo	275
6.19. Detalle del ajuste obtenido para la conductividad hidráulica del suelo	276
6.20. Detalle del ajuste obtenido para la conductividad hidráulica del sustrato del suelo	277
6.21. Precisión de los ajustes realizados	278
6.22. Evolución del ajuste de $\text{SQRT}(Hu)$	279
6.23. Evolución del ajuste de $\ln(Ks)$	280
6.24. Evolución del ajuste de $\ln(Kp)$	280
6.25. Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Tajo	284
6.26. Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alagón	285
6.27. Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alberche	287
6.28. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Henares	288
6.29. Características generales de los eventos analizados	289
6.30. Ajuste del modelo TETIS en las cuencas de Alagón y Henares	292

6.31. Valores de los factores de calibración obtenido en la calibración del modelo utilizando la información del evento 01050000	292
6.32. Valores extremos y propuestos para los factores de calibración, a utilizar en la validación del modelo	293
6.33. Validación del modelo TETIS en las cuencas de Alagón y Alberche	294
6.34. Extensión geográfica del área de estudio. Coordenadas UTM en el Huso 30	296
6.35. Dominios hidrogeológicos	299
6.36. Clases de permeabilidad en el país Vasco	306
6.37. Categorías básicas de los suelos	307
6.38. División de los suelos más desarrollados	308
6.39. Principales tipos del uso del suelo	313
6.40. Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos	314
6.41. Regiones de información integradas en el estudio	315
6.42. Detalle de las variables principales, y su forma de expresión	317
6.43. Valores medios de la superficie de las unidades cartográficas de suelos en las diferentes regiones analizadas. N: Número de datos. L.I.: Límite inferior del intervalo de variación, L.S.: Límite Superior del intervalo de variación.	318
6.44. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales	323
6.45. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Región Norte	324
6.46. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Región Sur	325
6.47. Ajuste de los variogramas omnidireccionales de los valores modales de las variables principales. Ibaizábal.	326
6.48. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Oria	327
6.49. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Zadorra	328
6.50. Transformaciones aplicadas a las variables principales	328
6.51. Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión	329
6.52. Criterios de separación de variables mudas. Geología y estructura geológica	330
6.53. Criterios de separación de variables mudas. Uso de suelo	330
6.54. Criterios de separación de variables mudas. Topografía, relieve y red fluvial	331
6.55. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo	335

6.56. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de conductividad hidráulica saturada del suelo	337
6.57. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de conductividad hidráulica saturada del substrato suelo	338
6.58. Precisión de los ajustes realizados	339
6.59. Evolución del ajuste de Hu	341
6.60. Evolución del ajuste de Ks	342
6.61. Evolución del ajuste de Kp	343
6.62. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales	346
6.63. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Región Norte.	347
6.64. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Región Sur.	348
6.65. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Ibaizábal	349
6.66. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Oria	350
6.67. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Zadorra	351
6.68. Factores correctores obtenidos mediante calibración en la estación NB05 Abusu, en la cuenca del río Ibaizábal.	352
6.69. Resumen de las características del evento durante el periodo de calibración en la cuenca del río Ibaizabal.	352
6.70. Resumen de las características del evento durante el período de validación espacio-temporal en la cuenca del río Ibaizabal empleando los factores correctores de la estación NB05 Abusu.	353
6.71. Factores correctores obtenidos en la estación D9Z1 Lasarte.	354
6.72. Resumen de resultados de la calibración en la cuenca del río Oria.	354
6.73. Resumen de resultados de la validación espacial, en la cuenca del río Oria	356
6.74. Factores correctores obtenidos por calibración en la estación CHE074 Arce en la cuenca del río Zadorra.	356
6.75. Resumen de las principales características del período de calibración en la cuenca del río Zadorra.	357
6.76. Resumen de las características del evento empleado para la validación espacial, en la cuenca del río Zadorra	358
6.77. Extensión geográfica del área de estudio. Coordenadas UTM en el Huso 30	359
6.78. Tipos litológicos dominantes en el sector	361
6.79. Categorías básicas de los suelos	364
6.80. Tipos texturales	366

6.81. Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos	369
6.82. Detalle de las variables principales, y su forma de expresión	370
6.83. Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales	373
6.84. Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión	374
6.85. Criterios de separación de variables mudas	375
6.86. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo	377
6.87. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la conductividad hidráulica del suelo	378
6.88. Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la conductividad hidráulica del substrato del suelo	379
6.89. Precisión de los ajustes realizados	381
6.90. Evolución del ajuste de Hu	382
6.91. Evolución del ajuste de Ks	383
6.92. Evolución del ajuste de Kp	384
6.93. Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales.	387
6.94. Resultados de la calibración del modelo TETIS en Pont de Fer, sobre la base de los valores del Evento 1	388
6.95. Factores correctores obtenidos mediante calibración en la estación Pont de Fer. Evento 1	389
6.96. Resultados de la validación en diferentes puntos de aforo y en diferentes eventos	391
6.97. Valores del Índice de Nash-Shutcliffe para diferentes opciones de agregación de variables principales	395

Capítulo 1

Introducción y estructura de la Tesis

1.1. Las necesidades actuales en Hidrología

Las necesidades de la Hidrología, lejos de disminuir, se incrementan conforme pasa el tiempo. La dinámica del desarrollo humano, y sus necesidades son los argumentos de más fuerza, que dan razón a su existencia en la actualidad. Los constantes cambios en la superficie terrestre, como resultado de la actividad humana, así como la creciente necesidad de contar con medios hídricos para cubrir las demandas poblacionales, industriales, etc. son un ejemplos de ello.

Lo planteado anteriormente es, en sí mismo, un problema cuya solución se define sobre la base de cuatro dimensiones:

- i) La dimensión del ecosistema sobre la que se desarrolla el problema.
- ii) La del recurso hídrico, el punto de análisis en cuestión.
- iii) La dimensión socio-demográfica, especialmente en términos de crecimiento poblacional, urbanización y la existencia de áreas ambientalmente protegidas.
- iv) Finalmente, una cuarta dimensión, dada por la interdependencia de los procesos y sus resultados, señalando así la aparición de una matriz de complicación o complejidad del problema global que se aborda.

A partir de estas premisas, en esta Tesis se centra la atención en la búsqueda de soluciones técnicas a parte de este problema global, el relacionado con la modelación hidrológica.

La Hidrología es una disciplina científica que estudia los procesos que involucran el movimiento del agua a través de la superficie del terreno, y desde ésta al subsuelo, así como el movimiento del agua desde el subsuelo hacia la atmósfera. Así, en

términos académicos, su utilidad fundamental reside en el estudio y comprensión del ciclo hidrológico terrestre.

Un estudio hidrológico consta de tres etapas sucesivas. En la primera se estudian los procesos involucrados por medio de la observación (directa o indirecta). Posteriormente se procede a la construcción de esquemas de trabajo y modelos. Finalmente, se elabora una síntesis de las observaciones realizadas y de los esquemas propuestos. Estas etapas conforman a su vez tres “formas” de estudio que por su alcance, grado de detalle y consecuencias posteriores al propio estudio, es posible caracterizar las magnitudes, desarrollo y escalas (temporal y espacial) de cada componente del fenómeno hidrológico analizado. Sus magnitudes se relacionan en un balance, de forma tal que no existe ni creación ni destrucción de masas de agua. Los resultados obtenidos son, a su vez, una de las claves fundamentales para comprender los efectos de los procesos hidrológicos sobre los procesos ecológicos y la morfología del terreno.

Independientemente del fin concreto de un estudio, la visión de la Hidrología es necesariamente global. Así, si bien normalmente un estudio hidrológico analiza en particular ciertos componentes hidrológicos, tal estudio involucra implícita o explícitamente a la totalidad del ciclo hidrológico.

Existe un problema fundamental en el estudio de un sistema hidrológico, y es que la mayor parte de las acciones se llevan a cabo bajo tierra (Beven, 2001). Lo reciente de la cita se contrapone con lo antiguo del problema. En este contexto, ha sido siempre el suelo el elemento clave para comprender el desarrollo de la infiltración, el escurrimiento superficial y subsuperficial, y, por ser la base sobre la cual se desarrollan las plantas, la evapotranspiración.

Por una parte, se han desarrollado sucesivas generaciones de sistemas de medición *in situ* de diferentes propiedades del terreno, que superan a las tradicionales técnicas, las cuales requerían una alta proporción de procesamiento en laboratorio. Por otra parte, se han logrado grandes avances tecnológicos en el área de sensores remotos para el conocimiento y análisis de la superficie terrestre. A pesar de todo ello, el conocimiento existente respecto a los procesos que suceden bajo tierra sigue siendo limitado.

Por otra parte, desde la pequeña fracción de terreno que se analiza en un estudio de detalle, hasta la fracción de territorio que ocupa una cuenca media un cambio de dimensiones considerable; en algunos casos espectacular. En dicho cambio se pueden observar el desarrollo de múltiples variaciones de diferentes aspectos del terreno, tanto locales como regionales, así como la generación de procesos (edáficos, hidrológicos, etc.) de diferente escala de magnitud espacial y temporal resultantes a consecuencia de tales variaciones.

Ante el panorama planteado anteriormente, es necesario reflexionar, tal como ya lo hizo Beven, en el año 2001. Se trata de analizar un medio altamente complejo

que afecta directamente a la actividad humana. Sumado a esto se debe reconocer que no es posible, con los medios técnicos actuales, reproducir con *total fidelidad* las complejas relaciones observadas en una muestra proveniente de un estudio de detalle. Uno de los inconvenientes mayores para el avance en el conocimiento de este medio se localiza en la capacidad de observación humanas. Las actuales técnicas de medición y estimación no permiten comprender en profundidad estos comportamientos, haciéndolos a veces prácticamente inentendibles.

Lo dicho anteriormente se superpone al amplio espectro de problemas a tratar en la realidad.

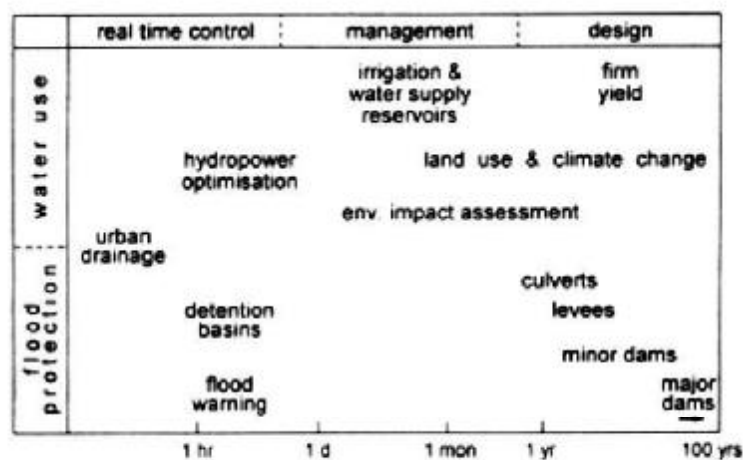


Figura 1.1: Dimensiones de los diferentes problemas a resolver en Hidrología (Blöschl y Sivapalan, 1995; p.: 10)

Los problemas de observación y estimación no son una barrera infranqueable para la comprensión de los problemas. Los problemas reales que potencialmente provocan los procesos hidrológicos hacen necesario continuar con los estudios. La eficiencia de las técnicas anteriormente mencionadas puede incrementarse por medio de la implementación de otra herramienta que aporte la capacidad de abstracción y entendimiento humano: la modelación.

La evolución de las técnicas de modelación ha mostrado diferentes resultados, cubriendo un amplio rango en cuanto a complejidad y precisión se trate. Sobre este amplio tema, es necesario remarcar en particular que desde hace ya 10 años existe el requerimiento adicional de técnicas simples, con las cuales asistir a la gestión corriente de los recursos naturales. Tal apreciación no es nueva y ha sido ya expuesta en otras oportunidades, destacándose el caso de Brakensiek y Rawls

(1989) donde se puso de manifiesto la necesidad de continuar en el desarrollo de los modelos de infiltración y estimación de variables en los modelos ya existentes en esa época. Parte de esta temática afecta directamente al desarrollo del presente trabajo.

La técnica de modelación de procesos hidrológicos se ha desarrollado ampliamente desde la década de los 30 hasta el presente, generándose gran cantidad de técnicas y modelos, tal cual lo documenta detalladamente Singh (1995 y 1988). A lo largo de esta última década, la modelación distribuida ha sido la herramienta con mayor desarrollo en el medio científico y técnico de la Hidrología.

En la modelación hidrológica distribuida, los parámetros hidrológicos empleados deberán estar, necesariamente, *distribuidos espacialmente*. Esto significa que los parámetros deben estar repartidos sobre la superficie del terreno de forma más o menos continua, *respetando su variabilidad natural*.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la distribución de los parámetros de calibración debe ser *estable y confiable*, en cuanto a que el criterio de reparto espacial de sus valores sea coherente con el tipo de terreno y los materiales que lo componen, el uso de suelo presente, el tipo de cubierta vegetal existente, etc. De esa forma las posibilidades de una validación aceptable aumentan sustancialmente.

La necesidad de *coherencia* no responde a requisitos puramente teóricos sino, y sobre todo, a necesidades prácticas. La correcta calibración de un modelo debe garantizar que el mismo refleje la realidad del medio sobre el que se aplica a fin de que sea posible reproducir el comportamiento del sistema a partir de información limitada.

Cabe recordar que muchas han sido las ocasiones donde se ha comprobado que existen muchas formas de calibrar un modelo, sobre la base de un número reducido de eventos. De todas estas posibles formas, son pocas (normalmente *muy pocas*) las que pueden ser validadas con otros eventos, bajo condiciones diferentes a las de la calibración.

Las necesidades planteadas anteriormente chocan con el inconveniente, nunca resueltos, de la disponibilidad de valores de cada uno de los parámetros necesarios en el lugar, cantidad, calidad, escala y distribución adecuada a las necesidades particulares de la modelación hidrológica. En estos casos caben tres alternativas:

- a) Elaborar un sistema de muestreo y monitoreo extensivo y detallado mediante el cual adquirir un gran volumen de datos para procesar y así obtener el valor de los parámetros necesarios en el lugar indicado.
- b) Desarrollar un proceso de estimación basados en considerar modelos estocásticos, por medio del cual, y sobre la base de un volumen limitado de datos puntuales, elaborar campos de parámetros estimados como el producto de “realizaciones” estocásticas.

- c) Aprovechar los datos y la información disponible tanto cartográfica como no cartográfica, proveniente de diferentes fuentes y escalas de análisis, para desarrollar un esquema que respete las relaciones observadas en el terreno y coherentes con el conocimiento existente del tema, a fin de estimar de forma precisa y documentada los valores de los parámetros necesarios para la modelación.

La primera de las alternativas resulta, en la mayoría de los casos, *impracticable*. Los proyectos científicos y/o técnicos empresariales no cuentan con una infraestructura tal que permita obtener de forma rápida y económica un volumen tan grande y multivariado de información como la necesaria en Hidrología, especialmente la distribuida. Esto se contrapone con la necesidad concreta de *comprender* el comportamiento hidrológico del terreno. Adicionalmente, se corre el riesgo de que, si el muestreo no es el resultado de un análisis minucioso de la situación, los resultados señalen la existencia de información *redundante, voluminosa*, pero que no necesariamente sea la *suficiente* para responder a los interrogantes y necesidades planteados al inicio del programa de muestreo. El volumen y el tiempo y trabajo invertidos en una campaña de muestreo no es garantía de su efectividad para responder a las preguntas planteadas, ni de su grado de precisión a la hora de elaborar conclusiones. Los resultados del muestreo son dependientes del criterio con que fue diseñado el mismo, y de las técnicas empleadas en la obtención y procesamiento de las muestras.

La segunda alternativa se basa, mediante precisas técnicas matemáticas, en elaborar estimaciones elaboradas a partir del ajuste óptimo de los valores puntuales utilizados. Su fundamento estadístico y matemático queda fuera de discusión en esta Tesis. Sin embargo se destaca aquí el hecho que su aportación a la explicación de la variabilidad de el/los parámetros respecto de los demás componentes del medio natural es escasa o nula, llegando a ser muchas veces ignorada. El proceso es cerrado: nueva información provocaría en muchos casos la necesidad de *rehacer* todo el proceso de estimación. Por otra parte, los resultados son siempre dependientes de un volumen de conocimiento e información sumamente limitada y, a veces, peligrosamente interpretada. La precisión de la técnica o modelo empleado no es garantía de la efectividad para responder a las preguntas planteadas, ni de su grado de precisión a la hora de elaborar conclusiones. en este caso se depende completamente de los datos utilizados y del criterio con que éstos fueron seleccionados.

La tercer alternativa enfoca la solución de los problemas desde una visión diferente a las anteriores. Ante la una realidad que se manifiesta en el medio natural de forma compleja y fragmentaria, (al menos según el conocimiento que se tiene del mismo hasta el presente) un proceso de análisis e interpretación coherente con él, implica necesariamente la elaboración de relaciones analíticas basadas en la *confluencia de criterios y evidencias*. Así es que la alternativa más coherente tanto

en la actividad científica como en la empresarial aplicada es la de aprovechar la información existente, comúnmente amplia y que abarca diferentes fuentes, escalas, y criterios de observación.

En primer lugar, la clave de esta tercer alternativa se basa en la convergencia de criterios. Ésta es la clave fundamental del problema tanto del análisis como del proceso de estimación. El hecho de contar con una información variada, aunque *eventualmente* incompleta, asegura una mayor precisión en los resultados, conduciendo a una mayor *estabilidad* en las conclusiones

Por otra parte, la elaboración de un esquema de integración de información, como el desarrollado en esta Tesis, a la vez que permite la estimación de valores concretos para la simulación hidrológica, permite elaborar estudios respecto de diferentes escenarios de trabajos. Así, se cuenta con una herramienta útil con la cual es posible diseñar una o más campañas de muestreo concretas y cuya precisión y éxito será más fácil de evaluar *a priori*.

Lo dicho pretende destacar que, en vez de reemplazar a la alternativa de muestreo, un correcto análisis de la información previa y el establecimiento de un esquema de relaciones entre variables del terreno favorecen a su implementación. De la misma forma, la simulación estocástica sigue cumpliendo dentro de este esquema, con la función de herramienta para poder analizar la naturaleza de los errores generados, y su posible relación con las diferentes variables analizadas.

1.2. Objetivos

Dado que, como ya se expresó anteriormente el suelo es el elemento clave para el análisis hidrológico del terreno, en esta Tesis se procura avanzar sobre la respuesta a una pregunta básica: **¿por qué los suelos se distribuyen sobre el terreno tal como se observa en la realidad?**. O lo que es lo mismo: **¿por qué en un determinado terreno se encuentra un determinado tipo de suelo y no otro cualquiera?** La pregunta y su respuesta afectan directamente a la interpretación hidrológica del medio natural. Tanto sea que se consideren objetivos científicos o aplicados, desde el punto de vista hidrológico la pregunta puede traducirse como la necesidad de conocer el porqué de las particular distribución en el terreno de ciertos parámetros edafológicos, utilizados en la modelación hidrológica.

Instintivamente, puede deducirse que la clave para la solución de este problema se encuentra *en el medio natural* en el cual se desarrollan los suelos. Así, para lograr una respuesta, aunque parcial, a esta pregunta, es necesario pasar de la especulación pura al procedimiento concreto, con el cual ensayar hipótesis y analizar resultados. En este caso, lo dicho implicaba necesariamente desarrollar algún procedimiento, original o adaptado, con cual *reproducir el patrón de distribución* de los parámetros seleccionados de la forma más fiel posible a la realidad. A partir de lo anterior, surgieron dos caminos fundamentales a transitar: la diferencia

entre ambos se basaba tener en cuenta o no las razones por las cuales se produce tal patrón de distribución. Esto es: si el desarrollo de la metodología implicaba o no el averiguar cuáles son los componentes del medio que afectan a la distribución de los suelos y de los parámetros hidrológicos seleccionados. Una de las vías, la segunda mencionada, definitivamente no logra satisfacer a la pregunta planteada al inicio, y fue descartada. La restante, con sus pros y sus contras, fue la desarrollada en este trabajo.

Una vez definido la vía principal de análisis surgió una nueva pregunta. Esta fue: **¿Existe alguna evidencia disponible para poder avanzar en el análisis del patrón de distribución espacial de los suelos?**. En la misma se destacan dos puntos fundamentales. Por una parte la calidad o detalle con el cual es posible observar el problema concreto, y por otra parte la disponibilidad de los resultados provenientes de dichas observaciones. No todas las formas de observación de los suelos y sus resultados están disponibles en todos los lugares y en todos los momentos en los cuales éstos son necesarios. A partir de allí se desarrollaron las hipótesis con las cuales ensayar una respuesta válida. Sin embargo, en ningún momento se dejó perder de vista la pregunta principal que movió a la elaboración del trabajo. Las hipótesis señaladas a continuación procuran por la vía del desarrollo de un procedimiento concreto de estimación espacial analizar el terreno y describir las relaciones e interacciones existentes entre el suelo y el medio que lo contiene. Todo esto dentro de las limitaciones de información y detalle de observación que caracterizan la aplicación de un modelo hidrológico en la realidad profesional actual.

Sobre la base de lo expresado anteriormente, **el objetivo principal de esta Tesis** es la de *diseñar un procedimiento operativo para la estimación y distribución espacial de los parámetros hidrológicos del terreno a escala de celda de modelación, en función de la información disponible*. Para conseguir tal fin, será necesario tener en cuenta tres puntos claves:

- i) *Adaptabilidad*: El procedimiento debe poder realizarse utilizando la información con que normalmente se cuenta en un proyecto de modelación hidrológica práctica.
- ii) *Robustez*: El procedimiento debe ser lo suficientemente robusto y estable como para garantizar que la implementación del mismo no genere valores alejados de la realidad observada u observable.
- iii) *Capacidad de integración*: Ante la normal incertidumbre respecto del comportamiento de los parámetros hidrológicos en cada caso a modelar, es necesario obtener resultados que *agreguen conocimiento* a lo que ya se cuenta en ese caso concreto. Así, durante el proceso de estimación, los resultados deben indicar qué parte de la información disponible es relevante a las necesidades

de ese momento, y cómo ésta afecta a su variabilidad. Al conocer el grado de importancia de la información con la que se cuenta, el procedimiento será posible ampliar o descartar tal tipo de información a fin de mejorar la estimación y distribución de los parámetros.

Para alcanzar los objetivos propuestos fue necesario dividir el trabajo en tres etapas básicas.

En la primera etapa se debió tener en cuenta los requerimientos de los modelos hidrológicos distribuidos en cuanto a los parámetros que hacen referencia al suelo. Por otra parte se tuvieron en cuenta las fuentes de información que pueden brindar apoyo en la estimación de los valores de los parámetros así como en la distribución de los mismos en el terreno.

En la segunda etapa se desarrolló el procedimiento en sí mismo. Se llevó a cabo la tarea de elaborar un método que permita de forma eficiente organizar la información disponible en sus diferentes formatos, y relacionar sus componentes de forma tal que fue posible estimar el valor de uno o más parámetros del terreno de forma distribuida en el espacio.

Finalmente, en la tercer etapa los resultados obtenidos fueron aplicados en la modelación hidrológica distribuida. En esta última etapa se utilizará un modelo hidrológico distribuido ya existente, con el que se llevarán a cabo las comprobaciones de la precisión de los resultados obtenidos. De esta forma se analizó el comportamiento de las estimaciones realizadas, en relación con la calibración y ajuste del modelo en eventos de crecida.

1.3. Hipótesis

A continuación se desarrollan las hipótesis que fueron analizadas en el presente trabajo de Tesis.

La hipótesis fundamental sobre la cual se basa el desarrollo conceptual de esta Tesis expresa que: ***El suelo representa a un complejo de efectos superpuestos de diferentes componentes del medio, a diferentes escalas temporales y espaciales. Su distribución espacial y su respuesta hidrológica en cada punto de la superficie del terreno puede ser explicada de forma precisa a partir de su relación con el entorno del que procede.*** Con esta hipótesis se pretende expresar que, es posible describir de forma concreta las principales variables que afectan al desarrollo y cualidades hidrológicas del suelo a partir de analizar el medio en el cual se desarrolla y destacar las interacciones existentes entre los elementos que componen dicho entorno.

La segunda hipótesis, deriva de la primera siendo la base para el desarrollo práctico del trabajo de Tesis. La misma propone que: ***Es posible analizar cuantitativamente y de forma distribuida el comportamiento hidrológico del***

terreno a partir de la información que normalmente se dispone en un estudio hidrológico.

Esta hipótesis está directamente vinculada a la primera, tanto en su significado conceptual como práctico. Se pretende demostrar que, al inicio de un proyecto hidrológico se posee cierta información que, a pesar de ser muchas veces incompleta o dispersa, es factible de ser aprovechada de forma tal que se pueda elaborar un escenario suficientemente *preciso* para desarrollar un proceso de simulación con un modelo hidrológico distribuido. El criterio principal sobre el que se basa esta hipótesis es el de la *confluencia de evidencias*, tal como se mencionó anteriormente en este capítulo. El manejo conjunto, responsable y con criterio de las diferentes fuentes de información, a pesar de sus limitaciones, permite arribar a conclusiones precisas y *coherentes*. La causa fundamental por la cual la estimación de la variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos no es satisfactoria, no reside en la técnica de estimación en sí misma. La causa fundamental reside en la falta de criterios de integración de la información y el aprovechamiento de los conocimientos que se poseen en la actualidad. En otras palabras: *la falta de una visión que integre desde el punto de vista teórico y práctico la información con los conocimientos que se poseen del proceso, provoca que los procedimientos puestos en práctica no logren generar una alternativa de estimación espacial fiable*. Se produce así la sub-utilización de los elementos que se poseen. Una visión correcta del problema integra evidencias parciales contenidas en la información y genera, a través de la convergencia de criterios, un esquema que representa con fidelidad la realidad observada.

Apoyándose en lo anterior, se desarrolla la tercer hipótesis: ***Es posible, basándose en la información cartográfica con que normalmente se cuenta al inicio de un proyecto hidrológico, analizar y cuantificar la variabilidad espacial de aquellos atributos del terreno de utilidad para caracterizar el comportamiento hidrológico del mismo.***

Lo anterior indica que, mediante un adecuado proceso de aprovechamiento de la información cartográfica, es posible contar con valores suficientes para poder desarrollar un proceso de modelación simulación hidrológica distribuida.

Con el fin de completar el esquema delineado por las hipótesis anteriores, se desarrolla una cuarta: ***El aprovechamiento completo de la información cartográfica disponible requiere de la incorporación de valores numéricos modales¹ asociados a diferentes atributos del terreno sobre la base del conocimiento previo que se posee del tema y de la región estudiada.***

Con la última hipótesis se completa el ciclo de estimación propuesto en esta Tesis. La información cartográfica puede ser completada y/o enriquecida con la aportación de “valores de referencia”. La fuente de estos valores se encuentra en el

¹Se entiende por valor modal al valor más frecuente con que se puede caracterizar a una determinada variable de forma general.

conocimiento que se posee del proceso hidrológico, del medio en que se modela y de la región en particular que se analiza. De esta forma es posible incorporar al proceso de estimación fuentes de información que normalmente no son analizadas, al menos de forma sistemática.

1.4. Condicionantes en el desarrollo del trabajo

Dada la amplitud potencial del tema, es necesario establecer unos límites dentro de los cuales desarrollar el trabajo de esta Tesis. A continuación, se exponen un conjunto de conceptos, a partir de los cuales se desarrolló el trabajo.

1.4.1. Las componentes del terreno

El terreno que se analiza en este trabajo se esquematiza a través de un conjunto de componentes, señalados a continuación.

Se consideró que en el terreno analizado existen tres elementos básicos que lo definen a nivel conceptual:

- i) Una componente superficial, relacionada a la cubierta vegetal, usos del suelo y al primer nivel, manto, capa o estrato (mineral u orgánico) que cubre la superficie del terreno. Dentro de ésta se desarrollan los procesos de retención, almacenamiento superficial, encharcamiento, y la penetración del agua dentro del terreno (la primer etapa del proceso de infiltración).
- ii) Una componente intermedia, netamente relacionada con el suelo o material sedimentario, con diferentes grados de edafización y/o alteración del material rocosos. Es el soporte físico de las plantas y el medio principal de la exploración de sus raíces. Se considera que esta componente representa a la capacidad de almacenamiento capilar del suelo, según las condiciones de un material sedimentario o edáfico ubicado en las laderas de una cuenca de montaña. Además, esta componente representa la máxima capacidad de infiltración hídrica en el terreno, en función de un valor dado de permeabilidad.
- iii) Una componente del substrato del suelo donde se relaciona a un material sedimentario o roca consolidada sin alterar o con rasgos de alteración débiles, identificados con el material parental de los suelos. La componente del substrato representa la condición del medio para permitir la percolación del agua hacia el interior del medio.

Las tres componentes se vinculan con los modelos hidrológicos y de infiltración, siendo una generalización operativa de éstos, a fin de distinguir las variaciones sistemáticas del terreno, desde el punto de vista hidrológico. Se considera que el

límite entre una y otra componente está marcado por un cambio visible y / o evidente en las condiciones físicas del suelo o material sedimentario (por ejemplo: un horizonte o capa de menor permeabilidad hidráulica que el superior al mismo). La componente superficial del terreno se vincula principalmente a la cubierta vegetal del terreno. Complementariamente, esta última se ve afectada por:

- a) El grado de degradación de la cubierta.
- b) El uso del terreno como sostén de cultivos.

La componente intermedia se relaciona invariablemente con la presencia de suelos o de un material sedimentario que lo reemplace en la función de reservorio de agua y sostén para las plantas. Su comportamiento se establece como función de la textura, estructura y morfología del perfil de suelo.

La componente del substrato depende, principalmente, del tipo de roca o material sedimentario que lo compone. Complementariamente, el substrato geológico se representa en forma idónea por medio de la definición de su ductilidad a la deformación mecánica, en base a su textura y composición química. Por otra parte, la edad de las rocas que componen el terreno indica la duración de los procesos de tectonización y meteorización que han sufrido desde su origen. Edad, estructura y composición son variables que definen a los materiales geológicos. Así, la ductilidad de una roca se ve afectada por la edad de la misma, la cual señala el período temporal en la que ésta fue expuesta a procesos de meteorización, alteración superficial, y eventualmente, edafización. Adicionalmente a lo anterior, en cuencas hidrográficas de montaña, la presencia de fracturación (fallas, contactos mecánicos, diaclasas, etc.) representa el campo de variación local de las condiciones físicas del terreno.

En el mismo sentido de lo anterior, se conoce que la fracturación modifica a la permeabilidad del substrato rocoso. La modificación local del substrato rocoso provoca la generación de condiciones locales favorables a un desarrollo más evidente del ciclo erosión -deposición (percolación, meteorización de rocas, remoción, transporte y deposición de sedimentos). Así, se puede afirmar que la presencia de zonas localmente más modificadas se asocia a un cambio local en el tipo de cobertura o en su estado.

Lo dicho ilustra convenientemente el concepto de *confluencia* de evidencias, ya mencionado, tal como se lo considera en la presente Tesis. El mismo, junto con la conceptualización de los tres elementos básicos del comportamiento hidrológico son las bases sobre las que se apoya la metodología propuesta en este trabajo.

Se entiende que el modelo hidrológico reproducirá con precisión el comportamiento hidrológico del terreno, a partir de tomar en cuenta en su formulación la presencia de estas tres componentes. En esta Tesis, se tendrá en cuenta para el desarrollo de

la etapa de simulación hidrológica un modelo hidrológico distribuido conceptual, denominado TETIS, desarrollado por personal perteneciente al Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (Vélez, 2001; Francés, et al., 2002; Vélez et al., 2002).

1.4.2. La información disponible

En esta Tesis, se entiende por información disponible a toda aquella fuente de información puntual o areal, disponible al momento de comenzar un estudio concreto. Se incluye así, mapas (en formato digital en papel) e imágenes de sensores remotos de diferente escala y grado de cobertura, literatura descriptiva del área, o de la historia geológica e hidrológica del sector, por ejemplo. Se incluye también la información que es posible recoger en diversos trabajos de campo sin que éstos se conviertan en labores de muestreo intensivo y/o sistemático. Normalmente este tipo de tareas son las que llevan a cabo el personal técnico con el fin lograr captar una imagen real del problema a modelar.

En síntesis: se trata de todo el material de trabajo que es posible de obtener sin recurrir a una campaña de muestreo “ad hoc”.

1.4.3. Los *valores de referencia* que caracterizan al comportamiento hidrológico del terreno

El objetivo principal que impulsa a tener en obtener valores de referencia es el de contar con un *conjunto de valores* de ciertas cualidades y características hidrológicas del terreno. En el caso de esta Tesis son:

- i) Conductividad hidráulica de suelos y substrato.
- ii) Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo.

El propósito de este tipo de labor se concentra, entonces, sobre las *características y cualidades hidrológicas del terreno* y no en analizar los cambios que se producen cuando éstos actúan influyéndose entre sí². Por lo tanto, el análisis se dirige a los *componentes* del terreno en sí mismo.

En esta Tesis, los componentes del terreno que interesan son:

- a) Suelos.
- b) Sedimentos.

²Se considera que las relaciones funcionales mutuas entre los diferentes mecanismos hidrológicos forman parte de la modelación hidrológica. Así, su estudio constituye una etapa posterior al análisis de los valores de referencia.

c) Rocas.

Los *suelos* se distinguen de las rocas y sedimentos en base reconocer que sobre ellos han actuado una serie de procesos físicos y químicos después de la sedimentación y/o consolidación de los materiales (procesos pedogenéticos). Éstos fueron tenidos en cuenta como la mayor fuente de variabilidad en los valores de velocidad de infiltración y almacenamiento hídrico.

Finalmente, los *sedimentos y las rocas* fueron considerados como la fuente más importante de variación en los valores de conductividad hidráulica y porosidad del substrato de los suelos.

Por otra parte, el problema que presenta el análisis de valores de referencia es que se encuentran dispersos en la bibliografía referida a temas agronómicos, geotécnicos e hidrológicos, entre otras materias. Adicionalmente, la forma de expresión con que se encuentran dicha información es variada, ya sea por el criterio de clasificación empleado como por las unidades en las cuales se expresan (SI, anglosajón, etc.). En consecuencia, se agrega así un objetivo adicional: *organizar la información existente* del tema.

Las hipótesis sobre las que se basan los resultados de este tipo de análisis tratan, fundamentalmente respecto al origen y significado de los valores de referencia. Éstas son:

- i) Los valores de referencia representan el valor modal que una cualidad o característica toma en una determinada situación ³, tipo de material ⁴ o estado ⁵.
- ii) Los valores de referencia admiten usualmente un rango de variación alrededor de éste, el cual representa la dimensión con que éste ha sido descrito en la bibliografía.
- iii) Las situaciones, tipos de material o estado para las cuales se determina un valor de referencia resultan de la división de todo el campo posible en la naturaleza en un número reducido de intervalos, los cuales han sido los más frecuentemente citados en la literatura.

En consecuencia, queda claro que desde el punto de partida los valores de referencia deben ser empleados con sumo cuidado y no reemplazan al buen juicio y experiencia de quien los utiliza.

³Por situación se entiende en este trabajo a los indicadores ambientales que suelen acompañar la cita de un valor de referencia; por ejemplo: "suelos arcillosos sin cubierta vegetal".

⁴Por material se entiende en este trabajo al conjunto de sedimentos, rocas, suelos, etc.

⁵Por estado se entiende en este trabajo aquella condición que modifica las cualidades o características originales del material; por ejemplo: fracturación, alteración, salinización, etc.

1.5. Trabajo de tesis desarrollado

En la presente Tesis se desarrollan diferentes capítulos, con los cuales obtener argumentos para confirmar o descartar las hipótesis expuestas. La Figura 1.2 se expone con el objetivo de guiar e ilustrar al lector sobre las diferentes etapas de trabajo realizadas y las conclusiones a las que se arribaron.

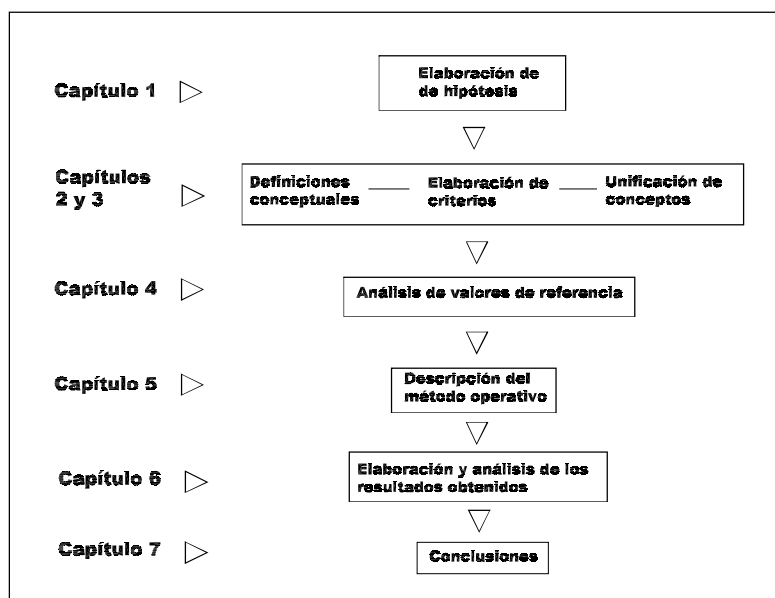


Figura 1.2: Esquema del trabajo desarrollado en esta tesis

En el *Capítulo 2*, se exponen las principales conceptos respecto la modelación hidrológica y del medio natural sobre el que desarrolla. Se exponen así los principales problemas que implica esta tarea y sus múltiples conexiones mutuas. Asociado a esto se exponen las ideas referidas a la problemática de la variabilidad espacial y la escala.

En el *Capítulo 3*, se expone la primera parte del desarrollo original del trabajo de Tesis. En el mismo se analiza desde el punto de vista conceptual los problemas que surgen de la utilización de la información disponible. A partir del análisis de los principios mediante los cuales se elabora la información de utilizada en Hidrología se expone una propuesta de relación y unificación de criterios con vistas a la interpretación operativa. del terreno. El capítulo concluye con una breve descripción de la herramienta considerada idónea para el desarrollo práctico del trabajo de Tesis: el Sistema de Información Geográfica.

En el *Capítulo 4* se expone una revisión, análisis y síntesis de los valores de referencia destinados a caracterizar los parámetros de interés en este trabajo y que

fueron mencionados anteriormente en este capítulo.

En el *Capítulo 5* se expone la metodología práctica desarrollada en este trabajo, basada en lo propuesto en el Capítulo 3, destinada a la distribución espacial de los parámetros de suelo definidos a partir de los valores de referencia indicados en el capítulo anterior.

En el *Capítulo 6* Se exponen los resultados obtenidos en la calibración del modelo hidrológico distribuido TETIS en cuencas de diferente tamaño, complejidad y situación geográfica (Centro y norte de España y sur de Francia). Para ello se tuvieron en cuenta los valores de referencia expuestos en el *Capítulo 4*.

Finalmente, en el *Capítulo 7* se exponen las conclusiones a las que se arribó a partir del análisis de los resultado obtenidos y de las hipótesis propuestas.

Como elemento de referencia, en el apéndice que acompaña a esta Tesis se describe la estructura y funcionamiento del modelo TETIS, ya mencionado.

1.6. Referencias

- Brakensiek, D. L. y Rawls, W. J.** *Infiltration research needs in watershed hydrology*. Transactions of the ASAE, Vol. 32 (2): 633 - 637. 1989.
- Beven, K. J.** *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. Willey. UK; 2001.
- Blöschl, G. y Sivapalan, M.** *Scale issues in hydrological modelling: a review* En: **Kalma, J. D. y Sivapalan, M. (Eds.)** *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley, p.: 71-48. UK, 1995.
- Francés, F, Vélez, J, Vélez, I y Puricelli, M.** *Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain*. 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. USA; 2002.
- Singh, V. P.** *Hydrologic Systems* Prentice - Hall. 1988.
- Singh, V. P. (Ed.)** *Computer models of watershed hydrology* Water Resources Publications. USA; 1995.
- Vélez, J. I.** *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 2001.
- Vélez, J, Vélez, I, Puricelli, M. y Francés, F.** *Hydrological simulation of floods events at large basins using distributed modelling*. Congreso: European Geophysical Society, Session HSA5.01. Contribution EGS02-A-05594. Geophysical Research Abstracts. European Geophysical Society. vol 4; 27 th General Assembly. Niza, 2002.

Capítulo 2

El medio natural y la modelación

2.1. Sistemas hidrológicos y variabilidad

2.1.1. El terreno analizado

El terreno analizado se concibe en esta tesis como la fracción de superficie terrestre afectada por el estudio, dentro del cual se desarrollan procesos naturales (erosión, generación de suelo, inundación, desertización, etc.), no naturales (urbanización, explotación agrícola, etc.) y que puede ser caracterizado en términos de su *comportamiento hidrológico*.

Los procesos hidrológicos que se analizan se desarrollan en una fracción concreta del paisaje terrestre. La definición de Zonneveld (1989) es la más adecuada para caracterizar a esta fracción del terreno. Este autor define a la unidad de terreno (en inglés: "land unit") como la porción de paisaje la cual es ecológicamente homogénea al nivel de escala analizado. En esta definición existen diferentes puntos a considerar.

Por una parte, el concepto de Unidad de Terreno es el concepto central en la ecología del paisaje. Es la consecuencia lógica de la hipótesis por la cual el paisaje es considerado como un sistema, el cual se encuentra contenido en otro sistema de orden jerárquico mayor, destacando así la naturaleza holística del paisaje y de las relaciones entre ecosistemas (Zonneveld, 1989).

La definición del terreno como fracción de paisaje y éste a su vez como una unidad de terreno que posee entidad y jerarquía propia, resulta de sumo interés desde la óptica hidrológica. Así, una cuenca hidrológica es, por naturaleza, una unidad de terreno. Una cuenca se subdivide en subcuencas y éstas en unidades menores hasta el límite de poder ser representada, en su totalidad, como el conjunto de celdas de forma geométrica definida y regular en un plano. Todo depende del grado de detalle en el análisis.

Los conceptos que permiten definir a una unidad de terreno (terreno, escala, homogeneidad) son motivo del análisis desarrollado a continuación.

2.1.2. Sistemas y jerarquía

Ya se ha afirmado anteriormente que los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, y el conocimiento que se posee de ellos es aún reducido. Es por esto que se los representa por medio del concepto de *sistema*.

Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí y actúan por interacción, formando un *todo*. En este caso, una cuenca hidrográfica es, en sí mismo, un sistema.

Un sistema es un conjunto de elementos (o unidades) en un cierto estado, que están conectados por relaciones que unen a éstos con el ambiente al cual pertenecen (Naveh y Lieberman, 1984; p: 27). El conjunto de relaciones entre los elementos y sus respectivos estados constituyen la estructura del sistema. En consecuencia, éste es algo más que la suma de sus componentes, es un todo (en inglés: “a whole”; en: Naveh y Lieberman, 1984; p: 27).

Scheidegger (1987) y Haigh (1987) ponen énfasis en el significado del término sistema, dado que al reconocerlo, el análisis del mismo no se debe limitar ni al estudio estrictamente taxonómico, ni a la evaluación por separado de sus componentes, sino el de considerar el comportamiento del *conjunto* como tal.

En función del grado de conexión con el medio, los sistemas serán (Naveh y Lieberman, 1984; p: 48):

- i) Abiertos: cuando sus límites son parcialmente *permeables* permitiendo el intercambio de materia, energía o información con el medio.
- ii) Cerrados: cuando sus límites son *impermeables*, y sólo sus elementos internos están conectados entre sí.

Complementariamente, tanto Naveh y Lieberman (1984) como Haig (1987; p: 181), expresan con claridad que la estructura jerárquica es una propiedad fundamental de los sistemas. Estos autores indican que, dado este tipo de estructura, existen dentro de un sistema varios subsistemas, todos ellos ocupando diferentes posiciones dentro de la escala jerárquica general. Adicionalmente, cada subsistema es un sistema abierto, y admite un cierto número de subsistemas internos. Así, la organización del conjunto queda representada en sistemas englobados en otros mayores, que limitan su comportamiento, mientras que, por otra parte los primeros incluyen dentro de sí a otros sistemas más reducidos (“a nested series of systems within systems”, en : Haigh, 1987; p: 182).

2.1.3. Concepto de escala

Wood et al. (1988), expresaron que la generación de escurrimiento superficial es un fenómeno donde elementos tales como los suelos, la topografía, y la precipitación están caracterizados, cada uno de ellos, por su propia dimensión escalar.

El término escala hace referencia a la longitud o tiempo característico de un proceso, observación, o modelo (Blöschl, y Sivapalan, 1995; p.: 10). Así la dimensión escalar hace referencia al rango de longitudes (o tiempos) característicos del proceso o del medio analizado.

Wood et al (1988) analizaron el problema que representa la variación espacial de las propiedades hidrológicas en una cuenca y la escala en el análisis. Los mismos autores estudiaron la existencia de una longitud de escala adecuada para sintetizar, en términos de promedios, el escurrimiento generado en cada una de las subdivisiones de una cuenca hidrográfica. La Figura 2.1 recoge el concepto anterior.

Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 12) señalan la extensión de los procesos hidrológicos. Éstos se generan dentro de un amplio rango de escalas. En función de la escala espacial, abarcan desde el metro de suelo donde se genera el flujo no saturado, hasta las grandes cuencas hidrográficas, con miles de Km^2 .

De la misma forma, desde el punto de vista de la escala temporal, incluyen desde las “crecidas relámpago” (en inglés: “flash floods”) de unos cuantos minutos de duración hasta el flujo en acuíferos profundos, de cientos de años de duración (Figura 2.1).

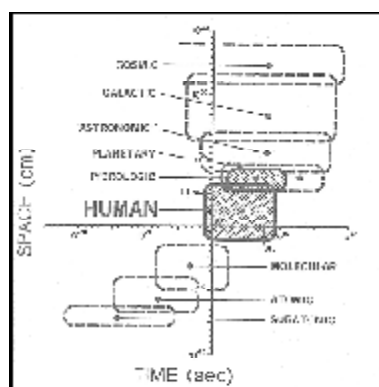


Figura 2.1: Dimensiones escalares de los procesos hidrológicos según Klemesš (1983; p.: 4)

Por otra parte, la relación escala espacial versus escala temporal indicada en la Figura 2.2 sugiere un cociente denominado por Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 12) como velocidad característica. Así, se puede estimar que para los fenómenos atmosféricos esta tasa es de 10 m/s , para el flujo en canal es de 1 m/s , y para el flujo subsuperficial es del orden de 0.1 m/s .

Gooch y Quatrocci (1997; p: 1- 6) exponen con claridad los actuales puntos de vista en la discusión respecto a la utilización del término escala en Hidrología. Estos autores indican que, pese a ser una palabra profusamente utilizada, son

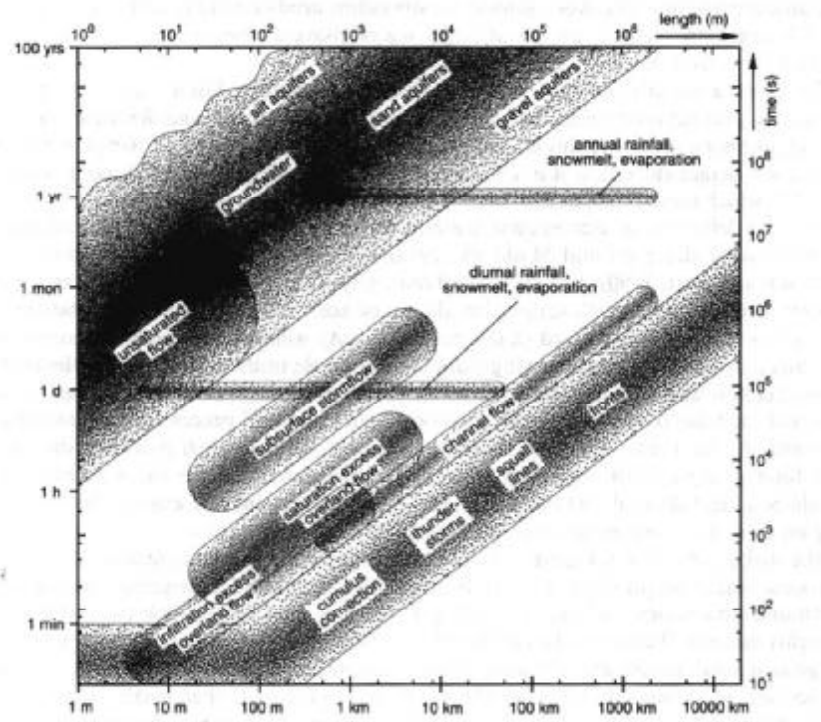


Figura 2.2: Procesos hidrológicos y su rango escalar característico (en Blöschl y Sivapalan; 1995; p.: 11).

varias sus interpretaciones ,y muchas más las indefiniciones existentes en cuanto a la forma en que es posible *generalizar* los procesos analizados, en vistas a la toma de decisiones. Así, normalmente la escala se suele utilizar para destacar:

- i) La magnitud de un estudio, en cuanto a su extensión geográfica.
- ii) El grado de detalle con que se realiza el trabajo.

En ambos casos es posible incluir o no a la *dimensión temporal*.

Así se destacan distintas percepciones de la escala, resaltando como la más tradicionalmente aceptada a la visión geográfica, en la cual está claramente establecida su definición y significado. La escala es así la relación (en inglés: “ratio”) entre las dimensiones geométricas reales medidas en el terreno y las de su correspondiente representación de escala. El modo *cartográfico* de la escala se basa en las proporciones existentes, las dimensiones métricas reales de los objetos y la de su representación gráfica (en mapas, esquemas, etc.). Es la base para la restitución geométrica desde la naturaleza a la representación gráfica y viceversa.

Existe así el concepto de *escala mínima mapeable*, la cual controla las dimensiones cartografiables *mínimas* de los elementos que pueden ser representados como componentes individuales en un mapa. Este concepto dirige la norma operativa por la cual objetos cuyas dimensiones son más pequeños que un mínimo establecido por la escala sean fundidos con otros de dimensiones mayores. La regla de generalización es así clara y objetiva. Quien sea el encargado de tomar decisiones deberá interiorizarse previamente de las dimensiones mínimas de los objetos que analiza, a fin de poder seleccionar una escala acorde con ellos.

En otras disciplinas el concepto de escala y generalización es difuso o no está estandarizado. Goodchild y Quattrocci (1997) señalan el caso de la climatología, donde la generalización de los resultados provenientes de una red pluviométrica (por citar un ejemplo) pueden ser generalizados en diferentes formas (polígonos, interpolación lineal, etc.) sin que en ninguno de los casos quede establecida una escala, como función de un criterio objetivo.

2.1.4. Heterogeneidad y anisotropía

La causa natural de la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos es la heterogeneidad y anisotropía del medio físico.

Dada una escala en particular, la variabilidad de las propiedades hidrológicas del terreno es la consecuencia de su naturaleza. Esto representa a la forma en que sus componentes (suelos, rocas, vegetación, etc.) se distribuyen sobre su superficie y subsuelo.

Actualmente es reconocida la diversidad con que se presentan distribuidas las variables que afectan la respuesta hidrológica del sistema (Rosso, 1994; p. 5). Como consecuencia, en esta última década la Hidrología ha prestado singular atención a la variación espacial de los procesos hidrológicos. En los últimos años, la particular atención brindada a los modelos hidrológicos distribuidos (Rosso, 1994; p. 18) ha puesto en evidencia una vez más este requerimiento generando la complicación adicional de:

- i) Conocer su distribución en todos y cada uno de los puntos de la cuenca.
- ii) Representar su patrón de variación en la dimensión espacial correspondiente.

En este sentido, Wood, et al. (1988), expresaron que la generación de escurrimiento superficial es un fenómeno donde elementos tales como los suelos, la topografía, y la precipitación están caracterizados, cada uno de ellos, por su propia dimensión escalar.

Conviene recordar que en esta Tesis se trata sobre las características y cualidades hidrológicas que poseen los diferentes tipos de materiales del terreno y uso del suelo, y no en analizar los cambios que se producen cuando éstos influyen entre

sí. Entonces, el análisis se dirige a los *componentes* del terreno en sí mismos. Éstos a su vez, no son el producto de una síntesis de laboratorio, sino que son el resultado de diferentes transformaciones producidas en el terreno. Considerar el comportamiento hidrológico de éstos, es abarcar un continuo de valores que fluctúa entre extremos normalmente muy distantes entre sí. En consecuencia, sea cual fuera (el) o los criterios con los cuales se agrupen diferentes materiales del terreno (o usos del suelo), éstos deben basarse en la necesidad de diferenciar en primer término las grandes fuentes de *heterogeneidad* y *anisotropía* de los mismos.

Freeze y Cherry (1979; p. 30) explican que si una determinada cualidad o característica es *dependiente* de la *posición* considerada dentro de una formación geológica, entonces dicho material es *heterogéneo*. Por otra parte, si para un *punto dado* en un material, el valor observado de una determinada cualidad o característica (por ejemplo: la conductividad hidráulica), es *independiente* de la *dirección* en la cual ésta se mida, entonces el material es *isótropo* (Freeze y Cherry, 1979; p. 32). Por el contrario, si la cualidad varía según sea la dirección en la cual se analiza, en un determinado punto de un cuerpo, éste será *anisótropo*.

El considerar la heterogeneidad y anisotropía del terreno, *aún cuando el objetivo principal sean los materiales*, se refleja en estudios *ampliamente* citados como los de Davis y De Wiest; (1971), o Freeze y Cherry (1979; Cap. 4). En todos estos casos, al analizar este tema los autores ponen especial énfasis en no tratar a los materiales como elementos aislados sino como parte de una estructura. Esto se debe a que las características y cualidades hidrológicas del terreno son dependientes de la escala a la cual se los analiza. En consecuencia, todo trabajo de clasificación y determinación de valores indicadores del comportamiento hidrológico del medio natural deberá tomar en cuenta (explícita o implícitamente) este problema.

2.1.4.1. Heterogeneidad y escalas

Singh (1995; p. 11) considera que, en Hidrología, los efectos de escala observados en los procesos están ligados a la heterogeneidad del medio.

Normalmente en el caso de la modelación en hidrología superficial, es natural dar prioridad a la solución del problema de la heterogeneidad, para luego intentar solucionar el de la isotropía. La razón de esto se encuentra en que primero es necesario conocer si los valores de un parámetro varían o no de un punto a otro del terreno, luego es necesario conocer las dimensiones de esa variación, y después saber dónde (en qué parte del terreno) se localizan estas variaciones.

La heterogeneidad se manifiesta en la naturaleza de diferentes maneras. En todos los casos, responden a la forma en que los componentes del terreno se ordenan entre sí y del grado de alteración antrópica que haya sufrido el conjunto.

Blöschl y Sivapalan (1995: p. 16-17) indican que existe una diferencia clara entre dos formas de heterogeneidad, dependiendo si su desarrollo (temporal o espacial)

describa un patrón aleatorio o no. En el mismo sentido, Wilding y Drees (1983) manifestaron que, para el caso de la edafología, la variación de los suelos en un terreno pueden agruparse en dos categorías:

- i) Las variaciones sistemáticas: son cambios graduales o marcados en función de elementos reconocibles de la realidad observada.
- ii) Las variaciones aleatorias: se refieren a aquellos cambios los cuales no pueden ser relacionados a una causa conocida.

Fuera de lo mencionado, los errores analíticos y de muestreo componen un caso a parte en el análisis.

(Wilding y Drees, 1983) expresan que, las variaciones sistemáticas están asociadas al terreno, los elementos geomórficos, los factores pedogénicos, la actividad humana o las interacciones entre los elementos antes mencionados. Los mismos autores explican como, en función de la escala de observación, los cambios diferenciales ocurridos en estos mismos elementos son los que provocan la anisotropía de los suelos, generando variaciones asociadas a la aleatoriedad del conjunto, a cambios no visibles o de naturaleza espacial o temporal no determinada. La idea de la existencia de variaciones sistemáticas y aleatorias forma parte de la investigación y procesamiento de información en diferentes áreas científicas, las cuales guardan relación con la Hidrología. Disciplinas como la Geología y la Edafología apoyan sus análisis sobre la idea de la variación espacial de los elementos que clasifican (Markewich y Cooper; 1991; Arnold y Wilding, 1991).

Cabe recordar que la presencia de aleatoriedad en el medio o en el proceso es señalada cuando no es posible predecir su presencia o comportamiento detalladamente, pero sí por medio de sus propiedades estadísticas (por ejemplo una función de densidad de probabilidad). En este sentido, Elrick y Clothier (1990) indican que la aleatoriedad está íntimamente relacionada con la escala de análisis. Así, lo que a una escala se califica como aleatorio, en otra diferente (mayor o menor) es posible diferenciar un patrón de comportamiento regular. La idea de la existencia de variaciones sistemáticas y aleatorias forma parte de la investigación y procesamiento de información en diferentes áreas científicas, las cuales guardan relación con la Hidrología. Disciplinas como la Geología y la Edafología apoyan sus análisis sobre la idea de la variación espacial de los elementos que clasifican (Markewich y Cooper; 1991).

En la naturaleza se han identificado y modelado diferentes procesos geológicos generadores de anisotropías a diferentes escalas. La sedimentología moderna, en concreto, al diferenciar procesos, formas y ambientes deposicionales (Reading, 1986, 1996; Miall, 1983, 1985, 1996; por citar algunos ejemplos), permiten identificar diferentes grados de anisotropías, conforme a diferentes escalas de análisis.

A pequeña escala se pueden identificar, por ejemplo que el grado de anisotropía del terreno se relaciona con las pequeñas estructuras sedimentarias. La Figura 2.3 (en Selley, 2000) señala lo dicho. En ésta se puede comprobar como el orden interno del material (masivo, heterogéneo, estratificado, etc) afecta a los valores de conductividad hidráulica y porosidad.

En la práctica, el análisis de una columna sedimentológica, y considerando en ella el desarrollo de las estructuras sedimentarias (diagnósticas de su origen) es posible comprobar el efecto de las mismas sobre los valores de porosidad y conductividad hidráulica.

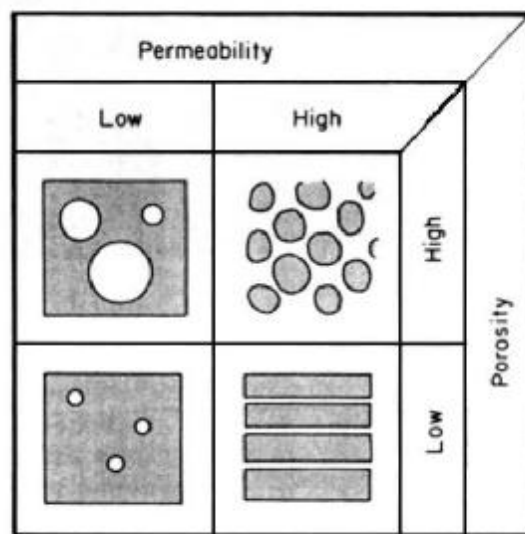


Figura 2.3: Relación entre la estructura interna del material sedimentario y la variabilidad de la conductividad hidráulica y porosidad

Los procesos naturales, por ejemplo los sedimentarios, generan estructuras características a diferentes escalas. Dentro de cada uno de ellas, pueden participar uno o más formas de transporte, donde cada uno de ellos puede ser caracterizado en función del tamaño del material sedimentario que transportan. Así, pueden observarse heterogeneidades que son características del proceso formador del terreno.

2.1.4.2. Áreas y volúmenes representativos

La uniformidad y la heterogeneidad del comportamiento hidrológico de un suelo en el campo son definidas en función de la variabilidad espacial de sus propiedades. El problema radica en que la misma definición de heterogeneidad es dependiente del volumen de muestra que se considere.

El tamaño de muestra requerido para definir la heterogeneidad en el suelo es llamada Volumen Elemental Representativo (en inglés: “REV: representative elementary volume”) o Área Elemental Representativa (en inglés: “REA: representative elementary area”). La diferencia entre REV y REA es la cantidad de dimensiones considerada (tres o dos, respectivamente) (Bear, 1972; Wood et al., 1988; Miyazaki, et al., 1993; Blöschl et al., 1995).

Wood et al (1988) estudiaron los efectos de la variabilidad espacial y la escala con implicaciones a la modelación hidrológica. La idea principal fue tratar de formar a cierta escala, alguna respuesta hidrológica media invariante o que varíe muy poco con el incremento en el área. Este umbral de escala representa a la REA, el cual será el elemento fundamental para la modelación de la cuenca. Esta área actúa como el punto discernible más pequeño que es representativo del continuo. Además, señalan que el REA es el área crítica a la cual las hipótesis implícitas pueden ser usadas sin el conocimiento de los patrones de los parámetros, aunque se pueden necesitar las hipótesis fundamentales de las distribuciones estadísticas. Incrementar el tamaño de la celda introduce heterogeneidad en la topografía y en las lluvias.

Wood et al (1988) sugieren que las diferencias entre diferentes áreas heterogéneas de la misma escala son menos importantes a escalas de 1 km^2 , para lluvia, suelo y topografía en particular. A esta escala puede ser necesario tener en cuenta la heterogeneidad interna para realizar predicciones pero sin considerar un patrón de heterogeneidad. Wood (1995) concluyen además que la topografía influye fuertemente en el tamaño de la REA.

En términos generales, a medida que el tamaño de muestra aumenta, mayor es el grado de promediación, resultando en una mayor homogeneidad. Por la otra parte, un tamaño de muestra demasiado pequeño producirá una sensación de heterogeneidad elevada, a nivel de campo (Figura 2.4, en: Miyazaki et al, 1993; p.: 226)

Una vez que el tamaño del REV o REA haya sido determinado, el valor promedio de la mediciones en él es considerada como una muestra independiente del campo, y la propiedad considerada es determinada mediante un conjunto de estas muestras.

Miyazaki et al.(1993) explican que los criterios para determinar REV generalmente son tres:

- i) El REV debe exhibir una pequeña desviación estándar entre muestras.

- ii) El REV debe ser representativa de la estructura espacial.
- iii) El REV debe proveer de un método convenientemente operativo de muestreo.

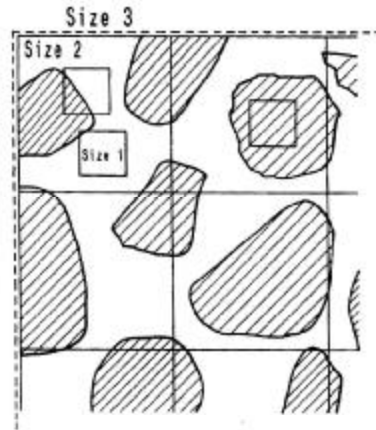


Figura 2.4: Variación del volumen de muestreo, dado un medio heterogéneo (Miyazaki, et al., 1993).

El primer criterio tiende a considerar el mayor tamaño de REV posible, para así reducir la varianza interna. El segundo procura que el tamaño de muestra sea acorde con la estructura del medio a analizar. El criterio aporta el sentido práctico necesario para poder ejecutar en la realidad el concepto de REV.

Miyazaki et al. (1993, p.: 257-263) aportan diferentes experiencias en el estudio del REV para diferentes propiedades físicas del suelo. Así, por ejemplo indica que para la determinación de la heterogeneidad en la microestructura de un suelo, el REV adecuado es de 1 cm^3 . Para el caso de la determinación de propiedades físicas como el contenido de agua en suelo y la densidad aparente, se recomiendan cilindros para la toma de muestras de 20 cm^2 de área y 100 cm^3 de volumen (Figura 2.5). Para el análisis de la conductividad hidráulica en suelos con macroporosidad, se recomiendan columnas de suelo no disturbado de 50 por 50 cm de base y 20 cm de profundidad.

En general, la experiencia de diferentes autores (citados por Miyazaki et al., 1993) indican que existe una escala general para el tamaño del REV, en relación con la dimensión del estudio a realizar. A pesar de los ya mencionados conceptos elaborados por Wood et al. (1988), en la modelización hidrológica existen opiniones que coinciden completamente con las dimensiones de la REA.

Blöschl, et al. (1995) investigaron el concepto de REV y REA empleando un sistema de pequeñas cuencas anidadas (*small nested catchments*) utilizando un modelo

hidrológico distribuido para la estimación del escurrimiento. Éstos hallaron que el tamaño de la REA depende de algunos factores tales como la duración de la tormenta, las características de los cauces y las características de la infiltración en el suelo. Los autores indican que no hay evidencias para suponer la existencia de una REA universal o un *tamaño óptimo* en el contexto de la modelación distribuida. Los autores expresaron que es más correcto pensar que existe una REA particular para cada cuenca y cada situación.

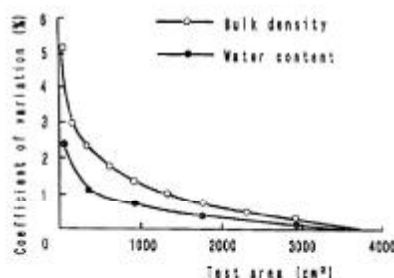


Figura 2.5: Variación de los valores medidos de densidad aparente y contenido de agua en suelos (Miyazaki et al.,1993; p.: 260)

Tamaño del REV	Objetivo
REV > 1000 m	Modelación hidrológica en cuencas
REV > 5 m	Balace de agua en terrenos afectados por grietas
REV > 0.5 m	Conductividad hidráulica de suelos con macroporos
REV > 0.05 m	Densidad aparente, contenido de agua y concentración de solutos
REV > 0.01 m	Microestructura, tamaño de poros

Cuadro 2.1: Tamaños de REV, según diferentes escalas y objetivos (Miyazaki et al.; 1993; p.. 263)

2.1.4.3. Organización y jerarquía

Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 17) señalan el término de organización como un ampliación del orden hacia formas más complejas de regularidad. La estrecha relación entre el tipo de variación (sistemática o aleatoria) y la escala de análisis sirve para completar la idea de jerarquías de variación y de análisis. La jerarquía de los cambios observados en la realidad exige límites operativos con los cuales analizar en forma práctica el problema. Estos tipos de heterogeneidad se relaciona

directamente con los conceptos de orden y desorden, mencionados por Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 16).

Considerar los procesos y la escala adecuada para obtener la información y lograr representarlos resulta, pues, crítica, tal como lo expresan Dunne (1983), Pilgrim (1983), y Wood et al. (1988). En este sentido, Singh (1995) remarca que la heterogeneidad del medio puede ser explorada a través de tres niveles:

- i) El nivel superior involucra el estudio de los elementos que dominan sobre la respuesta hidrológica del medio: clima, topografía, suelos y geología.
- ii) En un segundo nivel se encuentran los cambios, límites o discontinuidades observadas en los elementos del nivel anterior:
 - a) Límites entre diferentes tipos de suelo.
 - b) Factores geológicos como fallas, fracturas, clivajes de roca, etc.
 - c) Diferencias en la cubierta del terreno (agricultura versus bosque, por ejemplo).
- iii) El tercer nivel (aún más detallado que los anteriores) involucra ya a los factores que modifican o controlan a cada una de los procesos hidrológicos en particular; es decir a los procesos de escorrentía, intercepción, infiltración, flujo subsuperficial; etc.

Las diferencias expuestas por Singh (1995) brindan una clara idea de las jerarquías existentes dentro de la misma heterogeneidad. Se hace notar aquí que la definición acerca de las particularidades de un proceso hidrológico en especial es dependiente de las heterogeneidades del medio a un nivel superior.

El mismo caso se presenta en la geología, siendo un ejemplo que puede extenderse a otras variables del medio físico, donde puede compararse que los niveles de generalización de características, cualidades y procesos exceden la apreciación directa del ser humano.

Las diferencias manifestadas por estos autores, son la causa por la cual el medio es analizado en forma progresiva, partiendo de casos generales hasta arribar a la dimensión escalar requerida. Esta filosofía de estudio es enfáticamente expresada por Klemeš (1983) considerándola como el medio para lograr conclusiones hidrológicas fiables.

Selley (2000) (Figura 2.6) pone de manifiesto el empleo del análisis progresivo de la evidencia geológica, a partir de niveles generales hasta llegar a la particularidad microscópica. En Hidrología, los criterios son totalmente coincidentes. La Figura 2.7 lo demuestra (Blöschl y Sivapalan, 1995; p.: 16).

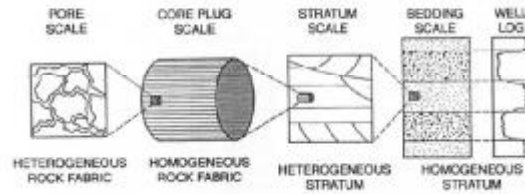


Figura 2.6: Escalas y jerarquías en sedimentología

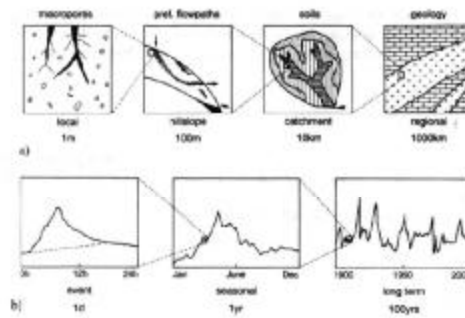


Figura 2.7: Escalas y jerarquías en Hidrología

2.1.5. Relación entre sistemas, jerarquía y escala

Como ya se analizó en puntos anteriores, queda claro que la escala afecta tanto a los componentes individuales del ciclo hidrológico como a las relaciones que puedan establecerse entre ellos. En consecuencia, estos problemas afectan directamente a la forma en que pueden interpretarse tanto las entradas como los resultados de un determinado modelo hidrológico. Independientemente de la posibilidad de poder solucionar esta dificultad de forma total o parcial, el problema en sí indica la existencia de una forma de organización mediante la cual los elementos del ciclo hidrológico son analizados. Esto es: si se toma en cuenta que la escala de un proceso/variable hidrológica es importante, es por que este/esta pueden ser estudiados con diferente grado de detalle y consecuentemente, en cada uno de estos niveles pueden observarse elementos que a otra escala no son relevantes o es

imposible considerar (por sus reducidas dimensiones, su complejidad, etc.), como lo indican Elrik y Clothier (1990).

Autores anteriormente citados como Naveh y Lieberman (1984), Haigh (1987), y Scheidegger (1987), por ejemplo; expresan que la existencia de un *orden* jerárquico permite que sus componentes se relacionen entre sí. Este orden permite que exista un determinado número de principios que gobiernen el comportamiento del conjunto, tanto interna como externamente. Estos principios se transmiten a través de la estructura a cada uno de los subsistemas. La transmisión de información, materia o energía entre subsistemas depende de la estructura jerárquica, por lo cual ésta última hace a la escala con la cual es posible analizar al sistema, subsistema o elemento particular de éste (Haigh, 1987; p: 188 - 189). Ésta es la interrelación entre escala y jerarquía, señalada por Goochild y Quattrocchi (1997; p: 3).

La relación entre sistema, jerarquía y escala pueden ejemplificarse si se toma en cuenta cómo han sido explotados estos conceptos en el ámbito de las ciencias naturales desde el punto de vista cartográfico, uno de los casos en que la escala está claramente definida.

Aquí, el concepto de mayor peso es el de escala, en un sentido estricto. La jerarquía de los elementos se desarrolla en dependencia de la escala. Así, un elemento que abarca a otros jerárquicamente inferiores puede ser representado en distintas escalas, mientras que los segundos sólo podrán distinguirse del anterior si la escala de representación es la adecuada. En esta línea se desarrollaron las estrategias de toma de muestra y análisis fisiográfico organizado, tales como los sistemas australianos, ingleses, la cartografía de suelos y la cartografía geológica.

Queda así expuesta el núcleo conceptual con la cual desarrollar la tarea de analizar paramétricamente el comportamiento hidrológico del terreno.

2.1.6. Concepto de interacción

La interacción es un término que como tal ha sido profusamente mencionado en la literatura referida al medio natural en general, y al hidrológico en particular.

Basándose en lo descrito por Steele (1967) y Claver (1991) en el presente trabajo, la interacción se define como la influencia simultánea de dos o más variables, las cuales a través de dos o más características afectan al comportamiento que se observa en una o más cualidades en particular. En consecuencia, si uno de los elementos es afectado, todos los demás también mostrarán algún grado de perturbación, debido a las mutuas influencias que los relacionan.

En particular, la relación de escalas e interacciones ha sido destacada por Klemeš (1983), señalando que los fenómenos hidrológicos son el resultado de múltiples interacciones de factores ambientales, cada uno de los cuales expresado en diferentes escalas.

Así, se considera que una cualidad es el resultado del estado y comportamiento de un conjunto de características, las cuales (tanto cualidades como características) pertenecen a una o más variables. En consecuencia, al considerar la existencia de un sistema y de su estructura jerárquica, se desprende que existe una relación de interdependencia funcional de las características y cualidades y, en consecuencia, de las variables del medio físico.

En este sentido, Naveh y Lieberman (1984; p: 28) definen que un sistema interactivo es una clase especial de sistema donde sus elementos están conectados entre sí por influencias mutuas y directas. De la misma forma, Haig (1987; p: 181) indica en forma directa que un sistema es un conjunto estructurado de interacciones, las cuales son reconocidas para el propósito de una investigación.

En Hidrología, Klemeš (1983) discute respecto a las diferentes escalas empleadas en la naturaleza para describir procesos físicos y elaborar conclusiones. Su discusión guarda estrecha relación con lo anteriormente citado. Este autor expresa que un elemento, en una determinada escala, surge a partir de la interacción de un amplio número de elementos situados a un nivel inferior. En consecuencia, aquellas conclusiones elaboradas en un alto nivel expresan los promedios o integran a los elementos que dominan en los niveles inferiores a ésta. A continuación se exponen los diferentes modos con que se analizan la geología, cubierta vegetal, y usos del suelo, la geomorfología y la edafología. El orden en que éstas son mencionadas responde al grado de generalización e interdependencias que frecuentemente se mencionan en la bibliografía.

Finalmente, cabe destacar que el concepto de interacción es propio del marco en el cual se analiza el comportamiento de un sistema, dada una determinada escala.

2.2. Los modelos en Hidrología

Tal como ya ha sido expuesto, la modelación se enfrenta con la problemática provocada por las dificultades humanas en la observación del proceso. La ciencia actual cuenta con medios suficientes para observar sólo una pequeña fracción del proceso. Por contrapartida, los fines prácticos hacen necesario extrapolar esas observaciones a una escala de mayor interés, en tiempos y espacios diferentes a los de la observación. Los modelos son los encargados de realizar esta tarea. El fin es poder estimar un suceso futuro, sus dimensiones y su desarrollo, en una situación hipotética y futura.

Adicionalmente, existen modelos diseñados específicamente para servir de herramienta en la investigación científica, expresando de modo formal el conocimiento que se posee del proceso.

2.2.1. Concepto de modelos y modelación

Para evaluar la respuesta hidrológica de un sistema, normalmente es necesario la elaboración de algún tipo de abstracción o esquema, por medio del cual representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: *un modelo* (Singh, 1988; p. 9). El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros (por ejemplo: Singh, 1988, Chow, et al., 1994; p.: 7).

Un modelo es entendido como una expresión formal de las relaciones entre las entidades definidas en términos matemáticos o físicos. Directamente referido a esto último, Moore et al. (1993) expresaron que las demandas sobre los modelos hidrológicos se han incrementado considerablemente en tiempos recientes. Señalan que (pp.: 7) “..actualmente existe el requerimiento adicional de técnicas simples, con las cuales asistir a la gestión corriente de recursos naturales”.

Grayson et al. (1992) exponen que existen dos razones para el desarrollo de un modelo. La primera es entender el sistema físico que provee un marco de datos, es la prueba de una hipótesis. La segunda es proporcionar una herramienta de predicción. Ambos propósitos no deben confundirse, pues el primero de ellos se puede satisfacer con un ajuste empírico, pero el segundo requiere un modelo que tenga *experimentación extensiva* y *conocimiento* para producir adecuadamente una salida particular para ciertas condiciones bien definidas. Así, es posible que el modelo pueda producir respuestas para otras condiciones con alguna confianza.

El uso real de los modelos es asistir en el análisis de datos, probar hipótesis en conjunto con estudios de campo, mejorar nuestro entendimiento de los procesos y su interacción e identificar áreas de pobre entendimiento en nuestro proceso de descripción.

2.2.2. Tipos de modelos

Existen en la literatura diferentes criterios para clasificar a los modelos hidrológicos, entre ellos destacan Clarke (1973); O’Connell (1991), Wheeler et al. (1993) y Singh (1995).

Blöschl y Sivapalan (1995) destacan que, ante todo, los modelos se diseñan básicamente para dos objetivos: *predictivos* o *cognoscitivos*. En el primer caso, su utilidad será la de dar una respuesta concreta a un problema específico. En caso contrario, el modelo se utilizará como *herramienta de experimentación*, con el fin de comprender mejor el fenómeno hidrológico (tal como en la presente Tesis).

2.2.2.1. Modelos determinísticos y estocásticos

A partir de lo anterior, la clasificación de los modelos hidrológicos sigue dos criterios básicos: el *grado de detalle* con que analiza el terreno y si se toma en cuenta o no

la *aleatoriedad* del fenómeno. Esta diferenciación fue expuesta por Kite (1997; p.: 237 - 239) y Refsgaard (1997; p.: 69 - 70), entre otros.

Desde el punto de vista de tener o no en cuenta a la *aleatoriedad* del sistema, los modelos pueden ser: *estocásticos o determinísticos*. Los primeros son básicamente propuestas matemáticas sin base física, cuyos resultados son al menos parcialmente aleatorios (Chow et.al.; 1994; p 10). Por el contrario, los modelos determinísticos no consideran a la aleatoriedad; una entrada dada produce siempre una misma salida. Según el caso a tratar, serán necesarios los modelos *determinísticos o estocásticos*.

De acuerdo a lo anterior, cuando la aleatoriedad del sistema es *alta* (por ejemplo: la precipitación diaria) es conveniente un modelo estocástico. Si la aleatoriedad es *baja*, (por ejemplo la infiltración en un punto del terreno), lo más aconsejable será un modelo determinístico. Por su parte, los modelos determinísticos pueden o no estar completamente basados en *principios físicos*. En el primer caso serán los *modelos de base física*. De lo contrario serán conocidos como *modelos conceptuales*.

2.2.2.2. Modelos de base física y modelos conceptuales

Los modelos de base física son aquellos en los cuales su formulación se realiza de acuerdo a los principios y leyes físicas que rigen el transporte del agua en la atmósfera, en la superficie del terreno y a través de un medio poroso. Por el contrario, los modelos conceptuales no se encuentran atados a la estructura formal del conocimiento y elabora sus propias funciones de transferencia, tratando de producir una mímica del proceso hidrológico.

El límite que separa a los modelos físicos de los conceptuales es al menos *discutible* en hidrología superficial, ya que por lo general los modelos existentes en el mercado son una mezcla de ambos tipos.

Por otra parte, aunque se dispone de los elementos matemáticos necesarios para la implementación de modelos matemáticos físicamente basados, éstos requieren muchísima información; la mayor parte de ella no se encuentra disponible ó es muy costosa. Adicionalmente exigen rutinas complejas con gran cantidad de parámetros, ya que la realidad es heterogénea y las ecuaciones matemáticas no incluyen estas heterogeneidades. Finalmente, este tipo de modelos son costosos en cuanto a tiempo, almacenamiento y manejo de la información dentro del ordenador.

Otro problema de los modelos físicamente basados es que su desarrollo no es dinámico, son a menudo desarrollados aisladamente o probados sólo para garantizar su precisión y en ocasiones se pierde el objetivo inicial, siendo utilizados en situaciones diferentes para las cuales fueron creados. Además, el número de parámetros es a menudo tal que la mayoría se hacen constantes y pocos son variables porque algunos de ellos no son obtenidos.

2.2.2.3. Modelos agregados y distribuidos

La modelación puede desarrollarse sobre una pequeña porción del terreno, tal como una parcela experimental, o sobre un territorio que abarque muchos kilómetros cuadrados de superficie. En consecuencia, el grado de desagregación espacial toma importancia, al considerar la forma en que la *variabilidad espacial* del proceso hidrológico va a influenciar en la modelación.

Si se toma en cuenta a la cuenca hidrográfica como *unidad*, entonces se trata de una *modelación agregada* (*lumped models*). En este tipo de modelos, el sistema es promediado en el espacio, o considerado como un punto único sin dimensiones. Suelen ser de utilidad cuando es necesario obtener simular o predecir el hidrograma de salida o el caudal pico de una cuenca, con fines de diseño y en pequeñas obras hidráulicas. Ejemplo típico de un modelo agregado conceptual es el Standford Watershed Model (Crawford y Linsley; 1966).

Existe también la posibilidad de que el modelo analice el comportamiento hidrológico de la cuenca como la *respuesta integrada* de los *i-ésimos elementos* en que se puede dividir a ésta. A la separación de la cuenca en diferentes elementos se lo conoce como *desagregación espacial*. Si la desagregación se realiza segmentando a la cuenca en *n* celdas regulares, el modelo es *distribuido*. Si, en cambio, la partición se realiza por medio de *unidades territoriales* (por ejemplo las subcuencas de una cuenca hidrográfica la modelación será *pseudo-distribuida*.

A pesar de las controversias lógicas, a medida que avanza el tiempo, aumenta el interés y el consenso respecto a las ventajas de la modelación distribuida. Mientras la modelación agregada responde a *cuánto* caudal se obtiene a partir de una cierta lluvia, la modelación distribuida agrega a lo anterior, la respuesta respecto a *dónde* se produce la escorrentía, acercando al usuario a responder el *porqué* del fenómeno.

La modelación hidrológica distribuida ha sido el punto de interés de la comunidad científica en los últimos años debido a que no se dispone de un marco matemático que explique satisfactoriamente el comportamiento del flujo dentro de la cuenca, siendo la modelación distribuida una de las herramientas para la estimación y predicción de eventos de crecida. Las ventajas que presenta la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada consiste fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos. Adicionalmente, la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para lograr un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela, aunque en ocasiones requiere de información detallada de la zona de estudio. Este tipo de información día a día se encuentra más a disposición gracias al desarrollo que en los últimos años han tenido los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos.

Al menos uno de los primeros esbozos de un modelo distribuido de base física

fue el propuesto por Freeze y Harlan, en 1969. A partir del mismo se desarrollaron códigos más completos, como el SHE (Abbott et al.; 1986a y 1996b; Bathurst, 1986a y 1986b; Bathurst et al. 1995.), el THALES (Grayson et al.; 1992). El caso más notorio de un modelo distribuido conceptual es el TOPMODEL (Beven et al.; 1995). En España, Francés y Benito (1995) obtuvieron buenos resultados, en una cuenca mediterránea, con alta variabilidad espacial de suelos y materiales aflorantes. Estos autores, analizaron los resultados de modelación hidrológica distribuida y agregada en el mismo caso, y encontraron diferencias favorables a la primera de éstas. Asimismo el CEDEX, cuenta con un modelo distribuido continuo de paso mensual, para el cálculo y gestión de recursos hídricos (Ruiz, 1998). Recientemente, en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, de la Universidad Politécnica de Valencia se desarrolló un modelo hidrológico distribuido conceptual, *TETIS* (Francés et al., 2002; Vélez, et al., 2002), el cual será utilizado en esta Tesis como herramienta para la simulación hidrológica.

Es necesario recordar que, los modelos agregados, ya sea conceptuales o de base física, están diseñados para dar una respuesta (*caudal*) en el punto de salida de la cuenca hidrográfica. En cambio, los modelos distribuidos permiten obtener resultados de cada una de las variables de estado que controla (caudal, humedad del suelo, nivel piezométrico, etc.) en cada uno de los puntos de la red de modelación, en cada intervalo de tiempo modelado.

Directamente relacionado con lo anterior, se encuentra el tema de la *no estacionaridad* en las condiciones hidrológicas del terreno. Esto es: el cambio en el balance hidrológico y en los valores de abstracción del agua precipitada, debida a variaciones en la configuración del terreno, usualmente debido a modificaciones en la cubierta del suelo. Los modelos agregados sólo pueden señalar cambios en el uso del suelo cuando éstos sean lo suficientemente significativos como para modificar el valor de alguno de sus parámetros. En cambio, la respuesta hidrológica del terreno, en relación al cambio en el patrón de distribución de la cubierta del suelo es posible de ser analizado *sólo* mediante modelos distribuidos. Esto último fue ya destacado por Abbott et al. (1986a y 1986b), y Bathurst et al. (1995).

En síntesis: la modelación distribuida pone de relieve el cambio del comportamiento hidrológico del terreno (infiltración, generación de escorrentía, etc.) de un punto a otro del mismo. En otras palabras, se puede expresar que la modelación hidrológica destaca la variabilidad espacial de los parámetros de modelación que caracterizan del terreno.

Debe tenerse en cuenta que la discusión acerca de los resultados obtenidos con modelos distribuidos o agregados está afectada por diversos factores, tales como el tipo de modelo utilizado, el caso particular estudiado y el grado de variabilidad propia del medio físico y del proceso hidrológico.

Existen numerosos ejemplos que señalan los beneficios de tener en cuenta la variabilidad espacial de la respuesta hidrológica del terreno. Refsgaard (1997) lo de-

muestra, agregando al análisis los resultados de la modelación pseudo-distribuida.

2.2.3. Parámetros de modelación

Los parámetros de modelación son aquellas variables y/o constantes numéricas que son utilizadas por un modelo matemático para reproducir un proceso hidrológico. El valor numérico de cada una de ellas caracteriza al sistema analizado, siendo necesarios para ajustarlo a la realidad observada.

Los parámetros caracterizan a un sistema, son necesarios para ajustar un modelo hidrológico a la realidad observada. En términos generales, los parámetros pueden o no permanecer constantes en el tiempo (Singh, 1988). Sin embargo los referidos al medio físico (tales como los vinculados con la litología y los suelos) son comúnmente considerados como temporalmente constantes.

Los parámetros pueden o no tener un significado físico. En el primer caso, la modelación exige trabajar con valores tales como conductividad hidráulica, el almacenamiento hídrico del suelo, etc. En el segundo caso se trata de valores cuyo significado tiene sentido solamente dentro de la ecuación a la que pertenece, y dentro del modelo en el que fue desarrollado. Normalmente, se procura relacionar a estos valores con una o más variables físicas, a fin de explicar con mayor claridad el fenómeno.

Beven (1989) menciona que los modelos distribuidos físicamente basados sufren los mismos problemas de los modelos agregados conceptuales, pero en *diferente* grado. La observación de los datos mencionada anteriormente, y la que trata el tema de la parametrización cuando se efectúa simulación hace difícil cualquier proceso de la optimización.

Cabe recordar que es el investigador quien define cuales parámetros son más sensibles y cuales se determinan *a priori*. La valoración de la relación existente entre los parámetros, los cuales varían en función del tipo de suelo, del tipo de vegetación, etc., hace que se reduzca el número de éstos. Asimismo, las condiciones iniciales que son introducidas al modelo sufren de estos mismos problemas.

2.2.3.1. Calibración y validación

Primero es necesario ajustar el funcionamiento del modelo para que su respuesta sea similar a la observada en los datos. Esto es la *calibración*. Una vez calibrado, el modelo debe estar en condiciones de reproducir el proceso hidrológico observado en otros datos, diferentes de los utilizados en la calibración. Esto es la validación. Calibrar un modelo hidrológico implica obtener un *conjunto finito* de valores para sus parámetros, tal que permita reproducir de forma aceptable un conjunto de eventos hidrológicos, previamente medidos. Si el modelo está correctamente calibrado, será posible reproducir otros eventos diferentes a los utilizados en la calibración, sin necesidad de cambiar el valor de las variables de modelación.

Haan et al. (1982; p. 447) y Sorooshian y Gupta (1996), exponen que para lograr el ajuste de un modelo matemático, el valor de los parámetros puede ser obtenido, en parte o totalmente, a partir de:

- i) Mediciones directas tomadas en el medio a modelar (área de la cuenca, fracción impermeable del terreno, etc.).
- ii) Técnicas estadísticas, de optimización, etc., que permitan el ajuste del modelo, sin estar necesariamente basados en observaciones directas (normalmente conocido como: calibración automática).

Haan et al. (1982) señalan que, a medida que aumenta la sofisticación de los modelos y la relación entre los parámetros y las características de la cuenca se hacen menos conocidas, la influencia de la calibración aumenta. En cualquiera de los casos, es imprescindible conocer acabadamente *cuál* es el comportamiento hidrológico del suelo concretamente en el espacio de terreno a modelar. De lo contrario, la simulación corre el peligro de ser realizada sobre la base de parámetro con valores absurdos o difíciles de explicar.

Respecto a los parámetros Refsgaard (1997; p. 71) expone que:

- a) Los parámetros seleccionados deben estar relacionados mayoritariamente con datos de campo. Esto implica la existencia de un mínimo de elementos a calibrar.
- b) Que la relación entre datos y parámetros sea clara y objetiva.
- c) Que la calibración de aquellos elementos que lo requieran se haga:
 - en función de criterios prácticos.
 - basados en una metodología específica.
 - tomando en cuenta intervalos de orden físico.

Bakensiek y Rawls (1989), para el caso particular de la infiltración, expresan la necesidad estudiar nuevas formas con las cuales obtener los parámetros de un modelo. En este sentido, ya en los trabajos de Warric (1983), Naney et al. (1983) y Rawls y Brakensiek (1983), se habían expuesto algunas conclusiones respecto a la interrelación existente entre los parámetros de los modelos de infiltración, y de distintos métodos para predecirlos, en función de la información disponible. La búsqueda de respuestas en este tema no es exclusiva del campo de la infiltración, sino que forma parte de la discusión en la literatura corriente dedicada a temas hidrológicos aplicados (por ejemplo: Ponce, 1989; Reid, 1981; Chow, et al.,

1994). Particularmente, en esta actividad, se necesita caracterizar a una cuenca hidrográfica, desde la perspectiva del diseño hidrológico ¹.

En los últimos años, la particular atención brindada a los modelos hidrológicos distribuidos (Rosso, 1994; p. 18) ha puesto en evidencia una vez más este requerimiento generando la complicación adicional de:

- a) Conocer su distribución en todos y cada uno de los puntos de la cuenca.
- b) Representar su patrón de variación en la dimensión espacial correspondiente

Esto pone en evidencia una realidad que, mediante la modelación agregada, fue soslayada :las propiedades hidrológicas de una cuenca varían de un punto a otro de la misma. Ésta se convierte en un problema a la hora de la modelación distribuida, porque es necesario asignar un *valor concreto a cada parámetro*, en *cada celda* de modelación. La causa de este problema se encuentra en la naturaleza del medio físico donde se halla la cuenca hidrográfica.

Los problemas que saca a la luz la modelación distribuida se traducen necesariamente en problemas operativos. Claramente ahora existe la necesidad de obtener en forma operativa los valores de los parámetros de modelación, y su patrón de distribución en el terreno (Figura 2.8).

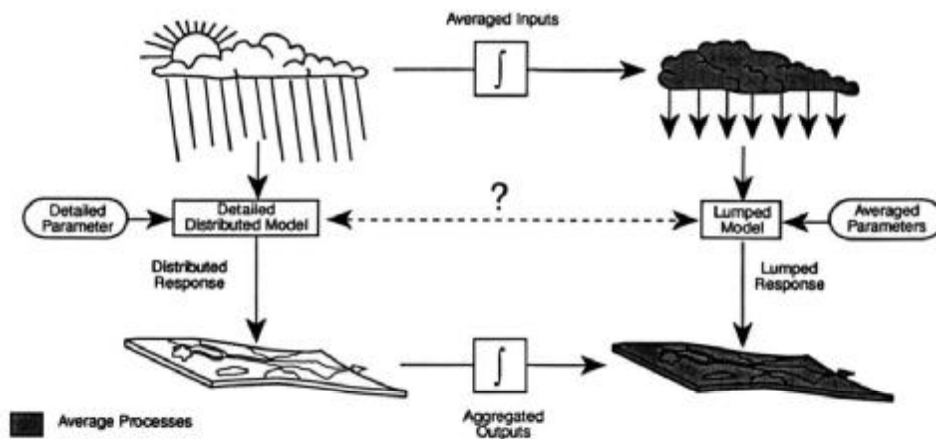


Figura 2.8: Modelación agregada y distribuida. Agregación y Escala. En: Wood 1995; p.: 4)

¹Se entiende como diseño hidrológico al proceso de evaluación del impacto de los eventos hidrológicos en un sistema de recursos hidráulicos. Esto incluye el hecho de seleccionar los valores de las variables más importantes del sistema, de modo tal que éste se comporte en la forma más adecuada a los fines considerados (Chow, et. al; 1994; p. 427).

2.2.3.2. Parametrización y modelos

Una de las mayores debilidades de la actual modelación hidrológica es la parametrización del terreno. Este problema tiene su origen en el hecho que el terreno es variable espacialmente, de naturaleza compleja y cuyo comportamiento y evolución temporal y espacial está relacionada a las múltiples interacciones entre los elementos que lo componen.

Ante un problema concreto a resolver, el procedimiento más sencillo a la vista es el de emplear modelos conceptuales agregados, utilizando valores promedios para los parámetros. Este procedimiento puede dar resultados razonables, a costa de perder explicación respecto de la relación existente entre los procesos hidrológicos y la variabilidad del paisaje, lo cual puede convertirse en una desventaja ya que tal variabilidad puede afectar la sensibilidad del cálculo.

Si la alternativa seleccionada, en vez de la agregada conceptual, es la correspondiente a un modelo de base física y distribuido, como el SHE (Bathrust, 1986a y 1986b), se obtiene una mayor precisión en los resultados, a costa de una fuerte limitación operacional, debido a las múltiples limitaciones de la formulación físico-matemática y la necesidad de una parametrización extensiva e intensiva al mismo tiempo.

Al respecto, Beven (1989) argumentaba que las ecuaciones presentes en los modelos físicamente basados habían sido formuladas sobre la base de los fenómenos físicos observados y analizados a una escala de gran detalle. La formulación de estos procesos se basan, a su vez en que los procesos se desarrollan en idealizados medios homogéneos e isótropos. La diferencia de estas condiciones ambientales respecto a las condiciones de observación y análisis de cualquier modelo hidrológico distribuido convencional son evidentes. A consecuencia de todos estos problemas, Beven (1989) indica que es necesario adaptar la física de detalle y definición puntual a la escala de la modelación por medio de la agregación; el problema que se presenta es que no existe un marco de conocimiento adecuado para llevar a cabo este proceso. En consecuencia, se suele asumir que las ecuaciones físicas de pequeña escala podrán ser aplicadas a la escala de modelación son los parámetros originales, lo cual representa en sí mismo un salto conceptual.

Queda claro que los modelos distribuidos de base física se fundamentan en la descripción determinística de los procesos hidrológicos. Esta afirmación es factible de realizar en un laboratorio, a escalas de alto detalle, pero es violada en la escala de modelación hidrológica. En la práctica, los modelos distribuidos físicamente basados pierden su sentido original, y son de hecho modelos agregados conceptuales, y sujetos a las mismas desventajas que estos últimos.

En consecuencia, a partir de las apreciaciones de los autores mencionados en este apartado, es posible señalar la necesidad de obtener en forma operativa parámetros hidrológicos con los cuales ajustar modelos. Tal acción obliga, necesariamente a

“cambiar ideas” (Beven, 1989) y desarrollar conceptos más realistas (Grayson, et al.; 1992). Esto último conduce, a su vez a que la modelación y su parametrización esté fundamentalmente relacionada a los elementos observables de una cuenca hidrográfica.

2.3. La modelación hidrológica y el medio a modelar

2.3.1. El terreno visto como sistema

Luego de conocer el concepto y significado de los sistemas, es necesario contemplar la posibilidad de que éstos existan en el medio natural.

En las ciencias de la tierra se ha puesto gran énfasis en el estudio particular de diferentes aspectos del medio natural. Así se han desarrollado los sistemas taxonómicos aplicados a describir y clasificar los tipos mitológicos, botánicos, geomórficos, edáficos, etc. Sin embargo, ante la necesidad de interpretar objetivamente un fenómeno físico particular (tal como la generación de escorrentía, o la probabilidad con la cual una determinada porción de territorio será afectado por una crecida), se hace necesario avanzar en el análisis integrado de éstos. En otras palabras: analizar la existencia y naturaleza de las relaciones mutuas entre los objetos que anteriormente fueron clasificados, como una forma de explicar el estado y el comportamiento actual de medio natural.

Considerar el concepto de sistema, y poner en práctica un esquema de razonamiento acorde con éste, es un medio más acertado. Las deducciones pueden partir tanto desde el punto de vista intuitivo, como cualitativo, pero su fin último es el de arribar a un resultado concreto y factible de ser expresado en términos formales.

2.3.1.1. Los sistemas en la morfología del terreno

El terreno, en el cual se desarrolla una cuenca hidrográfica, está formado por diferentes elementos. Éstos han sido tradicionalmente analizados bajo diferentes grados de detalle. Así es ya clásico escuchar que los elementos del terreno son los diferentes rasgos estructurales detectados en él, las laderas y los segmentos de pendientes, los cauces de diferente orden de magnitud y orden topológico, las series de suelos, los distintos grupos litológicos y vegetales observables, etc. Estos elementos se relacionan entre sí. La evidencia de esto es, desde el punto interés hidrológico, las manifestaciones morfológicas del terreno (las geoformas, incluyendo frecuentemente a la cubierta vegetal) y el funcionamiento del terreno ante los impulsos generados por fuerzas externas a él (por ejemplo: el clima y la generación de escorrentía). La actividad humana también forma parte tanto en las manifestaciones morfológicas, como en la respuesta del terreno.

La idea por la cual la manifestación externa del terreno o alguna de sus respuestas físicas no sea causa exclusiva de la presencia o ausencia de un elemento en articular, sino que es el resultado de la acción conjunta de varios de éstos, conduce directamente a la conclusión de que el terreno es, en sí mismo, un sistema interactivo (Scheidegger, 1987).

Por otra parte, ya en 1924, Davis (en Scheidegger, 1987) analiza la naturaleza dinámica del paisaje. Sin entrar a valorar detalladamente la actual “validez” de cada uno de sus dichos, se debe rescatar el núcleo de su idea: que el paisaje evoluciona (desde la “juventud” hasta la “madurez”, según Davis, (en Scheidegger, 1987) en respuesta a los impulsos procedentes de las fuerzas que actúan sobre él (levantamientos orogénicos, erosión, transporte, depositación de sedimentos, etc.). Por lo dicho, se agrega ahora la idea que el terreno también es un sistema dinámico.

2.3.1.2. Los sistemas en los suelos

En el mismo sentido que lo anterior, el suelo es un sistema, el cual está incluido del terreno, que es el sistema mayor que lo contiene. Como el resto del terreno, el suelo es un sistema a abierto y dinámico (Buol, et al., 1989; Naveh y Lieberman, 1984). Dentro del suelo considerando a éste como un conjunto, también se desarrollan *subsistemas*. El suelo se integra al paisaje por medio de asociaciones de suelos, las cuales forman parte de la configuración tridimensional del paisaje. Dentro de cada unidad existen uno o más cuerpos de suelo, los cuales son agrupaciones de pedones. Dentro de cada pedón existen horizontes y dentro de cada horizonte existe un sistema que incluye al esqueleto del suelo, plasma, biota y fluidos. Los suelos evolucionan junto con el paisaje (Buol, 1989) logrando alcanzar un cierto grado de equilibrio con el mismo, por lo cual el suelo, en su conjunto es un sistema dinámico.

2.3.1.3. Los sistemas y la cubierta vegetal

Según Kent y Coker (1994; p: 1) la vegetación es una parte del ecosistema. La vegetación puede ser estudiada mediante la exploración detallada del rol que ésta cumple dentro del ecosistema al cual pertenece. El concepto de la existencia de “sistemas dentro de sistemas”, es sumamente importante en el estudio de la vegetación (Kent y Coker; 1994; p: 13). Estos autores señalan, que cada nivel de un ecosistema es un sub sistema dentro de la biosfera. Así, cada uno de éstos ocupa un área progresivamente más pequeña en el espacio, a medida que se desciende en la escala jerárquica global.

El terreno interactúa con el sistema biótico, del cual recibe impulsos mediante los cuales la superficie y subsuperficie están sujetas a constantes procesos de nacimiento, desarrollo y extinción de especies vegetales. El terreno contiene numerosos factores ambientales, los cuales actúan como limitantes a su desarrollo y evolución (Kent y Coker, 1994). Así la cubierta vegetal del terreno varía y evoluciona en

Nivel de detalle	Ecosistema	Forma de la vegetación
Bajo	Biosfera Bioma mundial Ecosistemas regionales Ecosistemas locales	Toda la cubierta vegetal Formaciones vegetales mundiales Tipos de vegetación Comunidades de plantas
Alto	Organismos aislados / sistemas de habitats	Poblaciones de especies de plantas e individuos de una especie

Cuadro 2.2: Escalas en la vegetación

parte por la capacidad limitante del terreno al desarrollo de ciertas y determinadas especies, por ser éstas las que mejor toleran sus condiciones (tipos de suelo, relieve, disponibilidad hídrica, etc).

Adicionalmente, el papel de la dimensión temporal en el desarrollo de las comunidades de plantas pone de manifiesto la evolución de éstas en función de sucesiones primarias, secundarias y clímax.

En consecuencia, las opiniones de Kent y Coker (1994), Naveh y Lieberman (1984), indican claramente que la cubierta de plantas también es un sistema dinámico, abierto e interactivo.

2.3.2. Variabilidad espacial y problemas de modelación

Cuando se habla de variabilidad espacial se hace referencia a la manera en que cambian los valores de los parámetros hidrológicos modelados o (utilizados para modelar) a través del espacio de modelación (cuenca, región, etc.).

Las experiencias de laboratorio y de campo indican a las claras la complejidad de la realidad en lo que respecta a los patrones de flujo de fluidos en el suelo. A fin de tratar con claridad los temas referentes a este punto, se expone a continuación una reseña de los problemas y beneficios que provoca el uso de información de campo, obtenida a través de la toma de muestras puntuales.

2.3.2.1. Teoría vs. práctica

En la práctica hidrológica, es reconocida la dificultad de estimación de aquellos parámetros provenientes del medio físico real. A lo largo del desarrollo de las técnicas hidrológicas se han ensayado diferentes formas de resolver este problema.

Así, por ejemplo, desde la parametrización de la infiltración en un punto propuesta por Horton (1942a y 1942b), hasta el método elaborado por el SCS (1964), o el propuesto en España por el MOPU (1990) han sido mucha la experiencia adquirida en el tema. La misma se refleja en las publicaciones de diferentes autores, los

cuales expresan (implícita o explícitamente) las dificultades que pueden hallarse al analizar un caso real de la naturaleza. Así, cada uno de los diferentes autores destacan el distinto número de elementos que influyen en el comportamiento hidrológico del terreno, en función de identificar el sistema hidrológico, o aplicar uno u otro método hidrológico en particular.

En el amplio conjunto de las expresiones generadas al respecto de este tema, existe un grupo de elementos coincidentes. En todos los casos posibles de ser estudiados, independientemente del método a utilizar, es necesario :

- i) Un conocimiento previo del terreno, que incluye necesariamente la delimitación del terreno y la estimación de los procesos hidrológicos a ser analizados.
- ii) Considerar un criterio determinado para la toma de valores puntuales, mediante muestras, mediciones o estimaciones de los parámetros de interés.
- iii) Considerar un criterio para establecer el grado al cual son generalizables los valores puntuales antes obtenidos (unidades cartográficas, unidades taxonómicas, etc.).

Aún en modelos agregados, de base conceptual, y con numerosos parámetros a calibrar en forma automática, tales elementos de análisis permanecen vigentes hasta la actualidad. El avance de los estudios hidrológicos en dirección a los modelos hidrológicos distribuidos agrega nuevos elementos de conflicto al problema: se debe tomar en cuenta la distribución espacial de los parámetros extraídos del medio físico (Rosso, 1994).

2.3.2.2. Casos generales vs. casos particulares

Así como los modelos están diseñados (o ensamblados) en función de la situación que se quiere analizar, las cualidades del terreno varían de un punto a otro, y de una región a otra. En ambos casos, las diferencias entre los conceptos generales y los resultados reales dependen del caso particular que se analiza.

La experiencia previa de la Hidrología señala la *tendencia o deriva general sistemática*, alrededor de la cual se encuentran los casos particulares (cada una de las cuencas o unidades hidrológicas en particular), a los cuales se planea elaborar y calibrar en un esquema de funcionamiento. El modelo así diseñado deberá entonces reproducir el comportamiento particular del terreno analizado, en este caso: el hidrológico.

El conocimiento previo del tema permite evaluar cual es el comportamiento general esperable de ciertas cualidades, cuando se cumplen las condiciones de borde consideradas como normales. En este caso, la información previa que se posee del terreno permite adelantar cuales serán las variables más destacadas en el ambiente.

Asimismo, es posible especular cuál es la influencia de estas variables, sus relaciones entre sí y su vínculo con las cualidades que se desea estimar o medir, (por ejemplo: permeabilidad saturada, capacidad de almacenamiento hídrico total de un suelo, tasa de infiltración final de un terreno, etc.).

Los ya apuntados conocimientos generales fueron elaborados a partir del estudio de casos particulares, y sus resultados fueron generalizados a partir de ser comprobados en diferentes ocasiones, en distintos terrenos de una forma análoga a la calibración y validación de un modelo actual, por parte de numerosos autores. A fin de continuar con esta trayectoria del conocimiento hidrológico, es de esperar que los resultados obtenidos por medio del esfuerzo adicional que implica el análisis de un aspecto particular del problema hidrológico cumpla las siguientes condiciones:

- i) Aporten precisiones respecto al entendimiento y predicción de las cualidades analizadas en cada caso y situación.
- ii) Tales conocimientos deben ser asimilables a los conceptos generales, confirmándolos o proponiendo modificaciones a los mismos.

En síntesis, resulta necesario que el estudio de los casos particulares tenga conexión directa en cuanto a concepto y resultados, con lo que ya se conoce del tema. Es decir: que se logre una explicación adicional a la que ya se poseía del fenómeno que se estudia.

2.3.3. Escalas de observación y de modelación. Problemas de escala

Idealmente, la observación y la modelación debería realizarse en la misma escala (o próximo a ella) que la del proceso que se pretende simular.

En Hidrología esto es prácticamente imposible ya que, como se ha señalado anteriormente, la observación de este tipo de fenómenos en toda su magnitud sobrepasa el rango de observación humano (Figura 2.1).

Beven (1989) menciona que debe tenerse en cuenta la necesidad de una teoría de agrupamiento de procesos de subescala, para una correspondencia más cercana en escala entre modelos de simulación y un proceso del mundo real; y para una evaluación rigurosa de la incertidumbre del modelo en sí mismo. Se debe escoger adecuadamente el modelo para la aplicación apropiada. Para la estimación de crecidas se ha encontrado que los procesos físicos involucrados más importantes son la lluvia y la escorrentía, por lo tanto se ha generalizado en la literatura el término lluvia-escorrentía. Por lo tanto, el estudio de las crecidas se centra básicamente en analizar los fenómenos de producción y traslación de escorrentía.

El concepto de escala afecta también a la definición de los modelos. Los modelos no son de aplicación universal. Beven (1989) resalta que los modelos desarrollan la

física de los procesos a pequeña escala sobre sistemas homogéneos y este desarrollo es aplicado al modelo que trabaja a un nivel superior de generalización, el cual es representada, por ejemplo, por una celda, realizando un agrupamiento de las variables sin tener en cuenta la física del proceso en la nueva situación. Asimismo, Grayson et al (1992 a y 1992b) mencionan que los procesos que son modelados, pueden ser agrupados en unidades homogéneas en alguna escala; los algoritmos y parámetros usados para definir los subprocesos son apropiados a la escala de la unidad homogénea.

Klemeš (1983) señala que las diferentes escalas donde se definen los procesos físicos están interconectadas entre sí, tanto en forma espacial como temporal. Este autor enfatiza las dimensiones escalares dentro de las cuales se definen los procesos hidrológicos, comparándola con la escala de apreciación humana (Figura 2.1). Así pone de manifiesto que estos tipos de procesos no son comúnmente apreciables en términos sensoriales, sino que se encuentran a un nivel superior, el cual ocasionalmente puede superponerse.

Klemeš, en 1983 ya indicaba que los procesos hidrológicos ocupaban ocho órdenes de magnitud, en el espacio y en el tiempo, destacando las limitaciones para la observación humana de los mismos (Figura 2.1). Desde la redacción del mencionado artículo hasta el presente, la tecnología aplicada al estudio hidrológico y del medio físico ha mejorado notablemente. Actualmente es posible analizar hidrológicamente a una escala espacial de hasta 20 m., con intervalos temporales de hasta 5 minutos.

Singh (1995; p. 11) pone de manifiesto la trascendencia del concepto de escala en la definición de procesos hidrológicos. La variabilidad aumenta junto con la escala del análisis. Así, a una escala pequeña ² ésta es pequeña, pudiendo ser descrita y modelada en términos generales. A una escala grande³ la variabilidad es evidente y domina a la observación. Éstas son las diferencias que marcan los contrastes entre las observaciones de un laboratorio, por una parte, y las que, en el otro extremo, pueden realizarse en el contexto continental. El caso de los suelos también sirve de ejemplo.

Elrick, y Clothier (1990) señalaron las numerosas dificultades que provoca la heterogeneidad del medio físico, al intentar trasladar los resultados y teorías obtenidas mediante experimentos de laboratorio. Ellos expresaron que (p. 94), existen diferentes escalas a considerar:

- a) La escala del medio en el cual se quiere representar, en base a una determinada propiedad física.

²Este término simboliza un reducido nivel de detalle en el análisis, implicando un alto nivel de generalización de lo observado. Su equivalente cartográfica corresponde a un denominador de escala numéricamente grande (por ejemplo: 1:2.000.000; el denominador de escala es : 2.000.000).

³Este término simboliza un alto nivel de detalle en el análisis, implicando un bajo nivel de generalización de lo observado. Su equivalente cartográfica corresponde a un denominador de escala numéricamente pequeño (por ejemplo: 1:200; el denominador de escala es : 200).

- b) El tamaño (área, volumen) dentro del cual puede considerarse que el valor de la propiedad seleccionada representa su valor medio.
- c) La longitud de escala a la cual la medición de esta propiedad puede ser considerada como representativa del conjunto analizado.

Singh (1995) señala que los modelos hidrológicos utilizan parámetros para representar a la cuenca como un todo, una unidad. Por el contrario, los valores de los parámetros correspondientes a esta unidad son tomados a partir de muestras. A su vez, las muestras provienen de distintos emplazamientos puntuales en los cuales la medición o estimación es efectivamente realizada. La diferencia entre el origen de los valores y la utilización de los mismos es la causante de diversos problemas, conocidos como problemas de escala (Blöschl y Sivapalan; 1995; p.: 10).

Los problemas de escala se encuentran en la práctica los cuales expresan en función del grado de sensibilidad de los modelos a la heterogeneidad del medio. El origen se encuentra en los inconvenientes que implica la transferencia de valores de los parámetros a través de las diferentes escalas; desde la real hasta la del modelo. A esta operación se la conoce como “scaling” (Blöschl y Sivapalan; 1995; p.: 10). A continuación se detalla más el significado de este término.

2.3.3.1. Scaling, upscaling y downscaling

El término *scaling* significa la tranferencia de información a través de diferentes escalas. (Figura 2.9)

Dada $g\{s; \theta; i\}$ que representa a una cierta conceptualización a *pequeña escala* de la respuesta hidrológica del terreno como una función de ciertas variables de estado s , parámetros θ e *inputs* i . Dada también $G\{S; \Theta; I\}$ la correspondiente descripción del fenómeno a gran escala, entonces el proceso de scaling se puede representar como el paso de una escala a otra de dichas funciones de estado, parámetros e *inputs*:

$$g \longleftrightarrow G \quad \theta \longleftrightarrow \Theta \quad i \longleftrightarrow I$$

$$g\{s; \theta; i\} \longleftrightarrow G\{S; \Theta; I\}$$

En la práctica, sin embargo, sólo una parte de la información es escalada, mientras que el resto se asumen como correctas en ambas escalas. Resulta claro que lo dicho no es estrictamente correcto. El problema surge cuando el valore del parámetro Θ no posee el mismo significado que θ , aunque se trate de la misma variable. Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 18) señalan como ejemplo que resulta difícil (cuando no imposible) el definir un término de gradiente hidráulico a gran escala, en un suelo no saturado y estructurado.

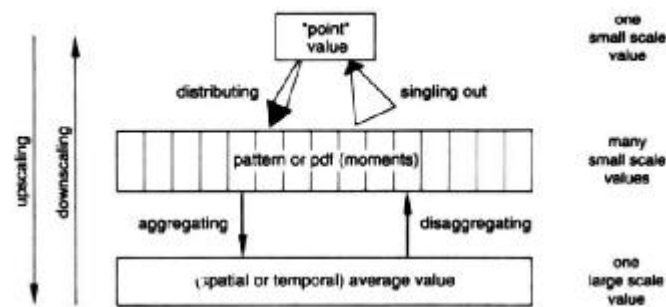


Figura 2.9: Concepto de scaling, upscaling y downscaling, según Blöschl y Sivapalan (1995, p.: 18)

El término *upscaling* significa el paso de la información desde una fuente puntual a pequeña escala (gran detalle) a un valor definido a gran escala (pequeño detalle). El paso inverso es conocido como *downscaling* e implica la distribución de un valor medio definido a gran escala en un determinado patrón definido a menor escala.

Normalmente, el proceso de upscaling implica dos etapas. En la primera se procede a distribuir el valor puntual (pluviométrica, por ejemplo) a pequeña escala sobre todo el espacio analizado. La segunda etapa consiste en la agregación de los valores distribuidos. De modo contrario el downscaling consiste en desagregar un valor global y distribuirlo a una escala de mayor detalle.

El proceso del scaling puede llevarse a cabo de forma *determinística* o *estocástica*. Blöschl y Sivapalan (1995; p.: 18-19) indican que la estructura estocástica es útil cuando el patrón de distribución (espacial o temporal) de la información a escalar es poco conocido. Por otra parte, la estructura determinística en el scaling permite capturar la organización natural del terreno.

2.3.3.2. Scaling y modelación

Lo expresado anteriormente se relaciona directamente con la modelación y con las diferencias observadas entre la alternativa distribuida o agregada. Independientemente si los parámetros tienen o no sentido físico, la discusión se orienta hacia las conveniencias teóricas y operativas de los modelos agregados o distribuidos, en función de la disponibilidad de información y los procesos de scaling necesarios.

Los modelos agregados han sido ampliamente aceptados por permitir al usuario ingresar un solo valor para cada parámetro. Así, mediante el juicio de los expertos o un rápido examen del terreno se pueden obtener los valores iniciales para una calibración. En el caso de modelos agregados, la opción mencionada es la alternativa más recurrida; tal alternativa tiene la ventaja de poder incorporar la información

no sistemática y criterios accesorios, importantes para el proceso a describir. Particularmente, cuando se poseen valores puntuales escasos, el juicio de un experto es, en sí mismo, la representación heurística de un proceso de upscaling. Sin embargo existen alternativas de mayor proceso analítico, sobre todo cartográfico, como el propuesto por el SCS (1964) por medio del cual se logra sintetizar en un valor medio la variabilidad espacial de los valores de Curva Número.

En la modelación pseudo-distribuida es necesario prestar mayor atención al medio, ya que es necesario obtener una mayor cantidad de valores. Será necesario dedicar más tiempo y esfuerzo que en el caso de la modelación agregada. Sin embargo, esta tarea sigue siendo lo suficientemente sencilla como para no requerir mucho más trabajo que el necesario en el caso de un modelo agregado. Todo depende, en última instancia, del tamaño de la cuenca y del grado de subdivisión deseado. De todas maneras, si se parte de datos puntuales, sigue siendo necesario un proceso de upscaling para agregar valores y asignarlos a áreas grandes de una cuenca. El juicio de un experto sigue teniendo valor, aunque es necesario el desarrollo de un procedimiento mediante GIS, bases de datos, etc. concreto para asignar valores a una n cantidad de unidades de modelación.

La diferencia más clara se observa en el caso de la modelación distribuida. Aquí existe la dificultad concreta de distribuir el valor de los parámetros, tanto en el caso de modelos físicamente basados, como en los puramente conceptuales. Este problema existe independientemente si los parámetros poseen o no base física, y si la grilla de modelación es gruesa o no. En ambos casos es necesario alcanzar un conocimiento del medio lo suficientemente profundo como para poder establecer los criterios de distribución de los parámetros. Lo dicho implica por una parte conocer el valor de cada uno de los parámetros en cada punto del terreno a modelar, para lo cual es necesario tener en cuenta cuál es el patrón o estructura de variación de los mismos de un punto respecto a los que lo rodean. La modelación distribuida exige un análisis del medio previo a la modelación, y un conocimiento del grado de incertidumbre con que se trabaja, tanto en los valores de los parámetros como en su distribución espacial.

En el caso de la modelación distribuida es necesario distribuir valores a lo largo de una malla regular que abarca todo el terreno a analizar. El criterio de distribución puede ser una simple interpolación a partir de valores puntuales o, según el caso, puede ser necesario algún procedimiento diferente de upscaling. La distribución puede partir de información más gruesa, con lo cual será necesario desarrollar un procedimiento de downscaling.

Los procedimientos de distribución de la información, upscaling o downscaling indican, *a priori*, que será necesario atender a la organización propia de la cuenca. El grado de exigencia de los modelos distribuidos ha provocado que en la mayoría de los casos sólo hayan sido utilizados en cuencas hidrográficas experimentales, donde se posee una excepcional oportunidad para poder hacerlos operativos. Esto

es: campañas de muestreo intensivas y/o cuencas de reducido tamaño.

El estudio de mayor cantidad de casos y situaciones hidrológicas se ve influenciado, entre otras cosas, por las dificultades señaladas anteriormente. Así, su mejora y su utilización generalizada dista mucho de ser una realidad.

Las técnicas de scaling, junto con las nuevas necesidades provocadas por la aparición de la modelación distribuida obligan a revisar la forma en que se analiza y procesa la información en Hidrología, es decir, su tratamiento.

2.4. Referencias

- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell y J. Rasmussen** . *An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87, 45 - 59. (1986a)
- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell y J. Rasmussen** *An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, 'SHE', 2: Structure of a physically-based distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87, 61-77. (1986b).
- Arnold, R. W. Y Wilding, L. P.** *The need to quantify spatial Variability*. En: **Mausbach M. J. y Wilding; L. P.** *Spatial Variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication n° 28; pp. 9 - 24. Soil Science Society of America, Inc., USA. 1991.
- Bathurst, J. C.** *Physically-based distribute modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Europeen*. Journal of Hydrology, 87, 79 - 102. 8. 1986a
- Bathurst, J. C.** *Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an upland catchment*. Journal of Hydrology, 87, 103 - 123. 1986b
- Bathurst, J. C, J. M. Wicks y P. E. O'Connell** *The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system*. En: **Singh, V. P. (Ed.)** *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. USA, 1995.
- Bear, J.** *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications. USA, 1972.
- Beven , K.** *Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models*. Journal of Hydrology, 105, p 157-172, 1989.
- Beven, K.J., R. Lamb, P. Quinn, R. Romanowicz y J. Freer** *TOPMODEL*. En:**Sing, V. P. (Ed.)** *Computer Models of Watershed Hydrology* . Water Resources Publications. USA, 1995.
- Blöschl, G.; Grayson, R. B. y Sivapalan, M.** *On the representative elementary area (REA) concept and its utility for distributed rainfall-runoff modelling*. En: **Kalma, J. D. y Sivapalan, M. (Eds.)** *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley, p.: 71-88. UK, 1995.

- Blöschl, G. y Sivapalan, M.** *Scale issues in hydrological modelling: a review* En: **Kalma, J. D. y Sivapalan, M. (Eds.)** *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley, p.: 71-48. UK, 1995.
- Brakensiek, D. L. y Rawls, W. J.** *Infiltration research needs in watershed hydrology*. Transactions of the ASAE, Vol. 32 (2): 633 - 637. 1989.
- Buol, S. W.; Hole, F. D. Y Mc. Cracken, R. J.** *Soil Genesis and Classification. Third Edition*. Iowa State University Press. USA, 1989.
- Chow, V. T. Maidment, D. R. y Mays, L. W.** *Hidrología aplicada*. Mc Graw - Hill; Colombia. 1994.
- Clarke, R. T.** *A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use*. Journal of Hydrology 19: 1-20. 1973.
- Claver, I. (Coored.)**. *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología. Tercera Edición*. Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente; Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid. 1991.
- Crawford, N. H. y Linsley, R. S.** *Digital simulation in hydrology. The Standford Watershed Model IV*. Technical Report N° 39, Department of Civil Engineering, Sandford University. USA; 1966.
- Davis, S N. y De Wiest, R. J. M.** *Hidrogeología*. Ariel. España, 1971.
- Dunne, T.** *Relation of field studies and modelling in the prediction of storm runoff*. Journal of Hydrology v 65; n° 1/3; pp. 25 - 48. 1983.
- Elrick, D. E. y Clothier, B. E.** *Solute transport and leaching*. En: **Stewart, B. A. y Nielsen, D. R. (Eds.)**. *Irrigation of Agricultural Crops*. American Asoc. of Agronomy; Crop Sci. Soc. of Am. and Soil Sci. Soc. of Am.; Agronomy Series N° 30. 1990.
- Francés, F. y J. Benito.** *La modelación distribuida con pocos parámetros*. Ingeniería del Agua, 2(4), 7 - 24. España, 1995.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A.** *Groundwater*. Prentice Hall. USA; 1979.
- Freeze, R. A. y Harlan, R. L.** *Blueprint for a physically based digitally - simulated hydrologic response model*. Journal of Hydrology, 9, p.: 237 - 258. 1969.
- Francés, F, Vélez, J, Vélez, I y Puricelli, M.** *Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain*. 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. USA; 2002.
- Goodchild, F y Quattrochi, D.(Eds.)** *Scale in remote sensing and GIS*. Lewis. USA; 1997.
- Grayson, R. B.; I. D. Moore; T. A. McMahon.** *Physically based hydrologic modelling. 1. Terrain-based Model for investigative purposes*. Water Resources Research, Vol 26, no 10, p 2639-2658, 1992
- Grayson, R. B.; Moore, I. d. y McMahon, T. A.** *Physically - based hydrologic modelling: 2. Is the concept realistic?..* Water Resources Research, 26, p.: 2659-2666. 1992
- Grayson, R. B., G. Blöschl y I. D. Moore** *Distributed parameter hydrologic*

- modelling using vector elevation data: THALES and TAPES-C*. En: **Singh, V. P. (Ed.)** *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. USA, 1995.
- Haan, C. T., Johnson, H. P. y Brakensiek, D. L.** *Hydrologic Modelling of Small Watersheds*. ASAE Monograph N°5. USA, 1982.
- Haigh, M. J.** *The Holon: Hierarchy theory and landscape research..* Catena Supplement 10; p.: 181-192. 1987.
- Horton, R. E.** *A simplified method of determining the constants in the infiltration-capacity equation*. American Geophysical Union, Transactions, 23; pp.: 575 - 577. 1942a.
- Kent, M. y Cooker, P.** *Vegetation description and analysis: A practical approach*. John Wiley and Sons. UK; 1994
- Kite, G. W.** *The SLURP Model*. En: **Singh, V. P. (Ed.)** *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. USA, 1995.
- Klemeš, V.** *Conceptualization and scale in hydrology*. Journal of Hydrology, 65; pp.1 - 23. 1983.
- McBratney, A. B. y Odeh, I.O.A.** *Application of fuzzy sets in soil science; fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions*. Geoderma 77, p.: 85-114. 1997.
- Markewich, H. W.; Cooper; S. C.** *One perspective on spatial variability in geologic mapping*. En : **Mausbach M. J. y Wilding; L. P.** *Spatial Variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication n° 28; pp. 25 - 38. Soil Science Society of America, Inc., USA. 1991.
- Miall, A. D.** *Analysis of fluvial depositional systems*. American Association of Petroleum Geologist. Tulsa, 1983.
- Miall, A. D.** *Principles of sedimentary basin analysis*. Springer, New York, 1985.
- Miall, A. D.** *The geology of fluvial deposits : sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer. Berlín, 1996.
- Miyazaki, T.; Hasegawa, S. y Kasubuchi, T.** *Water Flow in Soils*. Marcel Dekker, Inc. USA, 1993.
- Moore, I. D.; Grayson, R. B. y Ladson, A. R.** *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications*. En: **Beven, K. J. y Moore, I. D.** *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology*. John Wiley and Sons, pp. 7 - 34. Norfolk. 1993.
- MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo).** *Drenaje Superficial. Instrucción 5.2 - IC; Carreteras*. Madrid, 1990.
- Naveh, Z. y Lieberman, A. S.** *Landscape ecology : Theory and application*. Springer. USA; 1984.
- Naney, J. W.; Ahuja, L. R. y Barnes, B. B.** *Variability and interrelation of soil - Water and some related soil properties*. American Society of Agricultural Engineering, Advances in Infiltration. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration; pp. 92 - 101. USA. 1983.
- O'Connel, P. E.** *A historical perspective*. En: **Bowles D. S. y O'Connel. P.**

- E. (Eds.).** *Recent Advances in the Modelling of Hydrologic systems*. Kluwer; pp.: 3-30. 1991.
- Ponce, V. M.** *Engineering Hydrology, Principles and Practices*. Prentice Hall. USA, 1989.
- Rawls, W. J. y Brakensiek, D. L.** *A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters*. American Society of Agricultural Engineering, Advances in Infiltration. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration; pp. 102 - 112. USA. 1983.
- Reading, H. G. (Ed.)** *Sedimentary environments and facies 2nd. Ed.* Blackwell, Oxford, 1986.
- Reading, H. G. (Ed.)** *Sedimentary environments : processes, facies and stratigraphy 3rd Ed.* Blackwell Science, Oxford, 1996.
- Refsgaard, J. C.** *Parameterizations, calibration and validation of distributed hydrological models*. Journal of Hydrology, nº 198; pp. 69 - 97. 1997.
- Reid, E. H.** *Rangeland Hydrology*. Soc. for Range Management; Range Series Nº 1, second Edition. USA, 1981.
- Rosso, R.** *An introduction to spatially distributed modelling of basin response*. En: **Roso, Peano, A, Becci, I y Bemporad, G. A. (Ed.)**. *Advances in Distributed Hydrology*. Water Resources Publications; p: 3 - 30. USA. 1994.
- Ruiz, J. M.** *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual - Distribuido de simulación continua Integrado con un Sistema de Información Geográfica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. España, 1998.
- Scheidegger, A. E..** *The fundamental principles of landscape evolution*. Catena supplement 10; p.: 199-210. 1987.
- Selley, R. C..** *Applied sedimentology*. Academic Press. 2000.
- Singh, V. P.** *Hydrologic Systems* Prentice - Hall. 1988.
- Singh, V. P. (Ed.)** *Computer models of watershed hydrology* Water Resources Publications. USA; 1995.
- Sorooshian, S. y Gupta, H. v.** *Automatic calibration of conceptual rainfall - runoff models: Sensitivity to calibration data..* Journal of Hydrology, 181 (1); p.: 23-48. 1996.
- Soil Conservation Service** *Hydrology. Part I: Watershed Planning*. U.S. Department of Agriculture, National Engineering Handbook; Sec. 4. 1964.
- Steele, G. J..** *Soil Survey Interpretation and its Use*. FAO, Soils Bulletin nº 8, Roma. 1967.
- Stein, A.; Staritsky, I. G.; Bouma, J., Van Eijnsbergen, a. C. y Bregt, A. K..** *Simulation of moisture deficits and areal interpolation by universal cokrigging*. Water resources Research, vol 27, nº 8: 1693-1973. 1991.
- Vélez, J, Vélez, I, Puricelli, M. y Francés, F.** *Hydrological simulation of floods events at large basins using distributed modelling*. Congreso: European Geophysical Society, Session HSA5.01. Contribution EGS02-A-05594. Geophysical Research abstracts. European Geophysical Society. vol 4; 27 th General Assembly.

Niza, 2002. ISSN: 1029-7006. Francia 2002.

Warric, A. W. *Parameters in infiltration equations*. American Society of Agricultural Engineering: Advances in Infiltration. Proceedings of the National Conference on Advances in Infiltration; pp. 69 - 81. USA. 1983.

Wheater, H. s.; Jakeman, A. J.; Beck, M. B. y McAlleer M. J. (Eds.) *Modelling Change in Environmental Systems*. Willey,pp.: 101-132. UK,1993.

Wilding, L. P. y Drees, L. R. *Spatial variability and pedology*. En: **Wilding, L. P.; Smeck, N. E. y Hall, G. F. (Eds.)**. *Paedogenesis and soil taxonomy. I Concepts and Interactions*. Elsevier Science Publishers; p. 83 - 116. The Netherlands. 1983.

Wood, E. F.; Sivapalan, M, Beven, K y Band, L. *Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling*. Journal of Hydrology, 102, p.: 29-47. 1988.

Wood, E. F. *Scaling behavior of hydrological fluxes and variables: empirical studies using a hydrological model and remote sensing data*. En: **Kalma, J. D. y Sivapalan, M. (Eds.)** *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley, p.: 89-104. UK, 1995.

Zonneveld, I. S. *The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications* Landscape Ecology, vol. 3(2); p.: 67-86. 1989.

Capítulo 3

Una base conceptual

Dada la necesidad concreta de contar con un esquema que permita *explicar* y *predecir* el comportamiento hidrológico del terreno a partir del análisis de ciertos parámetros físicos, se hace necesario *distinguir* y *organizar* un conjunto de ideas que hagan del trabajo una labor *organizada, objetiva y operativa*.

En este capítulo se propone un conjunto de conceptos referidos directamente a la forma de analizar el problema de la parametrización de modelos hidrológicos distribuidos a partir de la información disponible. Tal base se construye a partir de la comprensión de cuál es el origen de la información disponible, de cómo fue elaborada, de cuáles son sus componentes y de cuáles son sus ventajas y sus limitaciones. Sólo a partir de comprender el origen de la información es posible interpretarla de forma correcta, y sólo a partir de tal base conceptual es posible concebir la forma de procesamiento de la información disponible, así como su eventual ampliación.

Ya fue señalado que el estudio de una cuenca hidrográfica se lleva a cabo a fin de resolver el valor de los parámetros (al menos parte de ellos) de un modelo en particular. A este trabajo se lo denomina comúnmente como *caracterización de una cuenca*. Esta tarea está mencionada en la literatura corriente como una etapa necesariamente previa a la obtención de resultados analíticos (por ejemplo: Chow, et al., 1994; SCS, 1964; Ponce, 1989; Reid, 1981; en España: MOPU, 1990 y Ferrer, 1993). En forma genérica, para caracterizar a una cuenca hidrográfica, es necesario conocer:

- i) El patrón o forma con el cual se distribuyen elementos tales como la topografía, la red de drenaje, los suelos, la litología, la cubierta vegetal y uso del suelo¹.etc. (Rosso, 1994):

¹En vista de su valor conceptual, en este documento se hace referencia a la cubierta vegetal, como la vegetación natural que cubre la superficie del terreno. El uso de la tierra, en cambio se relaciona con la forma y tipo de actividad con la cual el hombre modifica el terreno (por ejemplo: urbanización, cultivos, etc.). Más adelante, en esta Tesis se analizará la forma en la cual ambos conceptos pueden ser unificados.

- ii) La forma en que las *propiedades*² de éstos afectan a la respuesta hidrológica de la cuenca (retención superficial, condiciones de encharcamiento, etc.).
- iii) El valor de los parámetros que caracterizan a cada una de las propiedades antes mencionadas (permeabilidad, almacenamiento hídrico, etc.).
- iv) En una tarea aparte se encuentra la necesidad de comprobar la existencia y tipo de vínculos entre los diferentes componentes del terreno; a fin de poder extrapolar³ aquellos valores de los cuales no se cuenta con información suficiente.

En síntesis, “caracterizar hidrológicamente una cuenca” implica considerar a sus componentes de la cuenca hidrográfica, si éstos son o no homogéneos en todo el territorio analizado y cuál es el efecto hidrológico que provocan.

3.1. Información, datos y modelación

El análisis hidrológico en sistemas naturales se basa en dos elementos clave: la distinción entre información y datos y la forma en que ambos son obtenidos a partir de la realidad observable.

3.1.1. Los parámetros de modelación, los datos y la información

Los valores de los parámetros de modelación se basan en los datos utilizados para el desarrollo del modelo; especialmente para su calibración y validación. Así, el éxito en la modelación (el grado de acierto y precisión) depende tanto del modelo como de los datos con los que se alimenta.

Normalmente, los *datos* son considerados como elementos aislados entre sí, y su significado radica en el valor del resultado que representan.

Sin embargo, Meijerink et al. (1994) y Erdas (1994, p: 332 - 333) indican que éstos se vinculan entre sí por medio del conocimiento que está asociado a ellos, completando así a la *información*. A cada punto conocido del sector analizado se asocian uno o más propiedades, consideradas de importancia para el procesamiento de los datos. La *experiencia científica y profesional* asociada a uno o más datos, permite relacionar a estos con otros elementos del terreno y facilitar la interpretación

²Normalmente se asume que cada uno de los elementos considerados son componentes del sistema, donde cada elemento posee ciertas propiedades que le son propias y de éstas depende su comportamiento hidrológico.

³La extrapolación, según Westman (1985; p. 18) implica obtener un valor desconocido (por ejemplo: un valor en el tiempo futuro), a partir de los elementos conocidos y la tendencia que éstos señalan.

conjunta de los mismos. La experiencia proviene de los resultados obtenidos en estudios similares en el área de trabajo u otra similar, la experiencia en el medio, el criterio profesional aplicado en ese caso etc. En otros casos, es la capacidad de relación, la disposición para generar y procesar información, la que permite inferir o estimar valores concretos para los parámetros de modelación. Éstos valores podrán entonces ser utilizados como datos por el modelo.

Un modelo hidrológico se calibra en función de la información que se posea del terreno. A partir de este punto, el término información llevará el significado que se acaba de expresar, siendo uno de los puntos críticos de esta tesis.

3.1.2. Diferencia entre dato e información

El término *información*, según Meijerink, et al. (1994) y Erdas (1994, pp: 332 - 333), considera a los datos no sólo como elementos aislados, sino que se incluye el *conocimiento* asociado a éstos. Así, a cada punto conocido del sector analizado se asocian uno o más propiedades consideradas de importancia para el procesamiento de los datos. La distinción puesta de manifiesto, indica que existe en forma simultánea:

- i) la *posibilidad* de obtener y/o ampliar los medios de trabajo, mediante la transformación de los datos en información, y
- ii) la *incógnita* de: cuáles son las fuentes disponibles, y cómo aprovecharlas convenientemente.

Los hechos señalados indican la potencial existencia de una alta variedad en la cantidad y calidad de datos, conocimientos y, consecuentemente, de la información posible de ser utilizada y/o producida.

3.1.3. Estructura de la información

Este punto trata respecto a las componentes de la información con que normalmente se cuenta al inicio de un proyecto. Tal información servirá de guía para la elaboración de las tendencias generales en la caracterización de una cuenca y los posteriores avances metodológicos respecto al análisis y evaluación de parámetros hidrológicos.

En vistas a mantener un lenguaje común en el análisis metodológico, se tomaron en cuenta las propuestas dadas por Steele (1967) y Claver (1991). Según ellos, los elementos que componen la información son:

- i) *Variables*: con las cuales definir distintas áreas de la información.

- ii) *Características*: consideradas como atributos simples de cada variable, los cuales están sujetos a ser medidos o estimados.
- iii) *Cualidades*: definidos como atributos complejos asociados a un proceso determinado, y resultantes de la acción del medio físico sobre las características de las variables analizadas. Éstas pueden ser expresadas tanto en términos cualitativos como cuantitativos (Steele, 1967; p. 4).

La definición de variable expuesta por estos autores da sentido a diferenciar, dentro de un sistema, a los diversos elementos que lo componen. Cada uno de éstos toman diferentes valores según la escala temporal y/o espacial, coincidiendo con la definición brindada por Singh (1988; p. 8). Una variable es, entonces, el nivel generalizador en la distinción de la heterogeneidad del medio analizado.

VARIABLES son la litología, los suelos, la vegetación, etc.

Las características de la variable suelos son, por ejemplo, textura, contenido de materia orgánica, resistencia a la compresión, etc. los cuales forman parte de una variable y representan *cuantitativamente* la variabilidad interna que éstas encierran.

Por último, las cualidades representan la parte de la información que es necesario obtener a fin de obtener el valor y dimensión de un determinado parámetro hidrológico. Por ejemplo, algunas de las cualidades de la variable suelo son la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento superficial, etc.

En consecuencia, al relacionar para una misma variable, características y cualidades, se logra representar, tanto cualitativa como cuantitativamente, lo que en términos generales se menciona comúnmente como las “propiedades o atributos de los elementos componentes de la cuenca hidrográfica”.

A continuación se presenta una breve síntesis de las variables, características y cualidades analizadas en el estudio del medio físico, donde las variables sean: la geología, la cubierta vegetal y el uso del suelo, la geomorfología y la edafología.

3.1.4. Representación de la información

Las cualidades y características de una variable pueden ser expresadas según diferentes medios. Westman (1985; pp.139 - 141) expone una clara discusión del tema. Este autor señala que, en la evaluación de medios naturales, son comunes cuatro tipos diferentes de representación:

- i) Nominal: la cual tiene por función la de clasificar objetos, tales como la numeración de una secuencia de muestreo, o las diferentes especies de árboles presentes en el terreno.
- ii) Ordinal: su función es la de ordenar objetos según una escala de valores, por ejemplo la densidad de fracturación de un afloramiento, en una escala

porcentual que va desde el 0% al 100% de fracturación. Otro ejemplo el ordenamiento cualitativo (bajo, medio y alto).

- iii) Por intervalos: al igual que el anterior, es utilizado para ordenar objetos siguiendo una escala de valores determinada. A diferencia del anterior, el ordenamiento se efectúa según categorías igualmente espaciadas a lo largo de la escala.
- iv) Mediante proporciones o “ratios”: representan la proporción de un objeto respecto de un patrón de medidas.

Las manipulaciones matemáticas, particularmente las estadísticas, que son factibles en cada tipo mencionado, son diferentes (Westman 1985). Este autor indica que la suma, multiplicación, cociente, resta o promedio de valores ordinales y nominales carecen de sentido numérico. En ninguno de los casos, la estadística paramétrica es posible. De ambos, sólo los ordinales pueden ser evaluados mediante técnicas no paramétricas.

En el caso de valores expresados por intervalos o mediante ratios, pueden ser promediados, pudiendo también ser transformados linealmente. Las diferencias entre los valores expresados por intervalos pueden ser sumadas, multiplicadas, divididas o restadas. Los valores que expresen relaciones admiten todas las operaciones matemáticas. Tanto los valores por intervalos como ratios pueden ser analizados mediante técnicas de estadística paramétrica.

En síntesis, cabe dejar constancia de las formas más comunes de expresión numérica de cualidades y características, en resguardo de la consistencia necesaria que éstos deben mantener en los análisis posteriores.

3.2. La definición del medio a analizar

Una vez establecido para el medio físico las diferencias entre distintos tipos de variaciones, comprobado las componentes de la información y su relación escalar, es preciso establecer cuales son los posibles caminos para su análisis.

Una vez reconocido que el terreno es la manifestaciones física de un *sistema abierto, dinámico e interactivo*, corresponde la interpretación del mismo en forma coherente con tal observación.

A continuación se expone las sucesivas aproximaciones propuestas por diferentes autores con el fin de analizar la información en función de las variables que la componen, sus cualidades y características.

3.2.1. Principios básicos

3.2.1.1. Génesis y evolución del paisaje

Tal como se pudo apreciar en puntos anteriores, los sistemas se ordenan según una estructura jerárquica, donde cada uno de sus elementos está afectado por un conjunto de *normas* o *leyes*, las cuales rigen su comportamiento. Éstas hacen a la casuística del sistema. En este sentido, Scheidegger (1987) elabora una interesante síntesis del tema, proponiendo a tal efecto cuatro *principios básicos* sobre los cuales conviene razonar. Tales son:

- i) El principio de antagonismo, por el cual el paisaje actual es el resultado del efecto conjunto de dos tipos de procesos: *endógenos*⁴ y *exógenos*⁵.
- ii) El principio de la inestabilidad, por el cual Scheidegger (1987) estima que el equilibrio dinámico que caracteriza al paisaje es inestable, debido a que las formas del terreno tienden a no permanecer constantes en el tiempo y espacio, sino a cambiar a partir de una morfología inicial.
- iii) El principio de catena, el cual está directamente relacionado con el anterior. Este concepto, original de la Edafología, es extendido por Scheidegger (1987) al análisis de elementos geomórficos. Así, si en una ladera los tipos de suelos presentes se localizan según una secuencia definida, lo mismo sucede con los elementos de las laderas observables en una cuenca hidrográfica.
- iv) El principio de selección, enunciado originalmente por Gerber (1969, en Scheidegger, 1987) establece que los procesos de degradación y erosión de materiales en la superficie del terreno ocurren en forma tal que las formas resultantes (las formas "seleccionadas" por los tales procesos) corresponden a aquellas que son las estadísticamente más estables.
- v) Por último, el principio de control estructural, mediante el cual Scheidegger (1987) indica que las diferentes características del paisaje están diseñadas a partir de la influencia directa de procesos tectónicos.

Estos cinco principios básicos son útiles a la hora de discutir el porqué de las formas que son observadas en el terreno. Tal discusión es la que permite analizar el contenido de la información que puede ser aprovechada en la estimación de parámetros hidrológicos.

Por una parte, el análisis de estos principios se completa al comprobar que las observaciones realizadas por Scheidegger (1987) concuerdan con la idea del comportamiento dinámico y progresivo del paisaje. Dicho autor expresa que **"el paisaje**

⁴Aquellos generados en el interior de la corteza terrestre, tales como tectonismo, vulcanismo, etc.

⁵Los generados en el exterior de la corteza terrestre, tales como la meteorización, erosión, transporte y depositación de componentes del suelo.

actual es el resultado instantáneo de la actividad conjunta de fuerzas endógenas y exógenas". Con esto señala que los cambios en el paisaje no son catastróficos, (al menos en términos generales). Esto remarca la idea de continuidad, nexo con las ciencias físicas, y procurar superar la etapa estrictamente taxonómica ⁶, con el fin de avanzar así sobre el *análisis cuantitativo* del paisaje.

Por otra parte, el mismo autor hace una separación estricta de los procesos exógenos y endógenos en función de su naturaleza estadística. Mientras que los procesos endógenos se relacionan con características sistemáticas⁷, los procesos exógenos, en cambio, se vinculan en su origen con fenómenos atmosféricos⁸, cuyos mecanismos son, en muchos casos asimilables mediante teorías estocásticas. Según esta idea, aquellas formas del paisaje donde existe una mayor influencia de procesos endógenos, seguirán patrones sistemáticos. Por el contrario, aquellas donde predominen los factores exógenos seguirán patrones fundamentalmente aleatorios.

Lo dicho anteriormente guarda relación con los conceptos de jerarquía y escala mediante dos vías de análisis:

- a) Por una parte, es fácil comprobar que a escalas lo suficientemente generales, es posible detectar en el paisaje una o más *componentes sistemáticas*, (independientemente de considerar la preponderancia de factores endógenos y exógenos), con las cuales guiar análisis más detallados. Ésta es la estrategia comúnmente utilizada en los análisis fisiográficos.
- b) Por otra, las características y cualidades relacionadas a procesos endógenos ocupan un *nivel jerárquico superior* dentro del paisaje y su influencia se transmite hacia los niveles inferiores de la estructura del sistema. Por el contrario, las características y cualidades asociadas a procesos exógenos exigen siempre para ser observados un nivel de detalle mayor que en el caso de los endógenos, ya que sus manifestaciones forman parte de subsistemas jerárquicamente inferiores a los derivados de los procesos endógenos
- c) Finalmente, hace recordar el concepto y definición de variables sistemáticas y aleatorias, dada por Wilding y Drees, (1983) y Blöschl y Sivapalan (1995), ya desarrolladas en el capítulo anterior.

Así, surgen argumentos para explicar el hecho por el cual en un análisis fisiográfico es más fácil hallar componentes sistemáticas cuando éste se desarrolla al nivel regional, que cuando los estudios se realizan a nivel local. De la misma manera lo expresado por que, a partir de un cierto nivel de detalle, es necesario emplear

⁶La clasificación de los diferentes tipos de paisajes como parte del análisis fisiográfico cualitativo.

⁷Tales como la distribución de esfuerzos que se generan a escala regional por el efecto de la tectónica de placas.

⁸Donde tienen lugar los fenómenos vinculados a la turbulencia del aire y del agua.

modelos estocásticos mientras que a otros niveles de mayor generalización no es estrictamente necesario.

Volviendo a las ideas expuestas por Scheidegger (1987), el principio de antagonismo está directamente relacionado con el concepto de inestabilidad. Este autor plantea que las formas del terreno están constantemente forzadas a transformarse debido a la acción constante sobre ellos de las fuerzas endógenas y las exógenas. El desarrollo de este proceso es asimilable a un esquema de retroalimentación positiva ("*positive feedback*")⁹, por medio del cual las formas se desvían progresivamente de su estado de equilibrio.

A fin de completar la idea, Scheidegger (1987) aclara que esta retroalimentación alcanza un nivel de madurez por debajo del cual la inestabilidad no puede continuar. Éstas afirmaciones se orientan en la misma dirección, cuando explican la forma operativa para modelar la evolución de ciertas geoformas.

El principio de catena se relaciona con el de inestabilidad y, por medio éste a los demás. La catena, en sentido amplio dado por Scheidegger (1987), es *aquella sucesión de formas, a lo largo de un segmento de paisaje, donde cada uno de sus componentes es una variación de las formas adyacentes a él en función del grado de desequilibrio que esté sufriendo al momento del análisis*.

De esta forma, por ejemplo, en una ladera la catena está compuesta por:

- a) Una región eluvial en la parte superior, con bajos relieves y un quiebre de pendiente inicial,
- b) Una región coluvial, en la parte media, donde se observa una topografía abrupta, con desarrollo de altas tasas de flujo de masa y,
- c) Una región aluvial en la parte inferior, con menores relieves y donde dominan los procesos de depositación.

La integración de cada una de ellos en una secuencia se lleva a cabo por medio de cambios transicionales (no discordantes), por lo cual pone de manifiesto el desarrollo constante y progresivo del paisaje. Más adelante, en este capítulo se amplía la definición de carena.

Finalmente, cada uno de los estados en los cuales se manifiesta el grado de desequilibrio de las formas están influidos por la tectónica preexistente en la región, destacando también el principio de selección. Ésta es la que determinará las zonas con mayor o menor "debilidad estructural", donde los procesos de evolución tendrán lugar de una forma más o menos rápida, respectivamente. Así, por ejemplo, en la transformación del terreno, una zona de falla se hará evidente, ya sea por una mayor erosión local, o por la mayor intensidad de los procesos cársticos.

⁹En el cual las salidas de un sistema contribuyen a incrementar las entradas del mismo, provocando un aumento exponencial de sus resultados.

Tal como ha podido analizarse, es posible sintetizar la casuística del paisaje en función de unos pocos “principios básicos”, los cuales, a pesar de ser sujetos de discusión constante, permiten contar con herramientas básicas para un estudio más detallado del medio físico.

3.2.1.2. Geoformas y procesos en el terreno

El término *geoforma* hace referencia a la morfología que presenta la superficie de un porción concreta del territorio analizado. Su definición se realiza a partir de aislar las diferentes formas de relieve y distinguir en cada una de ellas las características que las hacen diferentes a las de su entorno. Tal diferenciación puede llevarse a cabo según dos puntos de vista, complementarios entre sí:

- a) Desde una perspectiva *morfológica*, donde sólo se toma en cuenta la configuración espacial concreta del ejemplar a analizado.
- b) Desde un punto de vista *genético*, donde cada geoforma es asociada a un determinado proceso físico o químico natural. Ésta definición trae como consecuencia la necesidad de discriminar si tales procesos genéticos están o no vigentes en la actualidad.

En Geología, y particularmente en Geomorfología, los *procesos* se identifican con la transformación del paisaje y de sus elementos. Dicho cambio queda evidenciado en las variaciones de su morfología espacial a lo largo del tiempo. La generación, el progreso y la destrucción de geoformas, son las manifestaciones externas de los procesos especificados en la información geomorfológica. Bajo una visión amplia, se entiende que la presencia de un determinado proceso, en terminos geomorfológicos, estará condicionada por la acción de procesos geológicos y edafológicos dentro de un contexto climático y biológico particular.

Como consecuencia de lo anterior puede apreciarse el significado del término *terreno* (en inglés: “terrain”), originalmente referido a una porción de un territorio, tomando en cuenta sus particularidades físicas y su configuración (Van Zuidam, 1985). De esta expresión surge el concepto de terreno mediante el cual se describe a un complejo compuesto por los atributos físicos significativas para el hombre, los cuales se encuentran tanto en la superficie del terreno como en su interior. Fundamentalmente, la importancia de la definición anterior se basa sobre el hecho que la información geomorfológica así concebida considera como parte propia la discriminación de *formas* y *procesos*, como se vio anteriormente, no existen formas sin procesos que la generen. De la misma forma, no existen procesos que no dejen una forma que le es propia y característica. En consecuencia, en geología en general y en geomorfología en particular, no es posible considerar a las formas sin asociarle a éstas cierta cantidad de proceso. Así, este concepto implica considerar a todos aquellos atributos del terreno, tales como relieve, geología, condiciones hidrológicas y cobertura edáfica y cultural del terreno.

3.2.1.3. Las unidades litológicas y litoestratigráficas

Una unidad litológica es un conjunto de materiales geológicos compuestos predominantemente por cierta asociación de minerales que comparten un origen común.

Avanzando en el tema, el concepto de estratigrafía se basa en considerar que, en un determinado sector del terreno, las unidades litológicas forman parte de una secuencia de estratos o capas, las cuales están, a su vez superpuestas a otros grupos de rocas. Los materiales, procesos y conocimiento previo son los elementos que permiten definir los criterios de agrupamiento de diferentes unidades litológicas en unidades litoestratigráficas. Así, una unidad litoestratigráfica es un cuerpo tridimensional de rocas (sedimentarias, ígneas o metamórficas) que se distingue del resto de las unidades sobre la base de determinada propiedad o grupo de propiedades, y está asociada a una determinada posición estratigráfica, es decir: una posición dentro de la escala temporal. Utilizando el mismo concepto, es posible definir unidades bioestratigráficas, según el contenido fosilífero de los materiales, o unidades cronoestratigráficas si la clasificación se basa sobre pautas exclusivamente cronológicas. Por otra parte, cualquiera de estas unidades estarán asociadas a un *patrón concreto de distribución espacial* dentro del contexto en el cual fueron definidas, observable gráficamente en un mapa geológico. Markewich y Cooper (1991), explican estos conceptos con absoluta claridad.

3.2.1.4. El concepto de *facies*

Reading (1986, 1996) expresa que el concepto de facies ha sido usado intuitivamente desde antiguo, cada vez que geólogos, mineros o ingenieros reconocían que los rasgos (en inglés: “features”) halladas en un tipo particular de rocas o unidades litológica le habían sido de utilidad para la correlación y predicción de yacimientos.

El término *facies* fue introducido en 1838 (Reading, 1986, 1996) y sujeto a diferentes debates a lo largo de las décadas del 60 y 70, época en la cual se observó un gran desarrollo de los modelos deposicionales sedimentarios. Su aplicación se hizo evidente en la prospección y exploración de yacimientos minerales, especialmente los petroleros.

En geología, una *facies* (Reading, 1986, 1996) es una unidad discreta, la cual está asociada a un determinado proceso genético (Anderson, 1989, 1991; Miall, 1996). Dependiendo de la escala del análisis, las facies podrán ser de extensión kilométrica, métrica o milimétrica.

En forma sintética, una facies se define como un cuerpo de roca, el cual posee rasgos que le son específicos (Reading, 1986; p: 4.). El concepto central del término analizado apunta hacia el análisis de los distintos cuerpos de rocas hallados en el terreno, en función de criterios objetivos (Reading, 1986, 1996). Dicho análisis permite definir diferentes grupos de rocas, cada uno de los cuales responde a un patrón de asociación concreto y pueden ser considerados como *unidades en sí mismas*.

Dado un cuerpo de roca, la identificación de una o más facies se basa en el hecho observable por el cual en dicho conjunto litológico existen *cuerpos de roca*¹⁰ que exhiben una *fisonomía particular*, la cual la diferencia del resto de las unidades que los rodean. Esta fisonomía depende principalmente de los objetivos para los cuales se ha planeado el reconocimiento, de la escala del análisis, y del propio esquema de discriminación facial. Como consecuencia de lo anterior, es posible analizar *litofacies*, en función de la presencia, ausencia o grado de abundancia de ciertos rasgos físicos o químicos tales como el contenido de minerales de mena, textura, estratificación, color, etc. Del mismo modo, la definición de una *biofacies* implica el análisis del contenido paleontológico (paleofauna o paleoflora) del material lítico. A partir de su definición, las diferentes facies identificadas en el terreno son complementarios entre sí, componiendo una sucesión. Este conjunto permite la definición de un *modelo geológico de facies* de la realidad observada.

La ley de facies, creada por Walther, (en 1894, según Reading, 1986) expone las bases para la delineación e interpretación de las facies en forma integral. Se definen así cuatro conceptos claves: contactos, asociaciones y secuencias, con los cuales describir las relaciones entre los elementos de la realidad observada. Sobre la base de las expresiones de Reading (1986), se obtienen las siguientes definiciones:

- a) Los contactos expresan el tipo de superficie que limita una facies con otra. La ciclicidad expresa la regularidad con la cual se repiten determinadas facies o conjuntos de facies a lo largo de una serie estratigráfica.
- b) Las asociaciones son grupos de facies que se localizan adyacentes entre sí, formando un conjunto, donde las relaciones son de orden genético.
- c) Finalmente, una secuencia es una serie de facies en la cual se observa una transición entre facies.

Este esquema de representación se basa en la integración de las observaciones y el análisis geológico a *diferentes escalas*, donde cada etapa de agregación está representada por un grupo de *unidades*, un grado de *homogeneidad* establecido y una superficie que indica su *orden jerárquico*, lo que se conecta directamente con los conceptos analizados en el capítulo anterior. En este sentido, Anderson (1991) indica que el concepto de facies es utilizado en Geología en diferentes longitudes de escala. A escala local, las facies representan lo que otros autores como Newman (1990) indica como *escalas naturales discretas* (en inglés: “discrete natural scales”). A escalas de mayor generalización, las facies se relacionen entre sí en secuencias para generar modelos geológicos conceptuales con lo cuales señalar y explicar la presencia de trayectorias y conexiones de materiales con diferentes propiedades hidrológicas, e identificar su posición concreta en el terreno.

¹⁰El término destaca el carácter *necesariamente* tridimensional de la litología.

En un determinado depósito o afloramiento geológico, existirán una o más facies, donde cada una de ellas se relacionan entre sí por medio del proceso genético que las originó. El conjunto así formado es una *secuencia de facies* (Reading, 1986) con la que se puede reproducir la evolución del ambiente donde se generaron.

3.2.1.5. El concepto de *elemento arquitectónico*

Los elementos arquitectónicos (en inglés: “architectural elements”)(Miall;1983; 1985; 1996) explotan la idea que los cuerpos sedimentarios son divisibles en grupos de estratos genéticamente relacionados por un conjunto de superficies que representan el ordenamiento jerárquico del conjunto. Tal idea ha permanecido en forma más o menos cualitativa en las definiciones estratigráficas y faciales. Este tipo de nomenclatura forma parte del análisis arquitectónico de afloramientos, comúnmente desarrollado en la sedimentología fluvial. Anderson (1991) indica que los elementos arquitectónicos se componen de un conjunto de facies, las cuales están asociadas entre sí por un proceso geológico en particular. Su definición analiza los cuerpos de materiales sedimentarios según:

- a) Naturaleza y morfología de las superficies limitantes.
- b) Geometría externa.
- c) Dimensión escalar.
- d) Litología, relaciones litológicas y secuencias halladas.
- e) Geometría interna.
- f) Patrones internos de sedimentación.

Sintéticamente, la definición de los elementos arquitectónicos se apoyan sobre tres puntos básicos:

- i) La escala espacial del análisis,
- ii) la variación interna y la presencia de superficies limitantes y,
- iii) la integración de las unidades, que permite establecer la variación lateral de los elementos.

Miall (1983; 1985; 1996) define ocho elementos arquitectónicos básicos, cada uno de los cuales está asociado a una escala temporal y espacial. Estos elementos admiten la subdivisión interna, en función de sus características propias y de la escala del trabajo.

Finalmente, estos elementos se relacionan en un conjunto a un estilo de deposición, asociado a su vez a un modelo sedimentológica y ambiental definido, con una variabilidad espacial y temporal característica.

3.2.2. El suelo como el elemento clave

La Hidrología Superficial trata de hallar interpretación definida sobre un medio concreto, de un conjunto de procesos físicos que afectan al propio medio, modificándolo constantemente. La modelación hidrológica es, pues, una herramienta para analizar estos procesos y estos resultados.

Comúnmente, se hace mención al “medio natural” como un ente difícil de delimitar y, por lo tanto, de analizar en forma concreta. La prueba de esto es la clara dificultad operativa evidenciada por la modelación hidrológica distribuida. Una falta de definición del medio natural impide poder desagregarlo espacial y funcionalmente, ya que no se conocen con claridad ni sus límites ni sus componentes. En consecuencia, en este estado no se poseen criterios concretos para valorar la influencia en los resultados, al considerar o no su composición interna.

En este trabajo se propone al suelo como la unidad básica del terreno, tanto desde el punto de vista edafológico como geomorfológico, climático y ecológico, tal como ya lo expresó Zoneveld (1989). En consecuencia, en este trabajo, el concepto de suelo es clave para el desarrollo del estudio de la respuesta hidrológica del terreno.

3.2.2.1. La definición del suelo

El hecho de distinguir tres diferentes sentidos de uso para la palabra suelo no es arbitraria, sino que se basa en la experiencia personal de enfrentar constantes dificultades al momento de expresar el significado de esta palabra, según si el interlocutor sea de profesión ingeniero, geólogo, agrónomo o hidrólogo. Arnold (1983) desarrolló un conjunto de definiciones con el fin de dar mayor luz al problema de la definición del suelo. Considerando al suelo, como objeto del análisis hidrológico, la claridad en las definiciones no sólo es necesaria en términos de comunicación, sino también para poder aprovechar en su totalidad la información disponible.

Primer paso: la aproximación ingenieril En el más llano de los sentidos, se define de forma clara, aunque algo simplista, como la diferencia entre suelo y roca.

El primero es considerado como aquel material natural, que es posible de ser removido de su yacencia original mediante el uso de maquinaria pesada, sin la necesidad de emplear explosivos. Por el contrario, la roca es aquel material natural donde se hace necesario el empleo de explosivos para poder disgregar su forma original y así poder ser removido o desplazado del afloramiento.

Segundo paso: la aproximación geológica clásica La postura geológica clásica, fundamentalmente la anterior a la década del 70, es afín a la ingenieril. Sin embargo, añade dos elementos de juicio adicionales: el origen y la edad, en suma: la estratigrafía en su sentido más completo. En consecuencia, el término suelo será asociado con aquellos materiales de origen sedimentario en ambientes continentales, que ocupan normalmente la parte superior de

una columna estratigráfica; se trata de suelos recientes, pudiéndose hallarse relictos de suelos antiguos dentro de la columna estratigráfica.

Tercer paso: la aproximación agronómica Una vez definidos los límites impuestos por la ingeniería y la geología, es necesario agregar un elemento de juicio directamente asociado a la realidad humana: el suelo es el sostén de los cultivos anuales (cereales, oleaginosas, por ejemplo) o plurianuales (pasturas, por ejemplo y árboles) que son directa o indirectamente la base de la alimentación humana. En esta etapa del análisis se puede definir que el suelo no sólo es un material granular, generado bajo ciertas condiciones ambientales sino que también tiene la propiedad de servir de sostén para el desarrollo humano. Ésta ha sido la razón de mayor peso para que estos temas hayan sido desarrollados principalmente dentro de las ciencias agrarias.

El punto de convergencia: una idea integral del suelo Al final de las aproximaciones ingenieril, geológica y agronómica se arriba a la definición actual y de mayor peso conceptual del suelo. Sobre ésta se basa el sistema de análisis y clasificación edafológica del Soil Survey Staff (1975, p:1-2), basado en los conceptos desarrollados con anterioridad por autores rusos (Dokuchaiev, 1870, en Soil Survey Staff, 1975). Según este autor, el suelo es un conjunto o colección de cuerpos individuales naturales, cada uno con una morfología que le es propia y lo define, la cual es el resultado de una combinación de clima, materia viva, materiales parentales terrestres, relieve y edad de la geoforma que lo contiene. La figura 3.1 expone las diferencias entre las diferentes definiciones de suelo analizadas y los elementos que poseen en común cada una de ellas.

Lo expresado anteriormente merece algunos comentarios adicionales.

En primer término, de acuerdo a la primera aproximación propuesta, un suelo puede ser desde un material granular suelto (como la arena) hasta una roca altamente fisurada y meteorizada, pasando por materiales de bajo grado de agregación o cimentación natural. Mientras tanto, las rocas serán todas aquellas que por su cohesión o bajo grado de alteración opongan una resistencia mecánica alta a la remoción (independientemente de que sean ígneas, sedimentarias o metamórficas).

Como consecuencia del segundo paso de la definición propuesta, los suelos estarán compuestos por materiales clásticos, normalmente con bajo grado de agregación, y asociados a edades comprendidas entre el Terciario y el Holoceno. Consecuente con esto, los suelos fueron tradicionalmente asociados a períodos de estabilidad tectónica y morfogénica (edafogénesis). Existen numerosos casos en los cuales los suelos han sido incluidos indiscriminadamente dentro del Cuaternario o del “Cuaternario no diferenciado”, sin ampliar en más el estudio, generalmente por motivos de escala.

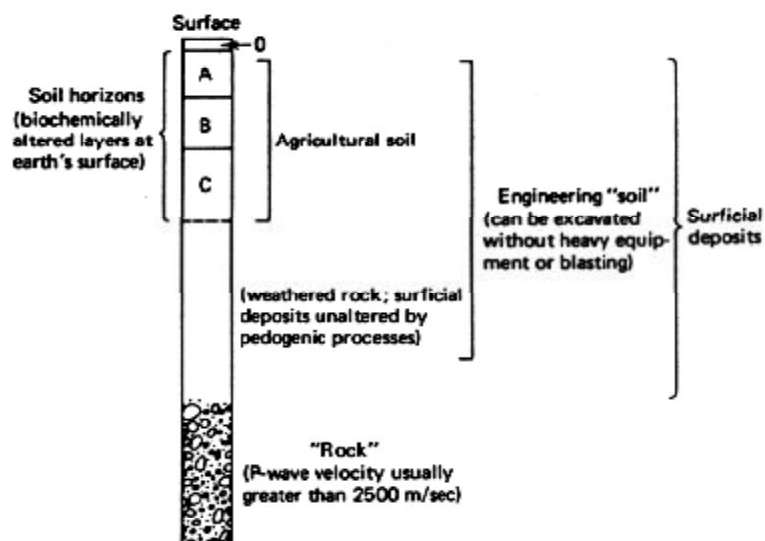


Figura 3.1: Columna de suelo (Costa y Baker, 1981; p: 147)

La aproximación geológica permite avanzar en la delimitación del objeto suelo, separándolo de otros materiales, ya por su edad o por su origen. La posición estratigráfica permite localizar al suelo dentro de un intervalo reducido de tiempo y a un ambiente geológico concreto: el continental. Por lógica quedan excluidos así el ambiente marino sea cual fuere su profundidad o estado de evolución, el ambiente glacial, y el volcánico. La definición del ambiente remite, en consecuencia, a un subconjunto de procesos geológicos: los deposicionales sedimentarios, desarrollados en un subconjunto de condiciones climáticas, de vegetación, geomorfología, etc. Finalmente, desde el punto de vista geológico, los suelos se asocian con ambientes deposicionales fluviales, aluviales, periglaciares, vinculados a períodos de estabilidad morfogenética (dominio de agradación sobre la degradación).

Por otra parte, y respetando lo propuesto en la aproximación agronómica, no debe olvidarse, sin embargo, que no todos los medios donde las plantas son capaces de sostenerse y progresar son suelos en el sentido agronómico, por ejemplo: los recipientes que se utilizan para almacenar plantas vivas en un invernadero, los medios artificiales para el desarrollo de plantas, y la misma agua, sobre la cual se desarrolla una gran variedad de formas vegetales. Por otra parte es común observar que en terrenos altamente fracturados con escaso o nulo manto granular, se desarrollan excelentes bosques, aunque tal substrato no es un suelo. "sensu stricto"

A partir de la definición de un punto común entre las diferentes definiciones de suelo, el mismo pasa de ser una abstracción semántica o una subdivisión de los materiales del terreno a ser una *entidad tridimensional concreta que forma parte del paisaje y que evoluciona con éste a lo largo del tiempo*. Su génesis, su desarrollo y su funcionamiento son coherentes con las condiciones ambientales del medio físico en el que se encuentra.

Finalmente, el suelo se define como tal sobre la base de su morfología, la cual es el reflejo de la interacción a lo largo del tiempo del clima, los organismos vivos (macroscópicos y microscópicos, tanto vegetales como animales) y de los procesos formadores del paisaje (erosión, meteorización, remoción y depositación).

3.2.2.2. Definición puntual de la unidad de suelo

Al expresar que el suelo es un individuo dentro del terreno, cabe entonces comenzar a definir sus características y cualidades, a partir del estudio del suelo que se encuentra en un punto dado del terreno. El mismo se realiza por etapas sucesivas. En primer lugar se distingue lo que es suelo de lo que no se considera como tal. Esto permite delimitar sus límites inferior y laterales, donde el suelo toma contacto sobre un material que no es suelo. Dentro de ese intervalo se define el perfil de suelo.

Basándose en lo expresado por el Soil Survey Staff (1975), el suelo existirá en función que su morfología interna indique la modificación in situ del material parental, separándose así de lo que no es suelo. Lo dicho sirve para apoyar la *distinción* del suelo de los conceptos originales de suelo ingenieril y del suelo en el sentido estratigráfico. No todo el suelo considerado en términos ingenieriles ni todo el suelo en términos estratigráficos es suelo en el sentido integral del mismo. Así, por ejemplo un depósito aluvial no consolidado, reciente en términos geológicos, puede considerarse como un suelo ingenieril y, además se encuentra en el extremo superior de la columna estratigráfica del lugar, lo que permitiría considerarlo también como un suelo desde el punto de vista estratigráfico. Sin embargo, mientras que no se pueda demostrar que su morfología interna haya cambiado respecto a la original sedimentaria, no puede ser considerado como suelo, en el sentido *integral* del término.

Acerca de la diferencia entre *suelo* y *no suelo*, el Soil Survey Staff(1975) reconoce (en la pág. 2) que ésta es fácil de reconocer si el suelo presenta un perfil de cierto desarrollo de profundidad, por ejemplo un metro, pero, de no haber horizontes o ser el suelo muy delgado (por ejemplo: 20 cm. de espesor), la diferencia entre suelo y no suelo se torna dificultosa. Los mismos autores indican que en ciertos casos la posición de dicho límite dependerá de decisiones más o menos arbitrarias de quién lo analiza. En estos casos es necesario tomar como referencia una superficie que signifique un cambio estratigráfico claro que permita separar al suelo de un material más antiguo, cuyo desarrollo no es contemporáneo con aquel. Por otra

parte, es común que en distintos sistemas de clasificación se establezca como base un determinado valor de espesor para que el material pueda considerarse un suelo.

Muchos de los problemas referidos a la distinción entre suelo y no suelo surgen en áreas edáficas “marginales”, donde las variables climáticas alcanzan valores extremos (exceso o defecto de precipitación, temperatura, etc.) para el desarrollo de vegetación, ambientes anegados, o zonas donde los procesos morfogénicos están activos y los materiales superficiales están expuestos a continuos eventos de remoción y depositación.

La profundidad de enraizamiento de las plantas tampoco es un criterio válido para determinar el límite inferior de un suelo. Anteriormente se ha señalado que en materiales que no son suelos evolucionan plantas superiores, con gran profundidad de penetración,. Por otra parte, en el caso de los cultivos, cada uno de éstos presenta una determinada profundidad de exploración que le es típica, y ésta no necesariamente debe coincidir con la profundidad total del suelo. Sin embargo, la profundidad a la cual la mayoría de las raíces de especies no leñosas dejan de avanzar en vertical es muy útil para destacar al presencia de una superficie de discontinuidad que marca un cambio físico importante en las propiedades del suelo.

3.2.2.3. Perfiles de suelos y unidades taxonómicas

De la misma forma que en la litología, la definición *formal* del suelo en forma puntual se estudio mediante un perfil de suelos. Un perfil de suelos se elabora a partir de su observación visual. La observación de un perfil de suelos, igual que en la litología, se basa sobre la distinción macroscópica de sus características *morfológicas*: fundamentalmente estructura de mayor escala presente en el perfil, la cual se manifiesta por medio de la presencia de diferentes niveles o capas, denominados *horizontes*. A partir, de allí se analizan las características y cualidades de cada horizonte, como lo pueden ser: textura, color, estructura de los agregados de suelo, penetración de raíces, presencia de carbonatos, cutanes, etc. Un caso especial de “perfil”, de connotaciones particulares es el denominado *perfil cultural* (Henin et al.; 1972) en el cual el análisis se concentra en la porción de suelos afectado por las actividades de cultivo y labranza, y de las estructuras que se generan por esta actividad.

De la misma forma que en el caso de la litología, la base para la identificación formal de los suelos, y su consecuente diferenciación de otros especímenes, es mediante la definición de *unidades taxonómicas*. Van Wambeke y Forbes (1985) indican que las unidades taxonómicas definen intervalos específicos de variación en las propiedades de suelos. Su definición requiere, lógicamente, la adopción de un *sistema de clasificación de suelos*. Así, dos columnas de suelos con características edafológicas diferentes a la luz de un sistema de clasificación particular, darán lugar a dos unidades taxonómicas diferentes. A lo largo de la historia de la Edafología se han

ensayado numerosos esquemas de clasificación. Smith (1983) expone un claro esquema de la evolución histórica de los sistemas de clasificación de suelos, a partir de 1870, con las ideas nacidas en Rusia. Autores como Fitzpatrick (1980), Ahrens y Arnold (2000) y Spaargaren (2000) exponen un detallado panorama que complementa debidamente el conocimiento de este tema. Particularmente, Porta et al. (1994) mencionan la evolución de la Edafología en España a partir de los trabajos de Huguet, en el primer tercio del siglo XX. En la actualidad, los sistemas de clasificación más extendidos son los propuestos por la FAO (1975), de carácter más general, de reducido detalle y limitado poder discriminante, y el propuesto por el Soil Survey Staff, a partir del año 1975, con una leyenda autoexplicativa (Porta et al.; 1994) mucho más detallado, poderoso y en constante evolución.

3.2.2.4. El pedón de suelo como unidad

Tal como pudo verse en puntos anteriores, la definición de un suelo depende mayoritariamente en las propiedades que éste exhiba en una sección vertical, es decir un perfil.

Poco es lo que pueda servir para caracterizar a un suelo partiendo exclusivamente de su aspecto superficial (Soil Survey Staff, 1975; p.: 2). La columna de suelo, con sus respectivos horizontes y las superficies que lo separan, son los elementos con los que analiza puntual y concretamente un suelo.

El perfil mencionado anteriormente representa, a su vez, al volumen mínimo de muestreo y representación de un individuo de suelo: *el pedón*. Éste se define como “un cuerpo tridimensional de suelo, cuyo tamaño incluye a las variaciones representativas en la forma, relación de horizontes, en su composición y su superficie ocupa entre 1 y 10 m²” (Soil Survey Staff, 1975).

Esta definición es particularmente útil en el caso de suelos con horizontes con desarrollo lateral intermitente o cíclico. El origen de este elemento se encuentra en la necesidad de tomar un volumen de referencia para separar a un individuo de suelo de otros, sobre la base de criterios fundamentalmente morfológicos, analizados a escala macroscópica.

A nivel de pedón, la variabilidad interna sigue existiendo. Tanto a escalas macroscópicas como microscópicas, existen evidencias de anisotropía tales como la presencia de horizontes, macroporosidad estructural o inducida, etc. No debe olvidarse que si bien el origen del concepto es edafológico, ha sido utilizado en la aplicación de una estructura taxonómica. A pesar de lo anterior, el concepto de pedón resulta de utilidad a los fines hidrológicos para contar con una unidad de referencia de la variabilidad de los parámetros hidrológicos que controlan la generación de escorrentía.

3.2.2.5. Distribución de las unidades de suelos en el paisaje

Lo expresado en los puntos anteriores desemboca en la distribución de los individuos de suelo en el espacio, cayendo una vez más en la temática de la *variabilidad espacial* ya mencionada.

A consecuencia de lo expresado en los puntos anteriores, el suelo conforma *un conjunto de cuerpos naturales* lateralmente conexos entre sí, que se encuentran sobre la superficie terrestre, el cual puede estar modificado total o parcialmente por el hombre y es el soporte de las plantas que se desarrollan en condiciones ambientales naturales (en inglés: “out-of-doors”, según el Soil Survey Staff, 1975), y contiene materia viva. En sus márgenes laterales se encuentran cuerpos de agua, hielo o roca aflorante. Su límite superior es el atmosférico y el inferior es la roca u otro material geológico que no haya sido afectado por los procesos formadores de suelo. Sus características y cualidades externas (en superficie) e internas (observables en profundidad, mediante un perfil, cata u otro tipo de excavación) se ponen en evidencia a través de su morfología, fundamentalmente a escala macroscópica (Soil Survey Staff, 1975).

Como ya se ha explicado, cada individuo de suelo puede ser tenido en cuenta como un pedón. Bajo este punto de vista, entonces, el terreno estará cubierto total o parcialmente por un manto edáfico, compuesto a partir de n pedones, cada uno representando a un individuo de suelo. De la misma forma en que se definieron uno o más pedones, es posible agrupar al total de individuos en subconjuntos. Cada uno de estos grupos presenta ciertas evidencias morfológicas que harán posible separar a sus miembros del conjunto total. Queda definido así el concepto central de *polipedón* (Soil Survey Staff, 1975). Éste sigue representando a los procesos modificadores del suelo que generaron a cada uno de los individuos que contiene. Este concepto no es solamente una abstracción interesante, sino que ha sido explotado exitosamente en la práctica desde hace más de 30 años, a fines de la clasificación de los suelos. Las mismas propiedades que caracterizan al polipedón integran a éste dentro del resto de los materiales como un conjunto de cuerpos de suelo *particularmente sensibles* a las condiciones ambientales locales. Dicha sensibilidad provoca que se generen diferencias entre los suelos, aún a partir de un mismo tipo de material parental. Finalmente, estas diferencias se ponen de manifiesto en la morfología interna de los individuos de suelo.

Espacialmente, la cobertura edáfica conforma una sucesión continua de cuerpos de suelo, construyendo una sucesión encadenada de áreas donde es posible identificar diferentes tipos de suelos. Según Buol (1989) el *paisaje edáfico* (en inglés: “soilscape”) conforma una porción del paisaje. Éste es comúnmente considerado como una cualidad del paisaje, más que un elemento externo del mismo. El concepto de paisaje edáfico es la abstracción básica que expresa la fuerte relación tanto genética como funcional de la cobertura edáfica con el paisaje donde ésta se encuentra. Sobre esta base conceptual se hacen efectivos el análisis, la clasificación y la carto-

grafía de suelos, asociando la realidad observada con los criterios de clasificación y ordenamiento jerárquico de los suelos. El nexo común entre la realidad y la taxonomía lo componen el concepto de facies, elementos arquitectónicos, catenas y toposecuencias, permitiendo contemplar la correlación explícita entre las diferentes unidades taxonómicas.

En consecuencia con lo anterior, las diferencias internas entre suelos seguirán un cierto patrón de ordenamiento que refleja la distribución espacial de las variables que influyeron en su desarrollo; la inversa también es posible. Dado un conjunto de condiciones ambientales de cuya influencia en la génesis de suelos es conocida, su patrón de distribución señalará un patrón edáfico concreto. Blöschl y Sivapalan (1995) se refieren a este orden como el grado de organización que posee una cuenca, relacionado con una forma dada de regularidad en su comportamiento cuyas causas son frecuentemente genéticas.

3.2.2.6. El concepto dinámico del suelo

Desde el punto de vista de la escala espacial, un pedón en particular, es un eslabón en una secuencia de suelos que supera a su propia escala de desarrollo. A su vez, es esta cualidad la que lo relaciona con el paisaje y con su patrón de distribución espacial. Una vez aclarados estos conceptos, es necesario aclarar la segunda parte de su definición: la interpretación dinámica del suelo.

El Soil Survey Staff (1975), indica que el suelo es una entidad natural donde sus propiedades varían en el tiempo y en el espacio. Así, por ejemplo el pH de los horizontes, su contenido de materia orgánica, su estado de humedad o el contenido de sales no son las mismas ni en toda su extensión ni en todas las épocas del año.

El suelo no es un elemento *ni uniforme ni estático*, tanto en la escala temporal como en la espacial. Esta observación, comúnmente aceptada, se relaciona directamente con el concepto de individuos de suelo, antes mencionado, cada uno de los cuales refleja las condiciones ambientales que más lo han afectado en su funcionamiento y génesis. Dichas condiciones serán locales o regionales. Así, por una parte las condiciones regionales provocarán que los suelos de una comarca se distingan de los de las adyacentes como resultado del cambio de materiales parentales, relieves, pluviometría etc. Por otra parte, dentro de una misma zona, las propiedades de los suelos cambiarán en función de las variaciones locales del terreno. Este tipo de variación en los suelos conduce *directamente* al concepto de *catena* de suelos. Éste, a su vez permite ampliar progresivamente la visión del medio y vuelve la atención *nuevamente* a la morfología y los procesos de flujo de agua que se desarrollan en él (Hall y Olson, 1991). La morfología del terreno se manifiesta a través de tres elementos clave: gradiente, longitud de la pendiente y curvatura de la pendiente. Por otra parte, el movimiento del agua está relacionados directamente con el desarrollo del paisaje. El agua es una de las fuerzas más importantes en la morfogénesis. Se destaca que las mayores trayectorias de flujo son: el escurrimiento superficial, la

infiltración, el flujo subsuperficial y la recarga de agua al substrato. Estos patrones de flujo están directamente relacionados a su vez con la anisotropía vertical de los suelos y la existencia de flujos horizontales o subhorizontales.

Lo anterior permite dar un apoyo concreto a la idea intuitiva que los suelos no generan la misma respuesta hidrológica a un mismo impulso. La razón de esta diferencia de comportamiento se encuentra en su posición relativa dentro del paisaje. Una forma de evidenciar esta idea es la de relacionar el comportamiento hídrico de los suelos en relación con la red de drenaje de la cuenca. Beven y Kirkby (1979) y O'Loughlin (1981) utilizaron esta idea para estimar la variación espacial y temporal de la humedad del suelo. Particularmente Beven y Kirkby (1979) desarrollaron un índice basado en variables topográficas para cuantificar el almacenamiento hídrico del suelo (en inglés: "wetness index"). Finalmente, esta variabilidad en el régimen hídrico admite también el análisis en el sentido inverso. Dado un mismo material, su posición relativa influirá decididamente en el tipo y magnitud de los procesos generadores de suelos que actuarán. Luego, se generarán suelos progresivamente más contrastados en sus propiedades a medida que transcurra el tiempo. Éstos podrán ser relacionados entre sí mediante una catena, definida entre dos puntos con diferente índice de humedad.

3.2.2.7. Geformas, facies, pedones y catenas: integración de conceptos

Los conceptos señalados anteriormente guardan una fuerte relación mutua. La definición de los términos, tanto en Edafología y en Geología han sido extensamente analizados y sujeto a más de un proceso de estandarización internacional. Los autores mencionados en los puntos anteriores de este capítulo son algunos ejemplos de lo dicho. Sin embargo, el exceso de detalle en el análisis puede desviar la atención del investigador, impidiéndole ver el conjunto y las relaciones que existen entre sus elementos. En este punto se procura, en vez de separar, relacionar conceptos con el fin práctico de facilitar la interpretación de la información existente. Partiendo de los materiales, se irán encadenando las ideas hasta la integración de las mismas en la definición del suelo.

En primer lugar, analizando los conceptos anteriores, se deduce que una secuencia de facies englobará a una o más unidades litoestratigráficas. Tal afirmación se basa sobre los siguientes puntos de vista:

- a) Los cambios geológicos siguen un proceso evolutivo a los largo del tiempo. Por lo tanto, resulta más práctico señalar esas variaciones sobre la base de criterios físicos que en criterios exclusivamente cronológicas o directamente ligados a estos.
- b) Las facies son, por definición, elementos de análisis elásticos ya que permiten la asignación de unidades en función de criterios múltiples.

- c) Se incrementa el análisis objetivo de las características geológica a una determinada escala de trabajo.
- d) Existen elementos de ponderación robustos (unidad, límites y jerarquía) para la correlación espacial y temporal de unidades.
- e) Se respeta y se destaca la tridimensional de los cuerpos geológicos.

Adicionalmente, los elementos arquitectónicos permiten analizar la heterogeneidad litológica desde una perspectiva ventajosa, tal es la definición de *formas* descriptivas de procesos concretos y la definición de *rangos escalares*. Así, el concepto arquitectónico del análisis se basa sobre la *tridimensionalidad* del conjunto de rocas que se analiza, superando la visión bidimensional de un afloramiento para analizar la extensión espacial y las causas de las características litológicas. A partir de esto es posible recrear los conceptos de facies, secuencias de facies y correlación, mediante su homologación a elementos arquitectónicos previamente definidos.

Las características que corresponden a una unidad geológica (sea esta una unidad litológica, una unidad litoestratigráfica, una facies o un elemento arquitectónico) son establecidas sobre la base de la definición de una *sección típica*, la cual es una secuencia de estratos o materiales en los cuales se ha identificado sus características específicas. Una sección típica es comúnmente definida en aquellas localidades donde dicha unidad aflora de forma *completa, no tectonizada* y con su *mayor espesor*, lo que garantiza el registro litológico más completo. La definición de sección típica es equivalente a la definición de *perfil modal* en suelos, con la cual se define un perfil de suelo con que se identifica al pedón más representativo de un área analizada.

Fuera del área donde la unidad geológica fue definida, el proceso de elaborar las equivalencias entre observaciones se denomina *correlación*. Este procedimiento consiste, básicamente, en evaluar las relaciones espaciales existente entre diferentes afloramientos respecto a la sección típica. Así, por ejemplo, en el caso de las unidades estratigráficas, la correlación se realizará teniendo en cuenta las características que definen sus límites, es decir: la litología y edad. De la misma forma, las facies se correlacionan entre sí de acuerdo a su pertenencia y posición jerárquica en las asociaciones y secuencias presentes en la sección típica. En la misma dirección, los elementos arquitectónicos varían a partir de la sección típica hacia los afloramientos mas distantes en función de los rangos establecidos para los órdenes de magnitud escalar de su arquitectura. Los suelos representativos también se correlacionan utilizando criterios similares a los empleados en el estudio de las unidades litológicas (Buol et al.,1989).

La presencia, variabilidad y distribución de los materiales litológicos afectan directamente a la morfología del terreno. Como ya se explicó anteriormente, desde el

punto de vista del terreno, la integración de formas y procesos se basa en considerar que las primeras son la respuesta a la actividad de los segundos. En el mismo sentido, el grado en que la morfología del terreno sufre modificaciones espaciales resulta de la participación de uno o más procesos geomórficos y geológicos a lo largo del tiempo. De esta forma, la heterogeneidad de las geoformas de un territorio se vincula directamente con las variaciones edáficas, geológicas, biológicas y climáticas a través de la construcción o destrucción de un complejo de formas, las cuales siguen un patrón de asociación definido dentro de una zona específica de la corteza terrestre.

Como ya pudo comprobarse, el suelo no es un elemento aislado en el terreno, sino que es un *componente del sistema natural*. Una visión más amplia de una sección vertical del terreno, permite *relacionar al suelo con el concepto de facies litológica y de allí con el de arquitectura geológica*. Así, de la misma forma que las facies, los suelos pueden diferenciarse entre sí en función de su morfología externa y las características geométricas que presentan dentro del depósito que integran.

Las catenas de suelos son un caso particular de lo definido anteriormente en este capítulo (Scheidegger; 1987). Surge entonces la aplicación del concepto de catena *en suelos*, como la continuación del concepto de secuencias de facies. El concepto de catena en suelo (Milne 1935; en Buol, et al.; 1989) sirve para sugerir que los suelos en un paisaje están relacionados entre sí como los eslabones de una cadena (Figura 3.2).

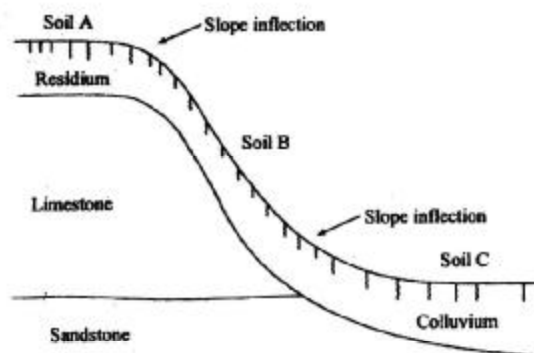


Figura 3.2: Catena de suelos

Por otra parte, Hall y Olson (1991) explican que la diferencia entre los suelos de una catena se debe en primer lugar a las condiciones del drenaje. En segundo lugar sus características serán consecuencia de la presencia y magnitud de los procesos de

lixiviación, translocación y redistribución de materiales erosionados o componentes químicos móviles. En tercer lugar, el transporte y la deposición diferencial de los materiales erosionados es otra fuente de variación de los suelos en una catena. Así, existen dos variantes de catenas :

- a) cuando todos los suelos de una catena se han formado por un mismo tipo de material, o
- b) cuando los suelos de una catena se forman a partir de dos o más materiales diferentes.

Avanzando en los conceptos y sus relaciones, se puede comprobar que el modelo de catena se desarrolla dentro de los límites de una *toposecuencia* (Hall y Olson, 1991), la cual representa a una serie de suelos relacionados entre sí, a lo largo de una secuencia topográfica (Westman, 1985; p. 207). Una toposecuencia, como comúnmente es concebida es en sí misma una *hidrosecuencia* (Hall y Olson, 1991), donde se pueden apreciar los diferentes tipos de suelos en función de su condición de *drenaje*.

En consecuencia, vinculando conceptos, cada individuo de suelo puede considerarse una *facies* más de la *secuencia que representa a los materiales del terreno*. Se concatena entonces la presencia física de un individuo de suelo con el material parental a partir del cual se desarrolló y, a su vez con los materiales geológicos sobre los que se apoyan. La Figura 3.3 explica lo dicho, comparando las definiciones provenientes de la Geología y la Edafología, y destacando el nexo de unión más importante entre ambas: los elementos arquitectónicos. Esto último permite confirmar una vez más la naturaleza *multiescalar* del medio sobre el cual se pretende elaborar una parametrización concreta. Los perfiles de suelos y litológicos (o litoestratigráficos) son conceptos equivalentes que indican la conformación de los materiales (edáficos o geológicos) en un lugar puntual del terreno. El pedón es una definición especial en Edafología equivalente con la idea de la caracterización geológica de una localidad en concreto, cuya área es despreciable en relación a la superficie total del estudio (por ejemplo: una sección del frente de explotación de una cantera en relación con la totalidad de la cantera). La unión y correlación de diferentes pedones genera un polipedón, lo cual es conceptualmente equivalente al concepto de facies en la escala geológica macroscópica. la relación lateral y vertical de facies generan secuencias de facies. La secuencia de facies es equivalente al concepto de paisajes edáficos, ya que se trata de polipedones relacionados lateralmente entre sí, como la manifestación tridimensional del concepto de catena. Relacionando secuencias de facies se pueden generar elementos arquitectónicos, separados entre sí por superficies de diferente jerarquía dentro del ambiente analizado dando lugar a la definición de la arquitectura del terreno (en síntesis: definición de las relaciones entre formas, materiales y estructura). De la misma forma, agrupando y relacionando entre sí diferentes paisajes edáficos se pueden relacionar suelos de forma organizada y de acuerdo a la

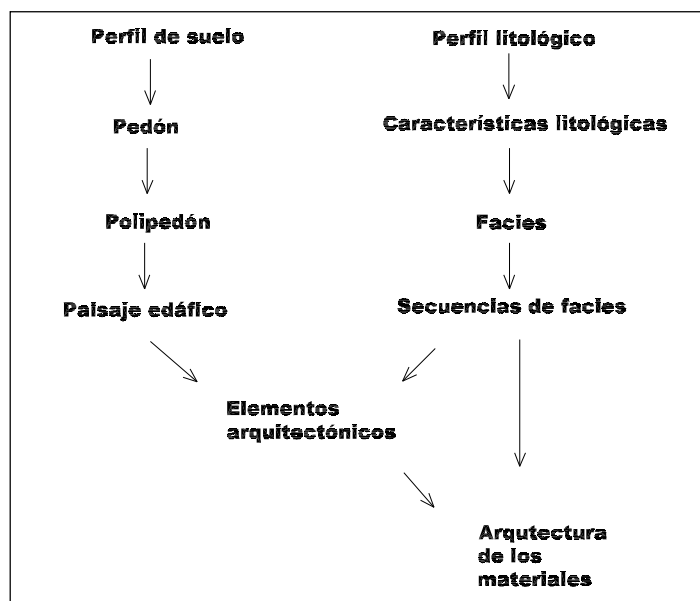


Figura 3.3: Relación mutua entre facies y unidades de suelos

morfología del paisaje. Cada grupo de polipedones que definen un paisaje edáfico concreto, puede considerarse como un elemento arquitectónico.

Finalmente, queda claro que la asociación de términos, tan afines como los mencionados, permite poseer un panorama más *claro* del problema a resolver (Figura 3.3). Dicha claridad proviene no de la profundidad de la definición, sino de la *amplitud* de la visión, por medio de la cual es posible apoyar un análisis concreto sobre un número significativamente mayor de conceptos e ideas. Tal esfuerzo de relación no se realiza con fines puramente especulativos. La relación de conceptos se lleva a cabo porque el hecho de contar con mayores criterios de análisis, conceptualmente conexos, es siempre más *provechoso* y *seguro* en términos de *resultados*.

3.3. Enfoques operativos de análisis

El primer paso a dar en la evaluación de los componentes de un terreno (en particular, los de una cuenca hidrográfica), es la de analizar cómo se distribuyen espacialmente las variables consideradas, dada una cierta escala de trabajo.

3.3.1. Definiciones

Desde el punto de vista de las Ciencias Naturales, Mitchell (1991; Cap. 4) señala que, para evaluar el terreno, existen dos tipos de aproximaciones: la fisiográfica y la paramétrica. En ambos casos, el autor se refiere a ellos en función de sus posibilidades para clasificar en forma práctica al terreno, a la escala requerida (p. 31).

- i) El enfoque *fisiográfico*, dedica su atención a distinguir en el terreno diferentes unidades, cada una de las cuales posee un paisaje que lo distinga del resto (*characteristic landscape*¹¹). A escalas regionales, la aproximación es genética y, al ampliar el detalle se convierte en estrictamente fisiográfica (Mitchell, 1991, pp.36-37).
- ii) El enfoque *paramétrico*, en cambio, se basa en la subdivisión del terreno sobre la base de los valores de ciertos atributos seleccionados (Mitchell, 1991; p. 31). Los atributos a los que se refiere el autor son aquellos que necesariamente pueden ser observables y mensurables en el terreno, coincidiendo con la definición de características, dada por Steele (1967).

Un ejemplo de este tipo de análisis fisiográfico, puede ser el estudio de los suelos según su capacidad de uso (método propuesto por Klingebiel y Montgomery; en 1961), discriminando sectores en función del tipo de pendientes topográfica, cultivos, riesgo de anegamiento, textura superficial del suelo, etc.

En el caso del análisis paramétrico, un ejemplo puede ser el estudio de un acuífero libre en una región, representándose cartográficamente mediante un mapa de isopiezas, y analizando la información a fin de definir la variación espacial de los niveles piezométricos mediante técnicas geoestadísticas.

Ambos enfoques representan a los procedimientos con los cuales es posible describir e interpretar a una cuenca hidrográfica, presentando cada uno de ellos, diferentes aspectos a considerar (Mitchell, 1991):

- a) En los sistemas paramétricos, es posible establecer relaciones objetivas entre diferentes localidades y elementos, sin utilizar criterios taxonómicos. Éste es el punto de partida para la parametrización de modelos, implicando:
 - La posibilidad de practicar sobre la información análisis numéricos y estadísticos (Mitchell; 1991; Lewis, 1977; Davis 1986).
 - Incluir información proveniente de sensores remotos o tecnologías similares.

¹¹En España, Ibarra (1993) hace mención de las *unidades de paisaje* refiriéndose así a *espacios que, a una escala determinada, se caracterizan por una fisonomía homogénea y una evolución común, siendo de dimensiones concretas y cartografiables*

- La posibilidad de obtener resultados directos a partir del análisis de una o más variables numéricas por medio de una formulación matemática dada, expresando los resultados en cualquiera de las formas mencionadas anteriormente en esta tesis
- b) De los beneficios ofrecidos por el enfoque fisiográfico, expresado por Mitchell, 1991, (pp.39 -40) cabe destacar que:
- El enfoque paramétrico señala, por medio de las unidades de paisaje, la distribución de otros factores ambientales, tales como el agua, los suelos, etc. pudiendo usarse como una estructura útil al momento de su identificación en el campo y representación cartográfica.
 - La descripción de unidades de paisaje es más rápida y económica a la luz de las nuevas tecnologías de información, tales como bases de datos y Sistemas de Información Geográfica.
 - Los métodos empleados para la elaboración de unidades fisiográficas, se basan en el análisis a diferentes escalas del mismo elemento a clasificar, debido a que las unidades son compuestas y claramente divisibles en otras menores.
 - Al igual que en la cartografía de suelos (Van Wambeke y Forbes; 1985; Mitchell, 1991; p. 42; Buol et al. 1989), la heterogeneidad del paisaje no es dividida en grupos composicionalmente homogéneos, sino que es vinculada a unidades en las cuales expresan la relación existente entre las partes que la conforman.

3.3.2. Complementariedad de los enfoques

Las observaciones mencionadas permiten deducir que el análisis de la información y los resultados obtenidos no se reducen exclusivamente a la información paramétrica con la que se cuenta para el estudio. Ambos enfoques presentan ventajas propias, pero en ningún caso un enfoque se presenta como un reemplazo del otro. Lo expuesto conduce finalmente a la idea de una necesaria complementariedad de los enfoques paramétricos y fisiográficos, tal como lo expresa Mitchell (1991, p.: 41).

En cuanto al análisis paramétrico, se hace sumamente importante tomar en cuenta la calidad y cantidad (Wilding y Drees, 1983) de los parámetros analizados.

Frecuentemente, en un análisis paramétrico los criterios que rigen la distinción de cualidades en función de características se basan en identificar regiones que son consideradas como “homogéneas” a la escala de observación. Este procedimiento trae por consecuencia la introducción de una fuerte subjetividad al análisis, implícita en los criterios de selección (Westman, 1985; p. 228).

Por otra parte, el mencionado autor señala que las operaciones algebraicas o transformaciones matemáticas de parámetros seleccionados cada uno por separado no son correctas a menos que se conozca con precisión sus rangos de variabilidad y comportamiento. Para obtener un resultado se debe respetar la dimensionalidad de los parámetros. Como ejemplo puede considerarse la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE: Wischmeier y Smith, 1978), en la cual se observa las diferentes transformaciones que sufren los parámetros iniciales a fin de que, mediante un modelo multiplicativo se logre un resultado dimensionalmente coherente. Cabe aclarar que ésta, a su vez fue definida a una escala concreta de proceso, y en un rango condiciones específicas (Wischmeier y Smith, 1978).

Por otra parte, los enfoques fisiográficos apuntan claramente hacia la catalogación y/o estructuración taxonómica de los elementos observados, el cual la hace dependiente del análisis y los criterios empleados para su sistematización. Como consecuencia de esto, los resultados obtenidos pueden ser expresados solamente mediante escalas ordinales o nominales. En este tipo de expresiones resulta frecuentemente difícil hallar una regla biunívoca de compatibilidad.

El enfoque fisiográfico, es esencialmente descriptivo, lo cual se complementa, en escalas de menor detalle, con la interpretación genética del conjunto (Mitchell, 1991; pp.36-37). La ya mencionada existencia de una relación genética global presente en los análisis fisiográficos, expresa los rasgos del conjunto y su distribución jerárquica, implicando la también mencionada división entre variaciones aleatorias y sistemáticas.

Lo último indica que, mediante este tipo de análisis, es posible el diseño de experimentos y la estructura de muestreo, a fin de lograr disminuir la duplicación de esfuerzos en la transición desde la descripción hacia el análisis paramétrico del problema (Mitchell, 1991). El reconocimiento de las variaciones sistemáticas permite concentrar los esfuerzos hacia el análisis de aquellas que aparentan no serlo, diseñar un experimento de muestreo y analizar la posibilidad de que éstas permanezcan siendo aleatorias o pasen a ser también sistemáticas.

3.3.3. Magnitudes escalares y cartográficas del análisis

La heterogeneidad del terreno obliga pues a considerar diferentes estrategias para obtener los valores de los parámetros de modelación, según el grado de desagregación espacial que se considere. Debido a las causas que se acaban de analizar, la técnica de la modelación hidrológica utilizó diferentes procedimientos para lograr obtener resultados aceptables. El objetivo fundamental es hallar la forma de parametrizar un modelo.

Para esto es necesario analizarlas en la desagregación espacial de la información y del modelo. Ambos puntos de vista interactúan entre sí, de forma constante.

Mamillapalli (1998) sugiere que es necesario discretizar la cuenca a un nivel apropiado de detalle para considerar la variabilidad espacial, de tal forma que el número de elementos mejore los resultados de la simulación. Una discretización gruesa puede conducir a una simulación pobre y una muy fina requiere un mayor número de datos de entrada y mayor tiempo y espacio en computación.

Intuitivamente se observa también un problema de escala temporal, el cual debe ser subsanado por el usuario empleando una discretización temporal acorde con los resultados deseados y el problema en estudio.

En los niveles de menor detalle y por consiguiente de mayor síntesis y cobertura espacial, la discriminación analítica y cartográfica de la información se basa en expresiones ordinales o nominales, muy afines a las estructuras taxonómicas tradicionales en Geología, Biología, Edafología, etc. El ordenamiento taxonómico se basa tanto en valores analíticos cuantitativos (textura, contenido de materia orgánica, índices foliares, pendiente topográfica, etc.), como puramente cualitativos (fisonomía externa de un macizo boscoso, tipos de relieve, etc.).

A medida que aumenta el grado de detalle y disminuye el área considerada para el trabajo, comienzan a participar expresiones ordenadas por intervalos de igual longitud o coeficientes numéricos, índices, etc. Éstos son, a su vez, el vínculo que se utiliza para relacionar unidades distanciadas entre sí, que fueron originalmente identificadas mediante ordinales o categorías. Un ejemplo de esto es la utilización de índices para comprobar el grado de similitud entre grupos de especies (Krebs, 1986; pp.444 - 447).

Cada rama de la ciencia que aporta información a la Hidrología posee su propia idea respecto a las magnitudes escalares con las cuales representar sus conclusiones. Sin embargo, su cartografía responde a criterios similares, en cuanto al tamaño del área mínima a ser representada, en función de los procesos y evidencias que se pretenden exponer.

3.3.3.1. Las dimensiones del análisis

El Cuadro 3.1, expone el punto de vista geomorfológico, según Baker (1992; p.334). Ésta es útil a modo de generalización de los conceptos geomorfológicos y geológicos de "escalas regionales", escalas medias y "escalas detalladas", frecuentemente expuestos en la literatura.

Orden	Escala espacial [Km^2]	Escala temporal [años]
1	10^{+7}	$10^{+8} - 10^{+9}$
2	10^{+6}	10^{+8}
3	10^{+4}	$10^{+7} - 10^{+8}$
4	10^{+2}	10^{+7}
5	$10 - 10^{+2}$	10^{+6}
6	$10^{-1} - 10$	$10^{+5} - 10^{+6}$
7	10^{-2}	$10^{+4} - 10^{+5}$
8	10^{-4}	10^{+3}
9	10^{-6}	10^{+2}
10	10^{-8}	

Cuadro 3.1: Escalas espaciales y temporales en geomorfología. Tomado de Baker, 1992; p.: 334.

En el cuadro 3.1 se hacen referencia a diferentes órdenes de escala, cada uno de los cuales corresponde a un nivel de detalle diferente (Cuadro 3.3).

En Ecología, Westman (1985) expresa criterios similares para la definición de los niveles de análisis (Cuadro 3.2).

En el caso del Cuadro 3.2 cabe aclarar que:

- Una Microcomunidad es una composición de diferentes especies.
- Una comunidad se caracteriza por las interacciones significativas entre especies
- Un bioma, se distingue por la fisonomía vegetal distintiva (formas externas, número de estratos vegetales, etc.)

El mismo caso se observa en Edafología, cuando es necesario definir los criterios de homogeneidad y heterogeneidad del medio, a fin de analizar el transporte y lixiviación de solutos en un suelo (Cuadro 3.4).

Unidad espacial de habitat	Escala [m2]	Unidad de agrupamiento biológico
Micro habitat	1 - 10	Microcomunidad
Ecosistema	$10^{+2} - 10^{+5}$	Comunidad
Región o subcontinente	10^{+6} o mayor	Bioma

Cuadro 3.2: Escala de las unidades ecológicas . Tomado de Westman, 1985; p. :202.

Orden	Unidades
1	Continentes, cuencas oceánicas
2	Grande planicies deposicionales, escudos tectónicos
3	Unidades tectónicas de tamaño medio (cuencas sedimentarias, macizos montañosos, etc.)
4	Pequeñas unidades tectónicas (bloques de falla, volcanes, subcuencas sedimentarias)
5	Unidades de erosión / depositación de gran escala (deltas, estuarios piedemontes)
6	Unidades o geoformas de erosión / depositación de mediana escala (planicies aluviales, planicies de inundación, morenas, etc.)
7	Unidades o geoformas de erosión / depositación de pequeña escala (terrazas, dunas de arena, etc.)
8	Grandes unidades de procesos geomórficos (pendientes, secciones de canales fluviales, etc.)
9	Unidades de procesos geomórficos de tamaño medio (dolinas, barras fluviales, etc.)
10	Unidades de procesos geomórficos de microescala (estrías glaciares, estructuras sedimentarias internas, etc.)

Cuadro 3.3: Unidades geomórficas y órdenes de escala (Baker, 1992; p.: 334)

Dominio	Escala de caracterización [m]
Microscópico	10^{-9}
Macroscópico	$10^{-4} - 10^{-3}$
Pedón	1
Terreno	$10^{+1} - 10^{+3}$

Cuadro 3.4: Escalas de homogeneidad y heterogeneidad en Edafología. Tomado de Elrick y Clothier, 1990, p.: 95.

Respecto a la información volcada en el Cuadro 3.4 los autores mencionados agregan que:

- En el dominio microscópico se considera que existe una fase acuosa homogénea.
- En el dominio macroscópico, se considera que el medio está compuesto por una columna de material homogéneamente agregado.
- En el pedón, se observa a la macroporosidad como señal de la heterogeneidad. Existen otras fuentes de heterogeneidad, como la estratificación y la presencia de horizontes. El flujo no es unidimensional.
- A nivel del terreno como tal, la variabilidad espacial está dada por la variación de los pedones que lo componen. Se observan los efectos causados por fenómenos superficiales, topografía, etc.

Finalmente, cabe aclarar que los autores mencionados consideran al pedón como un cuerpo de suelo tridimensional cuyo volumen es de $1 m^3$.

3.4. Secuencia de etapas

En puntos anteriores de este capítulo se tomó conocimiento de que es recomendable que el análisis del medio físico sea llevado a cabo por etapas, partiendo de niveles de alta generalización hasta arribar a la escala donde interesa concretar las conclusiones. También se constató que la información con la cual se cuenta en las escalas de menor detalle está generalmente expresada en forma ordinal o nominal. En consecuencia, y dada la existencia de dos diferentes tipos de análisis de la información es necesario considerar: la oportunidad en la cual se pondrá en práctica cada uno de ellos.

El terreno es, por naturaleza, un medio *continuo*, cuyas características y cualidades hidrológicas son el resultado de procesos interactivos desarrollados a lo largo del tiempo. Por lo tanto, el análisis del terreno debe incluir dos etapas fundamentales: *análisis fisiográfico* y *análisis paramétrico*.

Con el análisis fisiográfico primero se distinguen los componentes del medio natural y por medio del análisis paramétrico se analizan sus relaciones mutuas, y su efecto sobre el funcionamiento del medio natural. El análisis paramétrico es la continuación lógica del análisis fisiográfico. El objetivo principal de la etapa de análisis fisiográfico es establecer los criterios generales del estudio y su manifestación concreta es la elaboración de *mapas temáticos*. Mediante este tipo de estudios se logran distinguir las componentes más destacadas del medio. Con una finalidad netamente objetiva, se elaboran los límites cartográficos. Éstos tienen por finalidad distinguir a los diferentes componentes del medio, sin el prejuicio de

considerar a tales límites como “fronteras impermeables”. Más adelante en este texto se analizan detalladamente estos aspectos.

Una vez analizada la información desde un punto de vista fisiográfico, es necesario definir o estimar las relaciones sistemáticas que se deducen del mencionado análisis. Éste expresa sus conclusiones en términos nominales u ordinales, ya que es la forma habitual y conveniente para señalar cartográficamente los resultados. Concretamente, el análisis paramétrico se elabora con la finalidad de:

- i) Asignar valores numéricos de parámetros concretos (por ejemplo: capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, etc.) a cada unidad fisiográfica.
- ii) Establecer un esquema cuantitativo de funcionamiento (en este caso hidrológico) del sistema analizado a partir de los parámetros seleccionados en el punto anterior.

El nexo de unión de estas etapas es el *diseño de muestreo*. Por otra parte, en vista un estudio hidrológico, un diseño de muestreo debe realizarse sobre la base de un conocimiento fisiográfico detallado del medio no sólo en su configuración espacial sino también en su génesis y en su significado como parte integrante de un ecosistema, y reflejo de las interacciones presentes del medio. Así, el estudio y conocimiento de la cubierta del suelo toma importancia fundamental en el desarrollo de las etapas anteriores.

A continuación, se expone de forma detallada las etapas y los procedimientos necesarios para realizarlas.

3.4.1. El análisis fisiográfico

A tal fin, Ibarra (1993), presenta en su trabajo un método diseñado para el estudio del paisaje integrado, “apoyado en una concepción del paisaje geográfica y sistémica” (Ibarra, 1993; p. 229). Esta concepción del trabajo sintetiza con claridad las propuestas tradicionalmente expuestas en la bibliografía (Por ejemplo: Soil Survey Staff (1951, 1975), Mitchell (1991), y otras más locales o recientes como la de Soriano, et al. (1984) y la de Sánchez, et. al (1984).

La escala de trabajo es *media*, refiriéndose así a objetos cartográficos representados a escalas que varían entre 1:25.000 y 1:50.000. El planteamiento se basa en el análisis fisiográfico para desembocar en las proximidades del análisis paramétrico. Los estudios involucrados en este método se dividen en cuatro etapas sucesivas:

- i) La primer etapa consiste en el análisis de los elementos del paisaje (“Fase I”)
- ii) En segundo término se procura la delimitación y caracterización de los elementos del paisaje (“Fase II”).

- iii) La tercera centra su atención sobre los factores que explican las características del paisaje global y de sus elementos (“Fase III”).
- iv) En la cuarta etapa se lleva a cabo la diagnosis de la dinámica del paisaje, en la cual se analiza cual es la función de los elementos en el contexto del conjunto analizado (“Fase IV”).

En la primer fase del trabajo (“Fase I”) se propone la delimitación de “unidades homogéneas” a dos niveles distintos de detalle:

- a) El primero ocupa el rango de los 10 a los 100 Km^2 .
- b) El segundo se encuentra entre 1 y 10 Km^2 . Éstas unidades son divisiones internas de las mencionadas en el punto anterior.
- c) En tercer lugar, en esta etapa también se considera el análisis de los elementos del paisaje que componen a ambos tipos de unidades antes detalladas.

Aparte, se toma en cuenta en esta etapa la recopilación de información previa. Los elementos del paisaje son los que componen a las divisiones antes mencionadas. El resultado es la determinación de unidades a escala 1:50.000.

La segunda fase (“Fase II”) trata de la “caracterización” de las unidades antes definidas globalmente y la delimitación de otras a escala 1:25.000. Aquí se toman en cuenta las discontinuidades del terreno y los demás elementos observables que componen el paisaje. Los resultados son utilizados para el diseño del muestreo e inventarios de campo, a realizar en la etapa final de la presente fase.

En la Fase III del programa propuesto, la labor se orienta hacia la detección detallada de las relaciones entre “factores y elementos del paisaje”. Tales relaciones conducen a la explicación de los pesos que cada elemento observado en la “articulación del paisaje” (Ibarra, 1993; p. 236), tales como suelos, vegetación, etc.

La última fase (“Fase IV”) dedica su atención al diagnóstico del paisaje, considerándolo a éste “como dependiente de la interacción de la totalidad de factores analizados”. Así surgen conclusiones respecto al estado y progreso de la degradación de la cubierta vegetal, balance morfogenético, etc. En la propuesta de trabajo de Ibarra (1993) están presentes aquellos conceptos que han sido manifestados en etapas previas de este trabajo. La autora cita como “elementos del paisaje” a lo que en este capítulo se expuso como las variables que contienen la información (en apartados anteriores).

Del mismo modo, la *caracterización de las unidades de paisaje* implica en la Fase II la búsqueda de características y cualidades que permitan distinguir o contrastar a las unidades entre sí. La observación y/o muestreo de las mismas conforma la parte final de la mencionada Fase. La autora pone como ejemplos la pendiente,

orientación de las laderas, estructura y composición de la vegetación, evidencias de incendio, etc.

En la Fase III, puede comprobarse que la elaboración de los “factores explicativos del paisaje” (Ibarra, 1993; p. 236) implica la vinculación de distintas características, pertenecientes a una o más variables que permitan explicar las cualidades observadas en el terreno.

La fase de *diagnosis* corresponde a las conclusiones que pueden extraerse a partir de las etapas previas, lo cual, en el caso de la Hidrología, corresponde a la etapa de parametrización de un modelo.

El carácter fundamentalmente fisiográfico queda de manifiesto cuando Ibarra (1993), en la página 234, expone que “la diversidad de las variables y la escasez de medios, junto a la propia escala del trabajo, obligan a optar en muchos casos por variables categóricas, pero siempre que sea posible es preferible una cuantificación mayor, es decir, la utilización de variables numéricas, puesto que suponen una información más rigurosa y permiten un tratamiento estadístico de mayor calidad”.

3.4.1.1. La generación de unidades cartográficas

Como ya se expresó anteriormente, el objetivo principal de la etapa fisiográfica es la de establecer los criterios generales del estudio y su manifestación concreta es la elaboración de *mapas temáticos*.

En general, como resultado de la interpretación de fotos aéreas, imágenes de sensores remotos, información cartográfica disponible, etc, los resultados de un estudio son representados cartográficamente, mediante mapas temáticos. Cada uno de éstos tiene por fin la de señalar la presencia, extensión y distribución espacial de uno o más objetos o características determinados, las cuales han sido detectadas, analizadas y clasificadas de acuerdo a un criterio compatible con el estudio. La expresión cartográfica de éstos es mediante diferentes polígonos, los cuales en total cubren la totalidad el territorio analizado. Cada uno de estos polígonos son conocidos como *unidades cartográficas*. Cada una de ellas se caracteriza por un área, un contenido específico (valor numérico o leyenda cartográfica) y un contorno más o menos suavizado.

En la vida real, la información disponible respecto a algunas de las variables representantes del medio natural (geología, uso del suelo, edafología, etc.) se presenta mediante el uso de escalas de categorías. Estas unidades se representan en un mapa por medio de unidades cartográficas. Estas últimas se indican bajo la forma de polígonos, cada uno de los cuales señala la presencia de cierta categoría o intervalo de valores en los cuales se dividió a la variable en cuestión (litología, uso del suelo, etc.). Así, por ejemplo en el caso de la variable “litología”, las categorías corresponden a los diferentes tipos de rocas descritos en un mapa geológico.

Una unidad cartográfica puede considerarse un objeto, (en inglés: “terrain object”, según Janssen y Molenaar, 1995) al cual se le asocia un identificador único que lo distingue de los demás dentro del conjunto. De esta forma, una unidad cartográfica posee una cierta cantidad de atributos (textura, estructura, litología, por ejemplo) que son comunes a todo el conjunto analizado. Así, por ejemplo la Unidad “A” tiene textura arcillosa, mientras que la Unidad “B” tiene textura arenosa. En ambos casos el atributo común es la textura, y el valor de ese atributo es, según el caso, “arcilloso” o “arenoso”.

3.4.1.2. Jerarquía y dinámica de las unidades cartográficas

Basándose en lo expresado por Janssen y Molenaar (1995), las unidades cartográficas pueden caracterizarse en función de su posición dentro de un esquema jerárquico.

Cuando dos o más unidades cartográficas poseen atributos en común pueden unirse en una nueva unidad de jerarquía superior, la cual se definirá en función de los atributos en común de sus componentes. De lo anterior se desprende que, si existe más de un atributo definido en cada unidad cartográfica, pueden desarrollarse más de una escala jerárquica diferente, según el criterio de agregación que se analice. Así por ejemplo, de un conjunto de unidades cartográficas de suelo pueden obtenerse diferentes productos (mapas), según si la información se procesa teniendo en cuenta la textura de su horizonte superficial, el tipo de suelo, o su profundidad efectiva.

Por otra parte, las unidades cartográficas son dinámicas en cuanto a su definición. Esto es claro cuando se analizan temas como uso del suelo, o vegetación. Las características del medio delimitado dentro de una unidad cartográfica pueden variar siguiendo un proceso natural o antrópico y, de esa forma, cambiar el valor de los atributos con que fue definida. De esta forma no sólo se ve afectada la unidad en sí misma, sino que es posible que se altere la estructura de agregación definida en un principio, al aparecer o desaparecer ciertos valores de atributos.

Debido a una variación en el medio delimitado por la unidad cartográfica, las características geométricas de esta última pueden cambiar sin que cambien los valores de los atributos que la definen. Se manifiesta entonces un cambio en la posición, tamaño o forma del elemento del terreno que analice. Por ejemplo, es posible que, a cierta escala de análisis, la superficie de un área de un bosque varíe históricamente, aunque no se observen cambios en sus características o cualidades internas.

3.4.1.3. Diseño de unidades cartográficas en las Ciencias de la Tierra

A lo largo del desarrollo de la cartografía temática han surgido diferentes formas de conceptualizar y representar en forma gráfica la variabilidad y características

del terreno.

Como ya se ha destacado de diferentes maneras en esta Tesis, cualquier estudio de mapeo comienza con la observación y el análisis de las similitudes y diferencias entre los especímenes hallados en el área de estudio. Dichos “especímenes” pueden ser desde tipos de paisaje, tipos litológicos, suelos, etc. La clave en el mapeo es, en consecuencia, definir un conjunto de criterios mediante los cuales sea posible diferenciar los atributos que permitan definir a una unidad cartográfica.

En función de lo anterior, resulta de ayuda aplicar las definiciones aportadas por aplicando Meijerink et al. (1994), para comprender el proceso de elaboración de unidades cartográficas. Según este autor, las unidades cartográficas, es decir, los polígonos que componen un mapa temático son denominadas *Unidades de Mapeo del Terreno* (en inglés: “Terrain Mapping Units” o “TMU’s”).

Una TMU representa una región concreta del terreno en la cual está contenido determinado tipo de objeto, característica o cualidad, que corresponde a un determinado nivel de la clasificación adoptada para el trabajo. Así por ejemplo si se trata de clasificar la morfología del terreno según el tipo de curvatura del relieve, es posible construir un mapa que contenga TMUs, cada una que represente la presencia de relieves cóncavos, llanos o convexos, respectivamente.

De los diversos sistemas de clasificación desarrollados históricamente en las Ciencias de la Tierra se destaca el sistema de mapeo de tierras del ITC ¹², conocido como “Land System” (Van Zuidam, 1985). Un ejemplo similar ha sido desarrollado en Australia (Mitchell, 1991). En este tipo de sistemas de clasificación, las TMUs guardan una relación taxonómica entre ellas. De esta forma, es posible la desagregación sucesiva de las TMUs conforme se vaya avanzando en el interior de la escala taxonómica. Así, cada nivel taxonómico se representa con un mapa temático diferente.

Las clasificaciones regionales se basan generalmente en las características físicas más relevantes de la región, tales como playas, valles fluviales, etc. La delimitación exacta de sus límites se basa normalmente en algunos criterios más precisos, como la pendiente topográfica, profundidad del nivel freático, etc.

Los criterios diagnósticos son particularmente útiles en la delimitación de unidades. Sin embargo, la selección de determinados criterios excluyen automáticamente otros, dependiendo de la naturaleza del estudio. Entre los criterios utilizados están los estadísticos, normalmente multivariados, tales como el análisis de componentes principales, o el análisis discriminante.

Lógicamente, la complejidad de las variaciones naturales, las limitaciones de un eventual muestreo de campo y las incertidumbres de las delimitaciones cartográficas hacen a veces dificultosas o insatisfactoria la tarea cartográfica. Así los criterios

¹²International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation; Enschede, The Netherlands.

seleccionados no son lo suficientemente precisos, quedando como producto un conjunto de pequeñas áreas o “islas” residuales, aisladas (en inglés: “crisp sets”), que no reflejan, en realidad variaciones significativas en las características o cualidades analizadas. En estas circunstancias es necesario evaluar el grado de pertenencia parcial (en inglés: “partial membership”) de estas pequeñas unidades cartográficas a las mayores que la rodean (Mitchell, 1991).

En cualquier caso, no debe olvidarse que la correcta delimitación de unidades cartográficas no oscurece la interdependencia entre regiones. Las características y/o propiedades de un terreno no están definidas, en la realidad, exclusivamente por los rasgos locales. Su génesis, desarrollo y estado actual se explica en función del ambiente en el cual se localiza. Éste es el principio básico que debe ser respetado por cualquier proceso de delimitación de unidades.

3.4.1.4. Precisión y fuentes de error en la delimitación de unidades cartográficas

Las definiciones anteriores indican la imperiosa necesidad de un comportamiento responsable al momento de la delimitación de unidades en un mapa.

Así como la claridad en la definición de los criterios de análisis es fundamental en la obtención de resultados útiles y coherentes, la agudeza del investigador es de vital importancia. Como ejemplo de lo dicho vale mencionar el estudio realizado por Raab y Brosch (1996). Estos autores buscaron analizar cuantitativamente los resultados de un experimento basado en la observación a campo de ciertas cualidades mecánicas de un afloramiento rocoso y su correspondiente clasificación. Dicho experimento fue realizado por diferentes personas, cada una con un diferente grado de experiencia profesional. Los resultados señalan que se puede demostrar estadísticamente la diferencia en la estimación a campo según el grado de experiencia del profesional. Las magnitudes de las desviaciones entre unos y otros son explicado por una ley logarítmica. Así, cuanto más grande es el estímulo, mayor es la habilidad del operador para diferenciar matices y, por lo tanto, mayor dispersion. Sobre lo dicho, se debe tener en cuenta que una visión inexperta tiende generar resultados exageradamente homogéneos dada su poca habilidad para diferenciar entre elementos, mientras que una visión experta logrará hallar diferencias más “sutiles” pero efectivas que el anterior no dio importancia.

Finalmente, además de la capacidad técnica y agudeza del operador, un buen proceso de elaboración de unidades cartográficas requiere de una etapa de *validación a campo*, al igual que los modelos hidrológicos, para garantizar que el trabajo cumple con los niveles de precisión requeridos.

3.4.1.5. Heterogeneidad interna y externa a las unidades cartográficas

La homogeneidad interna de una unidad cartográfica es un tema de vital importancia en un análisis fisiográfico, afectando su relación con el análisis paramétrico, por lo cual es necesario aclarar su definición.

En este sentido, una TMU ¹³ representa a la más pequeña subdivisión del terreno posible a una determinada escala de análisis. Representa a un sector de un sistema complejo e incluye a una o más unidades del terreno (“Terrain Units”, según Zonneld, 1989) que no pueden ser mapeadas a dicha escala.

Inicialmente, las TMUs son por definición internamente “homogéneas”. Sin embargo, tal definición leída con prisas, puede prestarse a interpretaciones erróneas.

A la escala a la cual ha sido delineada la TMU, su contenido se considera homogéneo en el sentido de que el rasgo predominante de tal unidad es la característica, cualidad u objeto destacado en ella, el que da origen a la existencia de la misma (por ejemplo: una “zona con relieves cóncavos”).

La definición de TMU no niega en ningún momento la existencia de una heterogeneidad interna, por el contrario la admite y asegura que, de ser posible un análisis más detallado, una TMU puede dividirse en diferentes TMUs válidas a una escala de trabajo de mayor detalle.

Profundizando en la definición, Guzzetti et al. (1999) indican que, a la escala del análisis, un conjunto de unidades de mapeo generan una representación de la variabilidad del medio que minimiza la heterogeneidad interna de cada unidad y maximiza la heterogeneidad entre unidades.

Comparando las definiciones sobre unidades cartográficas, a de objetos de Janssen y Molenaar, (1995) y la de Land Unit aportada por Zonneld, 1989, se puede observar que existen coincidencias a nivel conceptual. Una unidad cartográfica, sea la que fuere, señala la división del terreno según criterios establecidos sobre la base de la observación de una o más variables y es representante de una situación real y observada en el lugar. Esto último hace que una unidad cartográfica tenga sentido como la delimitación a una determinada escala de sistema natural local, incluido dentro de otro mayor.

De lo dicho, puede inferirse que, desde este punto de vista expuesto por Zonneld (1989), es posible conseguir una homogeneidad del ecosistema dentro de una unidades cartográfica, aunque esto sea a veces una consecuencia y no un fin en sí mismo.

¹³Se debe recordar que una TMU es un caso particular dentro de la definición de unidad cartográfica.

3.4.1.6. Utilización e interpretación de las unidades cartográficas en la modelación hidrológica

Existen diferentes formas de expresar cartográficamente la variabilidad de las propiedades hidrológicas del terreno. Las mismas pueden dividirse en cuantitativas y cualitativas. Las primeras tratan de expresar el valor que toma la variable en cuestión, de forma continua en el espacio, por medio de escalas continuas de colores, curvas de isovalores, etc. Las segundas dividen al espacio en polígonos (las unidades cartográficas) donde cada uno de ellos tiene asignado el valor modal de la/las variables analizadas. De la misma forma, en la modelación hidrológica es posible la división del dominio a modelar en zonas, asignándoles a cada una de ellas el valor modal de cada uno de los parámetros necesarios.

El SCS, (1964) define las Unidades Hidrológicas, las cuales son sectores de la cuenca que pueden ser caracterizados hidrológicamente como similares. Es posible asumir que una cuenca puede ser dividida en diferentes sub-áreas, cada una de las cuales se asumía internamente homogénea en lo que respecta a su respuestas hidrológica. Cada una de estas unidades se caracteriza en función de la topografía, suelos tipo de vegetación y distribución de la precipitación de la región que representa. Este enfoque destaca el hecho que las similitudes deben ser analizadas de forma multivariante, es decir, tomando en consideración el conjunto de variables afectadas.

Kite y Kouwen (1992) indican que tradicionalmente, los hidrólogos han tendido a aplicar los modelos a “áreas hidrológicamente homogéneas”, comúnmente subcuencas. Esto es mencionado por los autores como la “aproximación zonal” (en inglés: “zonal approach”). La mayoría de las cuencas que normalmente ese analizan en la práctica se componen de un rango de clases de cubiertas vegetales, suelos, litología etc, hasta llegar a extremos de una gran complejidad. Así que, dependiendo del objetivo y de los criterios disponibles, es posible delimitar “zonas” en función de la hipsometría o de la cubierta vegetal, por ejemplo. Sin embargo, a una escala diferente los criterios que se consideraban eficaces dejan de serlo. Así por ejemplo, los patrones de distribución de usos de suelos aumentan su complejidad a medida que aumenta el grado de detalle. Otra opción consiste en que los valores de los parámetros determinados para una determinada unidad hidrológica se obtengan mediante un proceso de promedios ponderados, como en el caso del valor de la Curva Número (SCS; 1964).

Desde el punto de vista operativo, Kite y Kouwen (1992) indican que un procedimiento apto para utilizar la información cartográfica y evitar promediación de los valores de los parámetros de modelación, es el de subdividir a la cuenca en pequeños elementos computacionales, de modo tal que cada uno de éstos sea esencialmente “hidrológicamente homogéneo”. Estos elementos son denominados “Unidades de Respuesta Hidrológica” (en inglés: “Hydrologic Response Units”, o “HRU’s”). El terreno será subdividido en unidades que presentan características

uniformes tales como pendiente, orientación, tipo de suelo, de vegetación, elevación y precipitación mensual. En otras palabras; una HRU se basa sobre la superposición de dos o más capas de información, y son los polígonos obtenidos por este procedimiento los que cumplen con lo expresado anteriormente. Excelentes ejemplos de lo expresado lo señalan los trabajos de Jeton y Smith (1993). y Battaglin et al. (1993). Particularmente, los primeros autores mencionados se guiaron por tres criterios fundamentales para la delineación de HRUs:

- a) Las capas de información son hidrológicamente significativos y poseen una resolución acorde a la variación natural de la cuenca analizada.
- b) La técnica de delimitación de HRUs se adapta a diferentes criterios de clasificación existentes y es reproducible.
- c) Las HRUs no están limitadas por las fronteras entre subcuencas hidrográficas.

Cabe destacar que para Jeton y Smith (1993) no todas las capas de información utilizadas fueron elaboradas a la misma escala. Muy por el contrario, la construcción de las HRUs implicó la utilización de información de muy diferente grado de detalle.

Por otra parte, Kite y Kowen (1992) definen las GRUs, las “Unidades de Respuesta Agrupadas” (en inglés: “Grouped Response Units”), las cuales son conjuntos de HRUs que poseen características hidrológicas “similares”. La GRUs son un nuevo elemento computacional que no necesariamente debe ser continuo, es decir que no debe ser una sola unidad cartográfica, sino que varias unidades cartográficas responden a una misma GRU. La finalidad de definir este tipo de unidades fue, en el año 1992, la necesidad de reducir el volumen computacional (Kite y Kowen, 1992; p.: 3195). Contrariamente Jeton y Smith (1993), Gowda, et al (1999) definieron el patrón de HRUs en el terreno a modelar y luego cada una de éstas fue dividida en función de las subcuencas consideradas en el análisis. A estas nuevas unidades las denominaron “Unidades Transformadas de Respuesta” (en inglés: “Transformed Hydrological Response Units” o “THRUs”). En otras palabras: dado el caso de una HRU definida en dos subcuencas diferentes, la metodología desarrollada por estos autores permitió generar dos THRUs, una para cada subcuenca.

En el caso de los modelos de gran escala, Kite, et al. (1996) definieron las “Áreas de Simulación Agregadas”, (en inglés: “Aggregated Simulation Areas” o “ASA’s”) las cuales son subdivisiones de la cuenca, equivalentes a una partición según una malla rectangular que divide al territorio, o un grupo de ellas, en las cuales es necesario conocer el tipo de cubierta de suelo presente. Los autores explican que para los casos de modelación a gran escala, la información más idónea es la satelital o derivada de sensores remotos; la información se procesa como grandes unidades de mapeo, heterogéneas a una escala de mayor detalle. Por otra parte,

los autores explican que el tipo de modelo que mejor se adapta a esas condiciones es el conceptual agregado (en inglés: “lumped”).

En zonas de llanuras extensas, donde el estudio del suelo es fundamental en el estudio de la generación de escorrentía, Puricelli (1996) elaboró el concepto de *dominios hidroedáficos* para modelizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Arroyo Guaminí (provincia de Buenos Aires, Argentina). En este caso existen dos diferencia fundamentales con el caso de las HRUs:

- i) A diferencia que en el caso de las HRUs, la definición de dominios se basó en el análisis de la cartografía edáfica, tomando a ésta como representante de la síntesis del complejo paisaje-clima-cubierta vegetal.
- ii) Cada dominio se elaboró a partir de la agregación de dos o más unidades cartográficas de suelos en función de la observación de su comportamiento hidrológico. Se definen así unidades (los dominios) que representan a un conjunto de suelos , localizados en un paisaje determinado,
- iii) Los dominios hidroedáficos se vinculan entre sí, por medio de una estructura topológica dentro de la cuenca analizada (aproximadamente 1000 Km^2).

Los dominios hidroedáficos representan hidrológicamente a los conceptos de facies, secuencia de facies y arquitectura. Las unidades cartográficas de suelos son las facies, el dominio conforma una secuencia de facies, integrada a una secuencia mayor que es la arquitectura edáfica de la cuenca.

En la siempre presente temática de los deslizamientos de ladera, Guzzetti, et al. (1999) expresan algunas definiciones respecto de la cartografía de este fenómeno válidas para la generalidad de los caso del análisis del terreno. Los mismos indican que la evaluación del riesgo de deslizamiento de laderas requiere la previa selección de una adecuada “Unidad de Mapeo” (en inglés: “mapping unit”). Los autores indican que una unidad de mapeo es una porción de la superficie terrestre que contiene un conjunto de condiciones del terreno por las cuales se diferencia de las unidades adyacentes a través de un límite definido. En un análisis de los métodos para generar unidades de mapeo. Guzzetti et al. (1999.) destacan en particular dos tipos no mencionados hasta ahora: las unidades de condición única y las unidades topográficas. En el primer caso, las “Unidades de Condición Única” (en inglés: “unique-condition units”), son la resultante de la intersección de diferentes capas temáticas, obteniéndose así regiones que responden a una única combinación de factores (ejemplo: terreno calizo, con pendientes mayores al 3%, cubiertos de bosque perenne, etc...). Por otra parte, las unidades topográficas, mencionadas ya por O’Loughlin (1981), son el resultado de loa intersección de la información topográfica y la de flujo de agua en la superficie del terreno.

3.4.1.7. Ventajas e inconvenientes de las unidades cartográficas en la modelación hidrológica

Resulta obvio que la delimitación de unidades cartográficas, sean éstas denominadas particularmente como HRUs, GRUs, THRU, etc, se desarrolla con el fin de reducir los errores en la calibración de un modelo. Sin embargo, Kite y Kowen (1992) destacan que la gran ventaja que señala este método es que los valores de los parámetros están directamente asociada una combinación particular y definida de suelos, pendiente, etc., lo cual hace que el proceso sea menos oscuro. El mayor argumento en contra de este procedimiento es su arbitrariedad. Kite y Kowen (1992) y Gowda et al. (1999) dicen eso claramente. Así, uno de los supuestos de Jeton y Smith (1993) no se cumple. El tamaño de las HRUs o sus derivados es arbitrario. la intersección de información de diferente grado de detalle puede generar unidades muy grandes junto con muy pequeñas. Se debe imponer un criterio externo que indique cuál es el área mínima a considerar, junto con un criterios de “filtrado” que permita asociar a las unidades pequeñas con las unidades mayores con las que guarde un mayor grado de “similitud hidrológica”. Por otra parte, en el caso particular de que el modelo permita dividir el terreno en una cierta cantidad de celdas regulares, como en el caso de los modelos distribuidos, existen potencialmente diferentes HRUs, GRUs, etc. Así, el tamaño mínimo de las unidades está dada por el grado de discretización de la malla. Sumado a lo anterior, la selección de las variables “hidrológicamente significativas” varía en cada caso, si bien existen algunas de carácter más “universal”, es necesario tener en cuenta las característica propias de la cuenca (Gowda, et al, 1999). En todo caso, el criterio personal y la experiencia del operador es más importante que el procedimiento en si mismo.

Por otra parte, Kite y Kowen (1992) hacen notar que la cantidad de GRUs está limitada a la cantidad de puntos de registro, ya que deberá existir al menos uno por cada GRU.

Otro punto de conflicto lo constituye la falta de capacidad de explicación de las HRU's. Si bien se considera que las variables analizadas son “hidrológicamente significativas” no existen criterios cuantitativos que permitan avanzar en el grado de explicación de las misma en la *variabilidad espacial* de los parámetros de modelación. En otras palabras: la metodología, si bien es útil y operativa, no añade conocimiento al ya existente, por lo tanto no asegura que pueda ser reproducible en un caso diferente al analizado.

3.4.2. El suelo como criterio guía en los estudios hidrológicos

Como se ha visto hasta ahora, la definición de unidades cartográficas es un trabajo no exento de dificultades y de imprecisiones. La definición de unidades cartográficas

exclusivamente por medio del procedimiento de superposición no asegura que los resultados sean precisos ni que el método sea aplicable universalmente. Por otra parte, no siempre queda claro el grado de heterogeneidad interna de las unidades ni su estabilidad lo largo de la escala espacial.

Sin embargo, dentro de las unidades cartográficas existen unas en particular que presentan claras ventajas respecto a las que se han revisada hasta el presente punto. Éstas son las unidades cartográficas de suelo. Las mismas tienen un doble utilidad: definir en términos fisiográficos la variabilidad espacial de la cubierta de suelos en el terreno, definiendo, a su vez, la variabilidad taxonómica interna de cada unidad cartográfica. Lo dicho se suma al particular significado del suelo dentro del paisaje, como se explicó anteriormente, dando como resultado un nivel de detalle explícito (el cartográfico, el fisiográfico) e implícito (el relacionado a la génesis del paisaje) superior a cualquiera de las unidades cartográficas definidas convencionalmente.

Un suelo o una combinación de éstos definen una determinada combinación de clima, geoforma y biota, dentro de un determinado material y estructura geológica, por ser el resultado de la interacción entre todos estos elementos, a lo largo del tiempo. En síntesis, la adecuada definición de categorías de suelo permite delimitar unidades cartográficas coherentes interna y externamente entre sí y que representan de modo completo la variedad de unidades de terreno existentes en el área de estudio.

El rol de los suelos en la clasificación de unidades del terreno, es tan importante como el que tienen las geoformas, el clima y la vegetación. Una correcta clasificación de los suelos es el medio más eficiente para caracterizar a una unidad de terreno, ya que no solo define su estado actual sino su estado potencial futuro o pasado, en función de la observación de su génesis. Zonneveld (1989) propone lo dicho anteriormente, de forma tal que una unidad cartográfica de suelo representa fielmente al concepto de *Terrain Unit*, una unidad de carácter integral tanto desde el punto de vista morfológico como ecológico, en consecuencia, *hidrológicamente significativa*.

3.4.2.1. Cartografía de suelos

Una unidad cartográfica de suelos se diseña para representar a un conjunto de suelos de diferentes características y cualidades. Cada uno de ellos será asociado a una *estructura formal* a fin de diferenciarlo de los demás, esto es, clasificarlo. Tal tipo de estructura se elabora normalmente, siguiendo criterios genéticos, morfológicos u otros elaborados “ad hoc”.

Desde el punto de vista operacional, la cartografía de suelos propuesta por el USDA (Soil Survey Staff, 1951, Van Wambeke y Forbes, 1985) representa un ejemplo *completo y fundamental* de la delimitación de unidades cartográficas y de los atributos que éstas poseen.

En el caso especial de los mapas de suelos, las unidades cartográficas indican la presencia de un tipo de suelo particular o una asociación de suelos, es decir un conjunto de dos o más tipos de suelos diferentes que, en el paisaje ocupado por dicha unidad cartográfica, se presentan íntimamente relacionados entre sí, siendo imposible separarlos a la escala de mapeo utilizada.

Un mapa de suelos delinea áreas de terreno que, se supone, difieren en sus características físicas, químicas y morfológicas, y en su respuesta al uso y manejo (agrícola, por ejemplo). Este tipo de mapas es conocido en términos científicos como *mapa coroplético* (Webster y Oliver, 1990). El mismo modela la variación espacial del suelo en forma de un conjunto de cuerpos geográficos discretos, las unidades cartográficas, separadas por discontinuidades o límites. El modelo considera que los cambios más importantes de los atributos edáficos tienen lugar en los límites de la unidad cartográfica. Respecto a la variación adicional presente dentro de los límites de las unidades cartográficas, existen diferentes enfoques. Por una parte se puede suponer que la variabilidad interna de las unidades cartográficas es aleatoria, o que no lo es. Lo que es claro es que su variabilidad *interna* es comparativamente mucho menor que la variabilidad *entre* unidades cartográficas. Los mapas coropléticos son los utilizados en los levantamientos de suelo.

En un mapa de suelos existen unidades cartográficas que contiene una o más unidades taxonómicas. La unidad cartográfica (en inglés: “a map unit”, según el Soil Survey Staff, 1975): es una colección de áreas de terreno definida y denominada en función de los componentes de suelo o misceláneas que se encuentran contenidas en ella. Las unidades cartográficas pueden estar compuestas por uno u más tipos de suelos. En otras palabras: una unidad cartográfica puede estar compuesta por una o más unidades taxonómicas, independientemente del grado de detalle con que ese definan estas últimas. Lo dicho genera la necesidad de analizar estas componentes de los mapas de suelos unidades taxonómicas y unidades cartográficas. Las primeras se definen en función del grado de detalle del trabajo, mientras que las segundas se definen en función de su heterogeneidad interna. De esta forma, las unidades taxonómicas pueden ser:

- a) *Series*: las series son la categoría de mayor homogeneidad taxonómica. Representa a un grupo de suelos o polipedones que poseen horizontes similares en cuanto a características y a disposición. Los suelos de una serie poseen un rango muy limitado de variación de sus propiedades.
- b) *Nuevas series y variantes*: en general se trata de suelos que no coinciden con ninguna de las series reconocidas hasta la actualidad. Las variantes representan a suelos que difieren de alguna serie reconocida en una o dos características y tal diferencia es demasiado pequeña como para que el perfil se asigne a otra serie reconocida o sea considerada una nueva serie.

- c) *Fases*: Si la propiedad de una unidad taxonómica posee un rango de variación muy grande en relación con el fin por la cual se define, es necesario profundizar más el grado de detalle en la clasificación. Así surgen las fases. Éstas incluyen sólo una parte del rango de variación de las propiedades exhibidas por una serie de suelos.
- d) *Misceláneas*: Algunos sectores del terreno no poseen suelo o una escasa presencia del mismo y soportan algo o nada de vegetación. Un ejemplo son los afloramientos de rocas. Cada componente de la unidad cartográfica representa a un polipédón o partes de un polipédón identificado con una unidad taxonómica determinada (o a un determinado tipo de miscelánea).

Las unidades cartográficas sólo incluyen partes de un polipédón cuando el mapeo se realiza a nivel de fases, es decir a mucho detalle. Por el contrario, cuando la totalidad del polipédón se incluye dentro de una unidad cartográfica es el caso de mapeo cuyo detalle taxonómico no alcanzan el de fase de suelo. Los suelos difieren en tamaño y formas, en el grado de contraste con los suelos adyacentes y en las relaciones con el paisaje. Según el Soil Survey Staff (1951), se pueden definir cuatro tipos de unidades cartográficas en función de su variabilidad taxonómica interna:

- a) *Consociaciones*: en una consociación domina una unidad taxonómica (o miscelánea) sobre el conjunto de los demás suelos presentes en la unidad. Como regla general, al menos el 50 por ciento de la unidad se compone de suelos pertenecientes a la misma unidad taxonómica, que la que da nombre a la unidad. La mayoría de resto de los componentes de la unidad cartográfica son suelos similares a la unidad taxonómica dominante. El total de suelos que no lo son, no superan el 25 por ciento de la unidad. Mientras que cada uno de los componentes no similares a la unidad dominante no alcanzan al 10 por ciento, si se los considera individualmente.
- b) *Complejos y asociaciones*: comprenden a dos o más unidades diferentes que se distribuyen según un patrón de variación espacial regular. La diferencia entre complejo y consociación depende de una regla más o menos arbitraria que guarda relación con la escala de mapeo. Así, los componentes mayoritarios de un complejo no pueden ser mapeados separadamente a la escala de 1:24.000 (según la definición original). En cambio los componentes mayores de una asociación sí pueden separarse a esa escala. En ambos casos, los componentes mayores son lo suficientemente diferentes entre sí, de forma tal que no pueden considerarse que se trate de una consociación. Al igual que en caso anterior, los componentes menores en total no superan el 25 por ciento y no alcanzan el 10 por ciento de forma individual.
- c) *Grupos indiferenciados*: consisten en dos o más unidades taxonómicas que no están asociados entre sí y no siempre aparecen juntos en la misma unidad cartográfica. Generalmente se incluyen en la misma unidad cartográfica cuando

comparten una característica en común, como puede ser la pendiente, pedregosidad o grado de anegamiento. El sentido de este agrupamiento se puede explicar con un ejemplo: si dos suelos diferentes se encuentran en una posición de paisaje muy pendiente, ambos, a pesar de sus diferencias comparten igual posición geográfica e igual significado en cuanto a su uso o manejo potencial. Por otra parte, a la escala de trabajo no es necesario separarlas en diferentes unidades cartográficas o ello es demasiado dificultoso, dado lo reducido del área que ocupan. De la misma forma que las consociaciones, rigen las reglas en cuanto a las proporciones de los elementos mayoritarios e inclusiones.

3.4.2.2. Unidades cartográficas y perfiles modales

En cada unidad cartográfica se definen uno o más perfiles, cada uno representativo de los tipos de suelos presentes. En la práctica esto se realiza elaborando una cierta cantidad de sondeos exploratorios para evaluar la variación interna de las unidades cartográficas, para posteriormente seleccionar el lugar donde se realizará la cata en la cual se definirá el perfil representativo de cada suelo incluido en la unidad cartográfica. Estos perfiles se denominan *perfiles modales*.

El perfil modal suministra una caracterización detallada de las propiedades morfológicas, físicas y químicas de la clase de suelo que representa. Esta caracterización constituye una información fundamental para entender las propiedades del terreno y pronosticar su funcionamiento. La relación entre el suelo hallado en el estudio y las unidades taxonómicas existentes se realiza por medio del perfil modal. Así, se comparan los perfiles hallados con el registro de series de suelos existente en la región donde se realiza el trabajo. Como consecuencia de lo anterior, si el terreno a explorar es medianamente extenso, el mapa de suelos que se genere constará de una cierta cantidad de unidades cartográficas, cada una de las cuales conteniendo a un cierto número (igual o mayor que 1) de unidades taxonómicas. Sin embargo, el número de perfiles modales será normalmente mucho menor que el producto de la cantidad de unidades taxonómicas y las unidades cartográficas. Esto se debe a que es muy posible que una unidad taxonómica esté presente, en diferentes proporciones, en diferentes unidades cartográficas. Ya que se trata de la misma unidad cartográfica, entonces, conservará el mismo perfil que lo caracteriza. Dicho perfil será el o uno de los perfiles modales que caracterice a las diferentes unidades cartográficas en donde esta unidad taxonómica se encuentre.

3.4.2.3. Mapas de suelo y práctica hidrológica

Generalmente, la caracterización de cualquier conjunto de datos se realiza por medio de dos parámetros: la tendencia central (media, mediana, moda, etc.) y su variabilidad (varianza). En los levantamientos de suelos convencionalmente se

utiliza a la moda como medio de la tendencia central (pedón representativo) y el rango de medida de la variación de las características con medida de dispersión.

Asociados a cada unidad taxonómica se encuentra la información puntual con la cual es posible estimar el valor de las cualidades hidrológicas del terreno. Esta información hace referencia a los resultados de ensayos, análisis y catas de suelo extraídos de diferentes estudios del terreno. Estos valores describen en forma cuantitativa y cualitativa las características y entre otras cosas, el comportamiento hidrológico del terreno en lugares definidos.

En el caso concreto de los suelos, normalmente las expresiones taxonómicas han sido interpretadas con fines científicos (en la Edafología), y en menor medida en términos agronómicos, como referencia del material sobre los cuales se han desarrollado las labores culturales. Esto sucede pese a que uno de los grandes objetivos de la clasificación del suelo es determinar su aptitud para la agricultura.

En ambos casos, como en aplicaciones científicas específicas y algunas aplicaciones prácticas, las descripciones y razonamientos se realizan en función de utilizar la terminología técnica para destacar las características más notables de los mismos. Este hecho hace que el aprovechamiento de la información en aplicaciones no específicas sea parcial o mínimo.

El valor de estos datos, así como la información complementaria que los acompaña, se destaca por corresponder a la descripción de la situación modal de cada tipo especial de suelo en un tipo de paisaje en particular.

Dado un mapa de suelos, los datos respecto a textura y espesor son lo más accesibles. Sin embargo la información en sí, (concretamente: las condiciones de heterogeneidad, anisotropía, distribución espacial, correlación con otras variables físicas, condiciones hidrológicas, grado de similitud o analogía con suelos de comarcas cercanas, etc.) permanece muy frecuentemente desaprovechada.

La breve revisión de las clasificaciones modernas más difundidas en la literatura señala con claridad la excepcional riqueza de información que se concentra en un buen mapa de suelos. Por ser el suelo no solo un medio de sostén para las plantas, y representar más que un nivel de alteración de los materiales rocosos la información ha sido clasificada en términos básicamente empíricos. Esto es a causa de la naturaleza compleja de la pedogénesis, y la esencial interacción de factores ya por sí difíciles de cuantificar. A pesar de esta inicial desventaja de las clasificaciones edafológicas, su naturaleza empírica está apoyada por una gran cantidad de conocimientos adquiridos a través de la observación y contraste de hipótesis, desde las primeras décadas de este siglo. Por otra parte, la información en sí misma excede la utilidad exclusivamente edafológica. Particularmente, la Hidrología puede sacar buen provecho con las descripciones de suelo, contando así con una base clara de conocimiento para la formulación de hipótesis.

Sobre la base de lo anterior, los mapas de suelo en particular representan la integración de dos esquemas jerárquicos: el cartográfico en sí mismo, que implica

la representación de diferentes especímenes de suelos y el edafológico en sí mismo, que representa el orden taxonómico, de carácter fundamentalmente genético y morfológico, donde se ubica cada uno de los especímenes hallados en el trabajo de campo.

Los datos, en general, son elementos provenientes de una observación puntual, producto de una serie de generalizaciones de carácter operativo, dependientes a su vez de la escala de análisis adoptada en el estudio. Sin embargo, los criterios con los cuales dicha generalización fue realizada provienen de la evaluación del suelo en diferentes puntos del terreno. Para esto último se utilizó en forma organizada y concreta de un conjunto amplio y preestablecido de criterios fisiográficos, analíticos y utilitarios. Estos últimos figuran explícita o implícitamente en la leyenda del mapa y constituyen la información.

El valor potencial de la información de suelos hace necesario como mínimo una síntesis objetiva de los principales conceptos utilizados en un mapa de este tipo. El objetivo es concretamente hidrológico, no taxonómico. Las razones se basan en la necesidad que, antes de comenzar a interpretar un mapa de suelos es necesario conocer mínimamente las generalidades y conceptos que permitan diferenciar los principales escenarios edáficos, desde un punto de vista hidrológico. En consecuencia, en la presente tesis no se ha puesto énfasis en la terminología edafológica específica, la cual deberá ser consultada y analizada en la literatura que ha servido de base a este trabajo.

3.4.3. La estrategia de muestreo

La tarea de *muestreo*, puede definirse como la observación puntual (la *toma de muestras*) de la “realidad” para elaborar con éstas una síntesis fisiográfica o paramétrica.

Los supuestos y consideraciones estadísticas del muestreo han sido desarrolladas con amplitud en la literatura estadística. Tales temas no serán tratados en esta Tesis. Sin embargo, se pondrá el acento en los criterios analíticos y operativos que llevan a un grupo técnico a la decisión de elaborar un procedimiento de muestreo.

El muestreo es una tarea que se encuentra asociada tanto a etapas de análisis fisiográfico como paramétrico.

Si se trata de elaborar una *síntesis fisiográfica*, el muestreo se elabora para conocer la composición concreta de una unidad cartográfica en particular. Por ejemplo: en la elaboración de mapas de suelos, primero se delimitan las unidades cartográficas sobre la base del análisis de la morfología del terreno, vegetación, uso del suelo y características hidrológicas, etc. (Soil Survey Staff, 1951). Es entonces, en una segunda etapa, cuando se procede a un análisis de campo en el que se incluye la elaboración de catas, identificación de perfiles de suelo y toma de muestras de los mismos. Finalmente, a través de los resultados obtenidos a campo y de laboratorio

se lleva a cabo la identificación del /los tipos de suelo (la *unidades taxonómicas*) asociadas a la unidad cartográfica analizada. Otro ejemplo similar es la elaboración de mapas geológicos.

Si el objetivo es un análisis paramétrico, la toma de muestras se lleva a cabo siguiendo las características de un diseño de muestreo pre-establecido. Tal diseño se elabora según criterios estadísticos, los cuales a su vez se evalúan en función de la variable a medir y el ambiente a analizar. Los resultados de la toma de muestras son analizadas en laboratorio conducente a obtener los valores numéricos de los parámetros investigados, los cuales finalmente son analizados siguiendo el procedimiento clásico estadístico, integrándose así en el análisis paramétrico. En este sentido, Lewis (1977), Davis, (1986), Kent y Cooker (1994) o Fortin y ver Hoef (2002), presentan numerosos ejemplos del tema en los campos de la Geografía, Geología y Ecología, respectivamente. En el caso concreto de los suelos, Burrough (1991), y Upchurch y Edmons (1991) aportan una interesante revisión de la temática de muestreo de suelos y los diferentes tipos de análisis posibles de realizar.

3.4.3.1. Toma de muestras y análisis de la información

Ante un caso particular, es normal en Hidrología como en otras disciplinas relacionadas con el medio natural (Edafología Geología, etc.), que el estudio de un proceso o cualidad implique la toma de muestras y su análisis posterior.

El problema que puede presentarse es que, de no mediar un procedimiento de toma de muestras coherente con los objetivos del estudio y del conocimiento previo, los resultados obtenidos por esta vía resulten desalentadores, requiriendo de la elaboración de interpretaciones complejas, o al menos tortuosas. En consecuencia, las conclusiones a las cuales se arribe, resultarán frecuentemente insuficientes para la explicación del caso particular analizado. Asimismo, la validación y/o comparación de los resultados obtenidos, respecto a otros casos similares, será *difícil*, cuando no *dudosa*.

Finalmente, la situación se torna aún más difícil cuando se espera emplear esta información en la calibración de un modelo o esquema que reproduzca el fenómeno analizado, por ejemplo: un modelo hidrológico. En este último caso, el fracaso en la obtención de los parámetros de calibración puede poner en tela de juicio el valor relativo de las muestra. Mas aún: pueden, en una situación extrema, poner en duda la verdadera necesidad de un estudio de campo en concreto, e inducir a la simplificación de la situación que se analiza, imponiendo hipótesis y condiciones de borde que no se reproducen en la realidad observada.

Es estrictamente necesario contar con información de la realidad que se analiza. Sin embargo es fundamental que tanto la información como los métodos empleados para el análisis permitan comparar, en distintas situaciones, el comportamiento de

una misma cualidad, respetando la presencia y variabilidad de los demás factores que lo afectan (variables, características u otras cualidades relacionadas).

A consecuencia de lo expresado, se arriba a que el verdadero problema no radica en las muestras en sí mismas sino en:

- i) El criterio con que éstas fueron tomadas, es decir: los objetivos e hipótesis que se elaboraron *anteriormente* a la toma de muestras.
- ii) La forma en que fueron seleccionadas las localidades o puntos donde se extrajeron las muestras. Lo dicho equivale a responder a la pregunta: ¿qué pasa si, en un punto dado, medimos una variable, sabiendo que en la misma localidad están presentes otras tantas variables?.
- iii) Los métodos de análisis con el cual se compararon los resultados obtenidos, los cuales deben estar necesariamente diseñados para contemplar más de una variable simultáneamente.

Se observa así que la complejidad de las hipótesis formuladas y el grado de validez de las conclusiones, en el campo de la definición del comportamiento “general” de una cualidad del medio físico natural, es función directa del criterio con el cual se elaboró el estudio. El criterio (científico, o profesional) se refleja, evidentemente, en una estrategia de toma de muestras que sigue un esquema concreto y explícito, fruto de una labor de razonamiento previa. De la misma forma, del criterio y el razonamiento previo, surgirán las variables y características necesarias para poder estimar una cierta cualidad, a través del esquema de toma de muestras antes mencionado.

Del conjunto de ideas mencionadas se obtienen los elementos que tradicionalmente se consideran en el análisis hidrológico. Los mismos, según la opinión de quien escribe, se hallan condicionados a los puntos señalados en apartados anteriores. En síntesis: la toma de muestras no resulta un hecho trivial, sino que exige un estudio previo del medio y la presencia de *razonamientos claros antes, durante y después de la toma de muestras*.

3.4.3.2. Los enfoques tradicionales

Desde disciplinas y escalas muy diferentes, (análisis de productos de sensores remotos: Congalton, 1988; y estudios de suelos: Upchurch y Edmons, 1991) coinciden en destacar que, en esencia, en el procedimiento de muestreo existen tres elementos claves: el tamaño de la muestra (es decir: cantidad de puntos muestreados), el volumen de cada muestra en sí misma y la localización de cada punto de muestra (es decir: distribución espacial de las muestras). De allí surgen los diferentes tipos de estrategias de muestreos, cada uno con sus pros y sus contras en función del caso a analizar.

La forma de muestreo tradicional está asociada al análisis paramétrico o no paramétrico, y se basa en cierto número de supuestos respecto a la distribución de las frecuencias de los valores muestreados y a la independencia temporal y espacial de las muestras. Así, dado un área determinada, las técnicas procuran optimizar el muestreo de forma tal de distribuir un número limitado de puntos de muestra según un diseño aleatorio (distribuyendo los puntos al azar sobre el terreno), estratificado (distribuyendo las muestras según diferentes sectores del terreno seleccionados a priori) etc. Este tipo de procedimientos es de utilidad cuando se requiere conocer el valor medio de un determinado parámetro en el terreno analizado, o se pretende realizar conteos de especímenes o comunidades (por ejemplo: especies vegetales). En general, los resultados permitirán, partiendo de un conocimiento mínimo del medio, obtener una idea de valores medios, máximos y mínimos y distribución de frecuencias etc. de los valores analizados. Si se miden simultáneamente diferentes variables pueden realizarse entonces análisis multivariado (por ejemplo: componentes principales, análisis de agrupamientos, correlaciones canónicas, etc.) y poder obtener conocimiento respecto a las relaciones que guardan las variables entre sí.

Si se posee un cierto conocimiento del medio a analizar, se llega a la conclusión que son numerosos los factores que pueden afectar al resultado de interés (por ejemplo: tipos de suelos, cubierta vegetal, litología aflorante, etc.). Entonces el procedimiento anteriormente citado puede ser insuficiente, ya que no garantiza que se tomen las muestras necesarias para obtener un valor fiable. Por otra parte, se podría coleccionar muestras tomando en cuenta a cada uno de los factores a la vez (es decir: una muestra por cada tipo de suelo, por cada tipo de cubierta vegetal, por cada tipo de litología aflorante etc.). Este enfoque es desaconsejable, ya que es costosa (exige un gran número de muestras), las conclusiones obtenidas son limitadas, ya que se basan en considerar a un factor por vez y en definitiva, no garantiza un resultado que refleje la situación observada.

Dentro de las técnicas tradicionales, se encuentran las técnicas de *diseño de experimentos*, muy difundidas en los ámbitos de la producción industrial y los estudios agronómicos. Mediante los mismo, las muestras serán tomadas siguiendo un diagrama que toma en cuenta las posibles interacciones entre las variables analizadas. Así, los resultados obtenidos permitirán no sólo obtener un valor representativo de la situación anteriormente descrita sino que se obtendrá información respecto al efecto de los factores sobre el resultado. En otras palabras: se podrá averiguar si el valor muestreado (por ejemplo: capacidad de infiltración) es diferente según se trate de un suelo u otro, o si la combinación de cierto tipo de suelo y cierta cubierta vegetal afecta al valor de infiltración medido. Excelentes ejemplos del desarrollo de estas técnicas son los señalado por Box et al. (1993), Montgomery (1996) o Montgomery y Runger (1999).

A partir del desarrollo de la Geoestadística, se cuenta con un nuevo medio no sólo para el análisis de los resultados de un muestreo sino para el diseño del mismo. Es-

tas técnicas permiten optimizar la distribución espacial de los puntos de muestra a fin de minimizar la incertidumbre en el análisis de la variabilidad espacial de cierta variable concreta. Este tipo de técnicas centran su objetivo sobre la distribución espacial, pudiendo admitir la incorporación de información externa que permita mejorar el conocimiento del medio. En este sentido, los trabajos de Domburg, et al. (1994), Finke, (1993) y Brus, (1993) aportan conocimientos a la resolución del problema.

Visto lo anterior, se coincide con McKenzie y Austin (1993) cuando éstos indican que el muestreo es una de las partes del relevamiento del medio que más débil desarrollo ha tenido en cuanto a la evaluación de los patrones de distribución de las variables analizadas en el terreno. En el caso de los suelos, por ejemplo, la presencia de una dependencia espacial en sus propiedades obliga necesariamente a un diseño de muestreo acorde con esta realidad. Así, la necesidad de definir en forma cuantitativa, (ya sea determinística o funcional) exige a desarrollar un diseño de muestreo objetivo. En otras palabras: que la toma de muestras en el campo (o la extracción de datos, en el caso de analizar información cartográfica disponible) sea coherente con las hipótesis previas respecto a la dependencia espacial ya citada.

Recordando las necesidades de la Hidrología Distribuida, y a la luz de las estrategias expuestas, la idea más frecuente propone que, para hipotéticamente obtener un conocimiento *completo* del medio a modelar, sería necesario la toma de muestras en forma *intensiva* sobre todo el territorio analizado, de acuerdo a una malla uniforme, cuya separación entre nodos garantice la precisión requerida. En el caso de un modelo distribuido, tal malla deberá coincidir con la de modelación. Ésta idea choca en la realidad con dos problemas fundamentales: la necesidad de reducir al mínimo indispensable el número de valores muestrales por causas económicas, de accesibilidad al terreno, tiempo de trabajo en campo y de procesamiento posterior.

Asimismo, en el caso de tratarse del análisis de la información disponible las restricciones siguen un razonamiento similar: tiempo de procesamiento y espacio de memoria física utilizado. En este sentido existen diferentes formas de solucionar el problema.

Desde el punto del procedimiento de muestreo, existen dos razones claras para rechazar las estrategias de base probabilística (Webster y Oliver, 1990): costo e ineficacia. Para obtener un nivel de significancia estadística apreciable, es necesario contar con un número mínimo de *grados de libertad*, lo cual implica: reducir el número de variables consideradas o aumentar el número de muestras (o réplicas) independientes, sin olvidar que las mismas deberán cumplir con la hipótesis que se distribuyan según una distribución normal (condición básica en la mayoría de los test y procedimientos estadísticos paramétricos) por lo menos que se distribuyan de forma más o menos asimétrica alrededor de la media. Aún cumplido este caso, un muestreo aleatorio puro o estratificado no existen garantías de obtener una relación significativa en un análisis de regresión o una diferencia significativa entre

valores medios, en el caso de una ANOVA ¹⁴. La falta de una o más variables explicativas es la causa principal.

Se debe recordar, también que las características y cualidades del terreno siguen una *tendencia sistemática*, la cual puede definirse en función de analizar el orden que las variables ambientales siguen en el terreno. Esta forma de análisis y toma de muestras es común en los trabajos de campo de ecología aplicada, donde las variables son medidas a lo largo de los *gradientes ambientales* donde las propiedades analizadas están más desarrolladas. Así, una tercer razón para rechazar los muestreos de base probabilística, es que aquellos no permiten analizar la relación suelo-paisaje, que constituye una de las bases del conocimiento edafológico (véase el concepto de catena). Estas relaciones siguen una orientación preferente, es decir que el desarrollo de esta relación tenderá a un máximo en una dirección y será mínima o menor en su perpendicular. En este sentido, McKenzie y Austin (1993) indican que los diferentes tipos de suelo (y sus propiedades asociadas) en el paisaje se puede delinear por medio de un muestreo estratificado aleatorio a lo largo de vectores de estado (en inglés: “state vectors”).

Por la misma razón anterior, la experiencia permite comprobar que, si bien las propiedades del medio pueden variar de forma continua a lo largo de toda la extensión del terreno, existirán más de un punto en la malla de modelación donde éstos presenten valores iguales o cercanos entre sí, dependiendo de su relación con los principales *gradientes ambientales*. (McKenzie y Austin, 1993). Tales gradientes ambientales estarán dados por la relación de los factores presentes en el medio (suelos, vegetación, litología etc.) y la variación sistemática de las propiedades analizadas.

De todo lo señalado anteriormente, se desprenden varias conclusiones de interés. Ninguna técnica analítica (cuya precisión matemática y estadística está fuera de discusión en esta tesis) garantiza por sí misma los resultados requeridos, tanto en el caso de la modelación distribuida como en cualquier otro estudio del medio físico. En consecuencia, el procedimiento más acorde a ser empleado es el desarrollo de un muestreo que garantice la toma de muestras a lo largo de los gradientes ambientales más marcados. Finalmente, será necesario contar con una técnica que permita asociar a los distintos valores muestrales a cada punto de la malla de modelación con arreglo a la similitud de situaciones observadas durante el proceso de muestreo. En otras palabras: a cada punto de la malla de modelación, se le debe asignar el valor muestral que mejor represente su posición respecto a los gradientes ambientales del medio.

3.4.3.3. La interacción como clave para el muestreo

En el punto anterior se observó la importancia de analizar la presencia y sentido de los gradientes ambientales. En este sentido, el *contraste*, representa la posibilidad

¹⁴Análisis de la varianza. En inglés: “Analysis of Variance”.

de comparar el comportamiento de una misma cualidad bajo diferentes estados de las características que la explican, siendo éste la clave para la interpretación y la condición suficiente y necesaria para su estimación. Esto da lugar a conocer cuales son las diferentes situaciones con las cuales es posible estimar con precisión una cualidad, bajo un nivel de incertidumbre conocido, acotado y reducido.

Para explicar el significado e importancia del contraste, resulta práctico hacerlo mediante un grupo de ejemplos; expuestos a continuación.

En la Figura 3.4 se reproduce la situación *ideal y ficticia* en la cual existen dos regiones de terreno, cuyas únicas diferencias entre sí se basan en el tipo de suelo y cubierta vegetal. Una de ellas posee un tipo de suelo A (sA) y cubierta A (cA), mientras que la otra posee un suelo tipo B (sB), y cubierta B (cB). Si en ambas regiones se estima una misma cualidad hidrológica (mediante una correcta toma de muestras), los resultados obtenidos mostrarán las diferencias entre regiones interiormente homogéneas. La reproducción de estos resultados serán aplicables a situaciones iguales o similares a las que le dieron origen, es decir otras regiones donde se den las mismas combinaciones de suelo y cubierta, respectivamente.

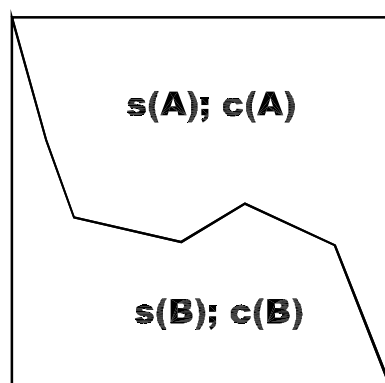


Figura 3.4: Dos regiones

Sabiendo que en la realidad existen con mucha mayor frecuencia combinación de factores, que situaciones puras, la información así obtenida resulta válida pero insuficiente al momento de realizar predicciones.

En la parte superior de la Figura 3.5 simboliza otra situación ideal y ficticia en la cual, en el mismo terreno se observan dos tipos diferentes de suelos (sA y sB), y de cubierta vegetal (cA y cB), cuyos límites espaciales no son coincidentes entre sí. De seguirse el mismo esquema que en el caso anterior, la misma cualidad sería medida o estimada en función de considerar la variabilidad de suelos, manteniendo como “constante” la otra variable, o viceversa. Los resultados obtenidos serían muy

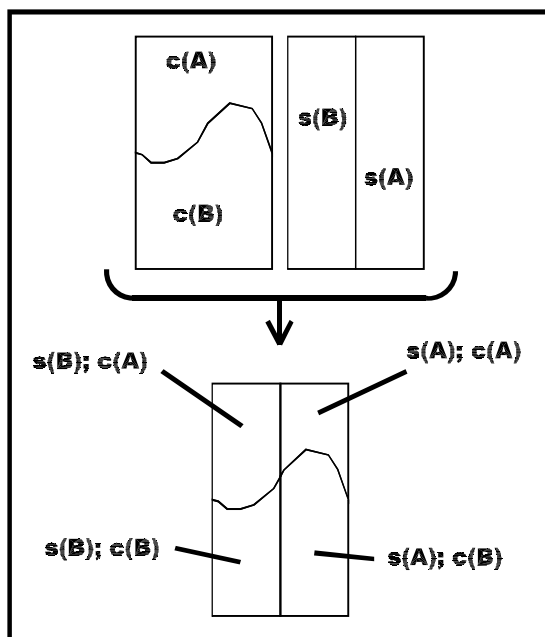


Figura 3.5: Interacción entre regiones

similares a lo que ya consta en los resultados previos, por lo cual se lograría, en el mejor de los casos, comprobar lo que es muy posible que ya se conozca del tema. Si, en vez de tomar en cuenta las variables por separado, éstas son consideradas en forma conjunta, se arriba a la situación señalada en la parte inferior de la Figura 3.5. Allí, se tomaron en cuenta las cuatro combinaciones posibles de las variables señaladas anteriormente.

Si ahora la cualidad es estimada o medida en base a la toma de muestras de estas cuatro subdivisiones, los resultados permitirán conocer:

- i) Las diferencias observadas en la cualidad al variar el tipo de suelos, cuando el tipo de cubierta vegetal es el mismo ($(sA; cA)$ y $(sB; cA)$, ó $(sA; cB)$, y $(sB; cB)$, respectivamente).
- ii) Las diferencias observadas en la cualidad al variar el tipo cubierta vegetal, cuando el tipo de suelo es el mismo ($(sA; cA)$ y $(sA; cB)$, ó $(sB; cA)$, y $(sB; cB)$, respectivamente).
- iii) Las diferencias observadas en el valor de la cualidad cuando se comparen tipos de suelos constantes o tipos de cubierta constante ($(sA; cA)$, vs. $(sA; cB)$ ó $(sB; cA)$ vs. $(sB; cB)$).

Así, mediante la organización de las experiencias, se obtiene:

- a) Información sobre el caso particular analizado, lográndose discriminar en forma clara las situaciones observadas en la realidad.
- b) Criterios de análisis y predicción que aporten información adicional factible de ser incorporada a las normas de razonamiento general, provenientes de las relaciones *sistemáticas*.

Finalmente, se deduce que, un cambio razonable en el enfoque de análisis permite contar con una mayor ductilidad en los resultados, y mayor capacidad de predicción.

3.4.4. El análisis paramétrico

Como ya se adelantó, la etapa paramétrica del análisis tiene por fin transformar la información fisiográfica en valores matemáticos para ciertos parámetros seleccionados y luego elaborar una síntesis sobre el funcionamiento y relaciones mutuas de las componentes del terreno. En consecuencia, el análisis paramétrico consta de diferentes etapas: parametrización, homogeneización y síntesis.

Se debe recordar que los procesos hidrológicos tienen lugar a partir de la acción de los fenómenos atmosféricos sobre el terreno, es decir que no se trata de procesos sintéticos o artificiales. Tanto la intercepción, la infiltración, así como el transporte y almacenamiento del agua en el suelo y su substrato, son mecanismos que provocan la generación de escorrentía superficial y subterránea en el terreno. Obtener la información necesaria para analizar su evolución, es el primer paso a dar en el proceso de modelización y predicción de caudales hídricos en cuencas hidrográficas.

En numerosas ocasiones, los parámetros buscados no son factibles de ser medidos de forma directa por distintas causas (dificultad, economía, etc.), o sólo pueden ser estimadas (como la conductividad hidráulica ¹⁵). En este caso se procede a la utilización de funciones de transformación y/o valores de referencia, ya mencionados anteriormente.

En una segunda etapa, una vez asignados los valores a los parámetros, el análisis puede concentrarse sobre la interpolación y suavización espacial de los resultados. Por otra parte, esta etapa se relaciona directamente con lo mencionado anteriormente en la etapa fisiográfica: la elaboración de reglas de pertenencia (en inglés: "membership functions") con el fin de distribuir valores de parámetros en diferentes sectores del terreno.

Finalmente, el objetivo de esta etapa, es acceder al análisis y síntesis cuantitativa de los valores de los parámetros analizados. Sobre este tema existe una extensa experiencia, fundamentalmente desde el punto de vista de la estadística aplicada al medio natural (como ejemplos valen: Lewis (1977); Davis(1986; Kent y

¹⁵Se debe recordar que la conductividad hidráulica surge de la aplicación de la ley de Darcy y de tener en cuenta ciertos supuestos hidráulicos, la presencia de un medio poroso y la ausencia de flujo turbulento

Coker(1994); Westman(1985); etc.). Los resultados son diferentes: desde valores sintéticos, esquemas o modelos, etc.

3.4.4.1. La asignación de valores

Como ya se adelantó, el primer lugar de esta etapa se encuentra la de parametrización, mediante la cual se asignan valores matemáticos concretos a las distintas unidades o rasgos fisiográficos delineados en el caso anterior. Dichos valores podrán ser variables discretas o continuas, según el parámetro evaluado o el tipo de análisis a realizar posteriormente. Como ejemplo de parametrización con variables discretas, se puede mencionar que dado un conjunto de rasgos lineales de origen tectónico (fallas, diaclasas, etc.) dispuestos en una malla regular que divida al terreno en diferentes celdas, la variable “presencia de fracturas” podrá tener el valor “1” si la celda analizada está afectada por este rasgo tectónico y “0” si no lo está. Un ejemplo de parametrización con variables continuas, es la asignación de un valor de conductividad hidráulica media a cada unidad cartográfica de un mapa de suelos.

La parametrización puede llevarse a cabo por caminos alternativos y no excluyentes entre sí:

- a) Mediante la utilización de funciones de transformación, por medio de las cuales el valor de un cierto parámetros se obtiene como resultado del empleo de funciones matemáticas o reglas empíricas.
- b) Mediante el desarrollo de un esquema de toma de muestras en campo, procesamiento y elaboración de los valores de los parámetros analizados (ejemplo: contenido de cierto nutrientes en el suelo, densidad de vegetación, grado de pedregosidad del suelo, etc.).
- c) Mediante valores de referencia, es decir, un conjunto de *valores posibles* para los parámetros a utilizar en un cálculo concreto. Otros autores se refieren a este tema como la estimación *a priori* de parámetros de modelación. Ejemplo: los valores de referencia de conductividad hidráulica propuestos por Freeze y Cherry(1979), ampliamente mencionados en la literatura.

Lo expresado anteriormente, merece un análisis más detallado, que se desarrolla a continuación.

3.4.4.2. El análisis paramétrico y las funciones de transferencia

La creciente necesidad de evaluar temas tales como la aptitud de la tierra para el desarrollo de cultivos, el impacto ambiental, etc., ha impulsado el desarrollo de técnicas mediante las cuales convertir las expresiones ordinales a una forma

común con la cual analizar paramétricamente los resultados. Dicha técnica se basa en definir una *función de transformación* (Conesa, 1997). En todos los casos mencionados, se parte del mismo tipo de información ordinal y por transformación, se obtiene un valor concreto factible de ser comparado y analizado en forma paramétrica. Originalmente, este tipo de método ha sido empleado en diferentes épocas y bajo distintas formas.

Un ejemplo claro de utilización de función de transferencia está dado por el modelo DRASTIC (Aller, et al.; 1987). Este modelo surge como una alternativa útil para la valoración de la vulnerabilidad del terreno a la contaminación del medio acuífero subterráneo. El modelo fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US. EPA ¹⁶). Técnicamente, se trata de un sistema estandarizado de evaluación del potencial de contaminación de aguas, en medios acuíferos. En la práctica el modelo se traduce en un proceso de superposición y ponderación de diferentes capas de información, las cuales en conjunto darán como resultado un valor o índice que indique el grado de vulnerabilidad del terreno analizado. El término “DRASTIC” es el acrónimo de los siete mapas temáticos utilizados por el modelo (profundidad del nivel acuífero, recarga, características de medio acuífero, características del suelo, topografía, características de la zona no saturada y conductividad hidráulica del medio acuífero). El proceso de asignación de valores numéricos a cada capa y de su ponderación se lleva a cabo mediante el empleo de su correspondiente escala de valores. Cada escala de valores es en si misma una función de transformación según los estándares elaborados por la US EPA (Aller, et al.; 1987), que reemplaza con valores numéricos a las diferentes características de cada una de las capas analizadas.

Tal vez, la función de transformación mas utilizada en la Hidrología tradicional es la utilizada en el Método de la Curva Número (SCS, 1964) para la estimación de la capacidad de escurrimiento del terreno superficial. En España existe una adaptación particular del método original (Ferrer, 1993; MOPU, 1990). En ambos casos, el procedimiento se basa en la clasificación del tipo de suelo y su forma de laboreo (eventualmente el relieve) con el fin de asignarle un valor de “Curva Número” a fin de elaborar una estimación de la cantidad total de escurrimiento superficial en una cuenca. La función de transformación en este caso es una tabla de equivalencias entre el suelo y uso de suelo (eventualmente topografía) y el valor de Curva Número. Ejemplos de utilización de este métodos son comunes en la literatura, citándose los trabajos de Rallison y Miller (1982) y Colosimo y Mendicino (1996). De la misma forma se destacan los trabajos en los cuales se han propuesto nuevas interpretaciones, sus límites y posibles modificaciones al mismo. Otros ejemplos que se pueden mencionar son los propuestos por Chen (1982), Hope (1982), Hjelmfelt et al (1982), Bales y Betson (1982), Hjelmfelt (1991), Boszany (1989), Yu (1998); Steenhius et al. (1995), Bonta (1997) y Chong y Teng (1986).

¹⁶United States Environmental Protection Agency

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y enfatizando el rol del criterio y conocimiento del operador, la presencia de literatura y experiencia en este tema permite considerar a las funciones de transformación como una herramienta útil para analizar la existencia y tipo de variaciones sistemáticas, bajo el compromiso de definir correctamente su validez conceptual y su campo de aplicación.

En general, las funciones de transformación resultan inicialmente atractivas, aunque en la mayoría de los casos corren el peligro de ser subjetivas, y que su validez no sea universal (Westman, 1985; p. 229).

3.4.4.3. Funciones de pedotransferencia

Dentro de las funciones de transferencia se destacan las funciones de pedotransferencia (en inglés: “pedotransfer functions”, también PTF’s). Por su aplicación creciente en el campo de la modelación hidrológica y en el análisis de suelos, merece una atención particular en esta Tesis.

Si bien el origen de las funciones de pedotransferencia es antiguo, han tomado importancia en las últimas décadas, ya que su aplicación ha superado la frontera de las técnicas agronómica del riego y drenaje para ser aplicados a problemas de contaminación y modelos de flujo y transporte de sustancias en el suelo.

Wösten et al. (1995 y 2001), Burrough et al. (1994), Leij et al. (1997) y Tietje y Hennings (1996) indican que las características y cualidades hidráulicas del suelo requieren de continuas mediciones, y cada vez es necesario un mayor detalle, contraponiéndose con las facilidades técnicas y económicas con que se cuenta normalmente. Es a consecuencia de esto que surgen las funciones de pedotransferencia (su sigla en inglés: “PTF”) como un medio para estimar estas características o cualidades hidráulicas basándose en el muestreo de características básicas, como materia orgánica, textura, etc. Estas últimas son más fáciles y rápidas de medir. En el mismo sentido, Sinowsky et al. (1997), indican que las PTFs son útiles para llevar a cabo la simulación del comportamiento hidráulico, utilizando modelos.

En cuanto a su validez espacial, esta técnica ofrece ventajas y desventajas, tal como lo destacó Sinowsky et al. (1995). Por una parte, las características hidráulicas sólo pueden ser estimadas en forma puntual, ya que los datos son necesariamente puntuales. Por otra parte, los lugares donde se pueden estimar dependen generalmente de un cierto tipo de clasificación de suelo o criterio de separación, tal que genere unidades cartográficas, dentro de las cuales se pueda desarrollar el análisis.

Desde el punto de vista de la continuidad de sus resultados, Wösten et al. (1995) definen dos tipos de PTFs: continuas y discretas. Las PTFs continuas son las que expresan a las propiedades hidráulicas como funciones continuas y los valores que necesita (textura, por ejemplo) deben estar expresados de la misma forma (como porcentaje, por ejemplo). En cambio, las PTFs discretas son funciones cuyos valores

expresan sus valores mediante intervalos y hacen referencia a propiedades expresadas también por clases (por ejemplo: "textura: franco-arcillosa"). Éstas también son conocidas como las reglas de pedotransferencia (pedotransfer rules o PTR, según Batjes (1996) Ambos tipos de funciones presentan ventajas y desventajas. Las PTFs discretas son más fáciles de determinar en cuanto al número de valores diferentes que se requieren para describir todo su rango. Sin embargo los resultados dependerán del criterio de separación entre clases. Las PTFs continuas requieren de un mayor número de muestras para describir todo el rango de trabajo, pero permiten obtener valores de forma continua.

En función de su formulación, Tietje y Hennings (1996) indican, por otra parte que existen dos tipos de PTFs:

- i) Las que estiman los valores en base a regresiones no lineales o algún tipo de ajuste estadístico o de optimización (por ejemplo: Sperry y Perce, 1995; Mbagwu, 1995; Batjes, 1996; Rawls et al; 2001; Wösten et al.; 1999; Bernardier et al.; 1991; Harden, 1988; Williams y Ahuja, 1993; Williams et al., 1992; Cook y Broeren, 1994; Alexander y Skaggs, 1985; Rawls, et al., 1982; y Clapp y Hornberger, 1978),
- ii) Las que obtienen valores a partir de plantear argumentos y ecuaciones de base física más o menos empírica (por ejemplo: Hopmans y Overmars, 1986; Shouse, et al., 1995; Voltz y Goulard, 1994; Van Genuchten et al., 1991; Zhang y Van Genuchten, 1994; Michiels et al., 1989; Bohne et al; 1993; Lenhard et al, 1989, Brakensiek et al , 1981, Moral y Giráldez, 1995).

Usualmente, las funciones productos de normas empíricas derivadas o asociadas a la física de suelo son PTFs continuas, mientras que las otras pueden ser tanto continuas como discretas.

La forma de ajuste de las PTFs derivadas o asociadas a la física de suelo es, normalmente, por optimización de una función objetivo que minimize el error de estimación. Sin embargo, Scheinost et al. (1997) así como Vereecken et al. (1989) propusieron el ajuste de este tipo de funciones de forma tal que los coeficientes a ajustar deriven de la distribución granulométrica del suelo, como intento de agregar mayor sentido físico a la función.

La mayoría de las PTFs han sido diseñadas para su utilización en Agronomía, para luego ser aplicadas en Hidrología y en la modelación del medio no saturado, en estudios de contaminación y transporte de nutrientes. Las PTFs han sido utilizadas en el análisis de problemas de escala y de estimación espacial del estado hídrico del suelo (Gimenez et al; 1997; Voltz y Goulard, 1994; Burrough et al. (1994); Shouse et al. (1995, entre otros). Sin embargo existen algunos ejemplos del estudio de PTF's en el campo de la Geotecnia, como el de Timjum et al. (1997), y Leong y Rahardjo (1997a y 1997 b). Cabe aclarar que las PTFs son fuentes de información, pero no

pueden reemplazar a la realidad, tal como lo destacaron Sobieraj et al. (2001). La heterogeneidad del medio supera ampliamente la explicación del fenómeno, respecto a la aportación de las PTFs (Chen y Weather, 1999).

3.4.4.4. El análisis paramétrico y los valores de referencia

Es necesario recordar que, tanto en el diseño como en simulación o calibración de modelos hidrológicos, es de suma importancia poseer una idea clara “a priori” del rango de valores de los parámetros físicos del terreno que afectan los resultados a obtener.

Al inicio de una aplicación hidrológica, es necesario contar con un conjunto de *valores posibles* para los parámetros a utilizar en un cálculo concreto. Éstos son denominados aquí *valores de referencia*. Otros autores se refieren a este tema como la estimación *a priori* de parámetros de modelación. Este tipo de valores son frecuentes de encontrar en la literatura, sin embargo, normalmente tanto el tipo y cantidad de casos señalados, así como las unidades con que se expresan no suele responder a un esquema uniforme. Por el contrario, las citas son dispersas y normalmente se expresan en diferentes unidades de medida.

Tomando en cuenta un conjunto de valores de referencia adecuados, es posible elaborar uno o más *escenarios básicos* en cada uno de los cuales:

- i) *Organizar* y analizar el total de la información disponible con que se cuenta.
- ii) *Elaborar* estrategias futuras para el refinamiento y/o ampliación de la misma.

Así, dada una cuenca vertiente o territorio a analizar, los valores de referencia sirven para situar a quien trabaja en ella dentro de un espacio *limitado* de valores físicos, con los cuales organizar las etapas de trabajo posteriores (análisis de la información, toma de muestras, simulación, modelización, etc.).

En consecuencia, los valores de referencia *contribuyen* a:

- a) *Valorar* la calidad de la información con que se cuenta, por comparación entre los valores obtenidos en una toma de muestra y los valores más frecuentemente hallados en terrenos o situaciones similares.
- b) *Elaborar* una *pre-calibración* de los parámetros hidrológicos necesarios, cuando se carece de valores muestrales, o su densidad es baja respecto a la requerida en la operación de diseño, simulación y/o calibración.
- c) *Diseñar* la estrategia para una futura toma de muestras, sobre la base de las necesidades del trabajo y los desvíos entre los valores hallados en la situación que se analiza y los de referencia.

Sin embargo, no debe olvidarse que los valores de referencia son solamente un *medio* para realizar una *composición previa* de la situación que se analiza. En consecuencia, dichos valores *no son absolutos ni definitivos*, pues no pueden reemplazar a la realidad muestras del terreno concreto que se analiza.

En síntesis: un conjunto de valores de referencia permiten localizar un *punto de partida* y un *entorno concreto* dentro del cual desarrollar un estudio hidrológico.

3.4.4.5. El análisis paramétrico y la información externa

Los valores de referencia están directamente relacionados a la integración de información externa. Esto es la utilización y procesamiento de información no procedente del área de estudio pero directamente relacionada al proceso y variables analizadas. Por otra parte, la integración de información externa es un proceso que no se limita a la utilización de valores de referencia, sino que abarca el total de la presente etapa, donde el operador procede a la constante comparación de resultados y la elaboración o modificación del análisis sobre la base del conocimiento de situaciones similares.

En el análisis paramétrico, como ya se puede intuir, la integración de la información resulta de vital importancia de cara a los resultados que se pretenden obtener, lo cual tiene particular sentido en este trabajo de Tesis, donde se prioriza la obtención y aprovechamiento de la información disponible.

En lo que respecta a la robustez de los resultados, es importante utilizar el conjunto de información disponible que sea de utilidad práctica en el desarrollo del trabajo, independientemente de la forma en que ésta se halle expresada. En este sentido, Taraknik y Trautwein (1992; pp.777-778). expresaron las bases de un esquema conceptual, aplicado a un caso concreto de prospección y explotación de recursos naturales. Tal procedimiento se basa en el diseño de un modelo geológico conceptual, sobre el cual plantear y comprobar hipótesis y obtener resultados económicamente satisfactorios. Este tipo de modelo se basa en tres tipos de información:

- i) La información proveniente estrictamente del sector analizado (imágenes de satélite, mapas, bases de datos, toma de datos en el campo, etc.)
- ii) Los conceptos elaborados a partir de la observación del sector analizado y de la bibliografía específica existente (en inglés: “ancillary information”).
- iii) Los conceptos e hipótesis generales (en inglés: “assumptions”), que constan en la literatura clásica del tema. Éstas provienen del estudio de diferentes situaciones, la opinión de numerosos autores, en diferentes etapas del desarrollo de los conocimientos.

De esta forma, estos autores logran destacar y describir las relaciones sistemáticas, observadas en el área de trabajo, a partir de observaciones específicas, la infor-

mación directamente relacionada a ellas y el aporte de conceptos y referencias adicionales, que permiten optimizar su procesamiento y análisis.

Como consecuencia, lograr analizar la información clara y sintéticamente según los fines que se persiguen, contribuye a la robustez del trabajo. Se evita así incrementar innecesariamente la complejidad de los fenómenos analizados y contribuye a los beneficios de los resultados.

3.4.4.6. La estimación cuantitativa de la variabilidad espacial

Uno de los objetivos básicos por el cuales se desarrolla el análisis paramétrico es el *análisis de la variabilidad espacial*. La variabilidad espacial puede estimarse a partir de un muestreo continuo o discreto. En el muestreo continuo, se toman muestras de todos los puntos del terreno. Un ejemplo puede ser la medición utilizando un sensor remoto para la medición de la temperatura de la superficie terrestre. En el muestreo discreto, sólo una cierta cantidad de muestras se toman del terreno. Así se analiza sólo un subconjunto de la población.

A partir de un muestreo, se puede adquirir información que explique la variabilidad espacial de una determinada propiedad del terreno. Tal información puede analizarse con independencia o no de la posición que cada dato ocupa en el espacio. En el primer caso, será importante estimar el valor de la tendencia central de los datos y el grado de dispersión existente en la muestra alrededor de dicho centro. La medición de la tendencia central se realiza utilizando la media, mientras que la varianza se utiliza normalmente como medida de dispersión. Otras mediciones de dispersión alrededor de la media, son el rango, rango intercuartílico, y el coeficiente de variación.

Si en el proceso de muestreo se han obtenido valores de más de un atributo, entonces se puede desarrollar análisis en los cuales sintetizan las relaciones mutuas existentes entre aquellas. Con esta información, es posible, por ejemplo, desarrollar análisis de correlación y regresiones múltiples. Éstas, junto con otras técnicas como las de componentes principales, agrupamientos (en inglés: “cluster analysis”) o discriminantes, son las comúnmente utilizadas en la exploración de datos y la generación de resultados. En este sentido, Kent y Coker (1994) presentan una excelente guía metodológica para el estudio de la vegetación y Davis (1986) en el estudio de temas de Ciencias de la Tierra.

Si el análisis se realiza tomando en cuenta la posición espacial de los datos, el análisis permite agregar variantes y nuevas técnicas a las ya apuntadas. En primera instancia, la posición puede ser utilizada como una variable más en análisis multivariados, como los de regresión, pudiéndose desarrollar, por ejemplo, superficies de tendencia de diferente grado (Davis, 1986); o ser utilizadas como variable explicativa en el caso de un análisis de componentes principales. De esta forma, la información adicional utilizada (posición espacial) produce resultados similares a

los anteriores en cuanto a su carácter de síntesis. Por otra parte, diferentes autores han desarrollado la temática del análisis de datos respetando su naturaleza espacial. Lewis (1977) y Davis (1986) describen un conjunto de estadísticos univariados adaptados al análisis de la distribución de atributos geográficos puntuales o lineales de un mapa. Además de lo expuesto, Davis (1986) explica algunos procedimientos para la búsqueda de patrones espaciales en la información espacial y para la descripción y análisis de formas. En todos los casos, los resultados sintetizan en un valor numérico la distribución espacial del atributo analizado.

La estadística univariada presenta limitaciones en cuanto a su “habilidad” para describir la variabilidad espacial de la población muestreada, porque no provee de información respecto a la correlación espacial entre muestras en cada punto de muestreo. La estructura espacial en una población puede ser estimada utilizando las herramientas desarrolladas en Estadística (Journel y Huijbregts, 1978; Isaaks y Srivastava, 1989; Cressie, 1993). La teoría que se utiliza para el desarrollo geoestadístico descansa sobre el concepto de *variable regionalizada*. Este tipo de variable posee propiedades intermedias entre las variables aleatorias puras y las variables determinísticas puras (Davis, 1986). Típicos ejemplos son cualquiera de las variables que describen fenómenos naturales, como el contenido de almacenamiento hídrico del suelo. En Geoestadística, una variable regionalizada posee un valor en cada punto de la región estudiada. Al contrario de lo que sucede con las variables aleatorias puras, las variables regionalizadas poseen continuidad espacial, aunque la naturaleza de la variación espacial es compleja y no es posible explicarla exclusivamente por métodos determinísticos. Para describir a este tipo de variables es necesario analizar su forma, orientación y distribución espacial. A partir de aquí, surge la definición de una herramienta sumamente útil para la descripción de patrones de distribución espacial: *el variograma*.

El variograma, ha sido ampliamente utilizado como herramienta para cuantificar el fenómeno de la variabilidad espacial durante mucho tiempo. Distintos autores han explicado detalladamente su utilización así como los principios que rigen a la Geoestadística en su conjunto (Journel y Huijbregts, 1978; Cressie, 1993; Goovaerts, 2000, entre los más destacados).

El variograma ha sido mencionado en numerosa cantidad de textos. En esta ocasión se hará una breve mención de su definición, con la única finalidad de aportar claridad en el trabajo posterior.

Dada una variable regionalizada estacionaria Y , con una media conocida m y una varianza σ^2 , válidas para todas las u localidades de estudio, una vez analizada la variable para detectar y eliminar la tendencia espacial que pueda afectarla, el variograma se define como:

$$2\gamma(h) = \text{Var}[Y(u) - Y(u + h)] = E[Y(u) - Y(u + h)]^2 \quad (3.1)$$

En otras palabras, el variograma representa al valor esperado del cuadrado de la

diferencia entre un valor dado $\gamma(u)$ y otro de la misma variable, separado en el espacio por un vector de longitud h . El semivariograma, $\gamma(h)$ es la mitad de un variograma, $2\gamma(h)$.

El variograma es una medida de variabilidad. Aumenta a medida que la muestra se hace más heterogénea. Gringarten y Deusch (2001) explican que resulta muy conveniente, a los efectos de la comprensión del problema, se puede relacionar esta medida de variabilidad con el concepto de covarianza, el cual es una medida de la similitud entre elementos de una muestra. Así:

$$C(h) = E[Y(u) * Y(u + h)] - m^2 \quad (3.2)$$

Por definición, la covarianza en $H = 0$, $C(0)$ es la varianza σ^2 . La covarianza $C(h)$ es 0 cuando los valores separados una distancia h no están linealmente correlacionados.

Los mismos autores destacan que se puede demostrar que, desarrollando el cuadrado de la ecuación 3.1, se arriba a la relación entre el semivariograma y la covarianza:

$$y(h) = C(0) - C(h) \quad (3.3)$$

Estas relaciones son las bases de la interpretación del variograma. Así, la meseta (en inglés: “sill”) del variograma representa a la varianza, la cual corresponde al valor del variograma cuando la correlación es nula. Por otra parte, la correlación entre $Y(u)$ y de $y(u + h)$ será positiva o negativa según si el valor del variograma es inferior al de la meseta o no (Gringarten y Deusch; 2001).

El variograma es una medida de lo que normalmente se denomina “variabilidad geológica” o la variabilidad del terreno, la cual no es igual en todas las direcciones (horizontales y/o verticales). Aquí es donde toma importancia la interpretación del variograma. El comportamiento del variograma permite detectar y valorar diferentes características del medio, las cuales se pueden resumir en tres elementos claves:

- a) Aleatoriedad o falta de correlación espacial: ciertas variaciones del terreno aparentan no tener correlación espacial, A ciertas escalas, sin embargo estos procesos son altamente no lineales y caóticos, generando variaciones que no poseen estructura de correlación espacial. Sin embargo, estas variaciones aparentemente aleatorias son el resultado de procesos geológicos determinísticos. comúnmente, solo una pequeña porción de la variabilidad se puede explicar como de origen aleatorio.
- b) Disminución de la correlación espacial con la distancia: muchos procesos deposicionales transmiten correlación espacial a las propiedades físicas de los materiales. La magnitud de la correlación espacial decrece con la distancia

de separación hasta alcanzar un valor en el cual la correlación es nula en el rango de correlación (range). En el terreno el rango del variograma varía según la dirección. En cuerpos sedimentarios, en concreto, el rango vertical será mucho menor que el horizontal y éste será máximo en la dirección de progradación de la forma sedimentaria. Se asocia a este fenómeno el término de “anisotropía geométrica”

- c) Ciclicidad geológica: los procesos geológicos en general se repiten en el tiempo, imprimiendo al terreno variaciones de naturaleza cíclica en sus propiedades. Su reflejo en el variograma es la existencia de correlaciones positivas que varían a negativas dentro de la longitud de escala del ciclo geológico, para luego volver a variar positivamente de forma sucesiva.

Sobre la base de lo anterior, la interpretación del variograma implica analizar diferentes elementos indicados por el variograma, con los cuales elaborar conclusiones respecto a la variabilidad espacial (y/o vertical) del medio. Tales problemas son, básicamente:

- a) La variación a pequeña escala: asociada al inicio del variograma. Se trata del “efecto pepita” (en inglés: “nugget effect”), el cual se manifiesta como una discontinuidad al inicio del variograma, correspondiente a la variación en distancias cortas de la variable analizada. En un variograma experimental, pueden observarse frecuentemente este tipo de problemas, debido a errores de medición o que las estructuras geológicas analizadas tienen estructuras con un rango de correlación superior al del muestreo.
- b) la variación a escala intermedia y la anisotropía geométrica. corresponde a un fenómeno con diferentes rangos de correlación espacial, según la dirección analizada. Así, el análisis se centrará en la disminución de la correlación espacial en cada una de las analizadas.
- c) Variación de mayor escala: se asocia con estructuras del terreno que no son completamente abarcadas por el muestreo, así como los fenómenos de periodicidad, elemento indicador de la repetición cíclica de características del terreno.

3.4.4.7. El análisis paramétrico y la interpolación

Tal como lo expresan Blöschl y Sivapalan (1995), distribuir un valor en el tiempo o el espacio implica cierta forma de interpolación. En este sentido se han realizado numerosas experiencias en el campo de interés de esta tesis. Una revisión detallada de los métodos de interpolación más utilizados en ciencia la presenta Isaaks y Srivastava (1989).

Resulta interesante la diferencia que señala Goovaerts (2000) entre estimación y simulación en el caso de las propiedades del suelo. Según el autor: “Las aproximaciones por estimación o simulación son formuladas con la selección de un conjunto de valores de atributos que son óptimos para un criterio dado, siendo ambas aproximaciones conflictivas”. Mientras la estimación tiende a minimizar criterios locales tales como la varianza local del error, la simulación estocástica trata de reproducir estadísticas globales tales como el histograma o el semivariograma. Una combinación de ambos es lo esperable, teniendo entonces que ponderar uno y otro criterio.

Dentro del campo de la Geología destacan autores como Journel y Huijbregts (1978), Davis (1986) y Rosenbaun, et al. (1997).

En el ámbito del estudio cuantitativo del suelo y de variables asociadas a él, incluyendo hidrogeología somera, (también llamado pedometría por Webster (1994) se han ensayado fundamentalmente tres vías:

- i) Krigeado (en inglés: “krigging”). Como ejemplos se pueden mencionar los casos de Stein et al. (1991) y Voltz y Goulard (1994), en la interpolación del déficit de humedad del suelo; Bregt, et al. (1987) en la elaboración de mapas temáticos a partir de información puntual; Odeh, et al (1994) en la predicción de propiedades del suelo utilizando variable topográficas como auxiliares; Bernárdez y Rey Benayas (1992) en el análisis de la distribución de calidad de agua y vegetación en humedales españoles; Gascuel - Odoux y Boivin (1994) y Brus (1993) en el análisis de la problemática del muestreo óptimo necesario ; Stein (1994) en el procesamiento de información puntual disponible; Bierkends y Burrough (1993) en la aplicación del krigeado indicador y variables indicadoras, ; Moser y Machiavelli (1996) adaptando la metodología a un SIG ¹⁷ de aplicación hidrológica, y Finke (1992) para la elaboración de estimaciones de propiedades del suelo en la modelización del transporte de solutos en suelos.
- ii) Aplicación de la teoría difusa (en inglés: “fuzzy logic”). Como ejemplos se pueden mencionar los casos de McBratney y Odeh (1997) en el análisis de la teoría y su aplicación al mapeo de suelos, Cazemier, et al. (2001) para la estimación de valores de capacidad de almacenamiento hídrico de suelos; y Franks, et al. (1998) en el análisis y estimación de ares de cuenca saturadas según el modelo TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979).
- iii) Un tercer tipo, más heterogéneo, en el cual predominan la regresión múltiple de datos puntuales. Estos procedimientos se han ensayado de forma aislada o combinando dos tipos de procedimientos . Así, Bishop y McBratney (2001) destacan que la combinación de krigeado y regresión múltiple es la vía operativamente más correcta para la estimación de propiedades de suelos; Knotters

¹⁷Sistema de Información Geográfica.

et al (1995), Odeh et al. (1995) y Bourennane et al. (2000) orientaron sus experiencias en esa dirección. Finalmente, autores como Bonham - Carter et al. (1988), Abbaspour y Moon (1992), Walsh et al. (1999); McKenzie y Ryan, (1999); se orientaron a utilizar diferentes variantes de la regresión múltiple para la interpolación de valores puntuales y variables del terreno.

Revisiones de la aplicación de estos métodos han sido elaboradas por Myers (1994), McBratney et al. (2000) y Heuvelink y Webster (2001).

Otras variables relacionadas a la modelación hidrológica que han sido analizadas mediante interpolaciones son datos climatológicos (por ejemplo: Maselli et al. (1998) e información topográfica (Moore et al. (1993).

En este último tema, la reciente necesidad de depuración de las técnicas de modelación de la topografía y elaboración de modelos de elevación del terreno han dado un gran impulso a este tema. Así, surgen diferentes ejemplos de esta actividad: Carter, (1988), Tsay (1998), Giles y Franklyn (1996), Sole y Valanzano (1996) y, especialmente, Meijerink, et al. (1994).

3.5. La herramienta: el Sistema Geográfico de Información

Particularmente a partir de los años 90, el conocimiento los SIG (Sistemas de Información Geográfica) se ha extendido por el mundo, convirtiéndose en una herramienta de obligado uso en numerosas disciplinas científicas y técnicas.

Desde un punto de vista práctico, el propósito de un SIG es el de convertir a los datos geográficos en información útil para responder a preguntas de la vida real (ERDAS, 1994; p. 332). Como tal, el SIG representa a un tipo particular de tecnología por la cual, en el contexto cartográfico, es posible obtener resultados concretos a problemas reales, tomando en cuenta una serie de criterios específicos. En este sentido, Bosque et al. (1994; pp.:4) expresan que *un SIG es un intento, más o menos logrado, según los casos, de constituir una visión esquemática de una realidad compleja.*

En la actualidad, existen Sistemas de Información Geográfica de amplia distribución mundial, por ejemplo: ERDAS; IDRISI, GRASS, ArcInfo, MapInfo etc.

Además de la literatura básica dedicada a este tema (por ejemplo, en España: Bosque, 1992; Bosque, et al., 1994; Barredo, 1996), este tema es abordado en numerosas obras y artículos afines a disciplinas relacionadas con el medio físico. En éstos, los SIG son considerados como una herramienta por medio de la cual se obtienen resultados concretos a los problemas abordados. Como ejemplo, puede citarse a Goodinson (1985); Martínez, et al. (1988); Perez, et al.; (1991), Gupta

(1991); Drury (1993); Mitchell (1991); Meijerink, et al. (1994); Van Niekerk y Heritage (1994); etc.

Respecto a estos sistemas, se describen a continuación los principales puntos de interés general, según la literatura y directamente relacionada con la temática del trabajo.

3.5.1. Definición

Con el objeto de fijar los alcances de un SIG, Meijerink, et. al (1994) expresan con claridad el significado de los elementos que componen esta herramienta:

- i) En primer lugar, al mencionar la expresión “sistema” se hace referencia a la integración del usuario y la máquina. Mediante esta combinación se realiza una tarea específica (toma de decisiones, cálculos hidrológicos, diseño de obras civiles, etc.).
- ii) El término geográfico hace entender que los datos que se analizan en el sistema se localizan en el espacio, según un sistema de coordenadas específico. De esta forma, los datos son expuestos y analizados en función de su localización dentro de un espacio acotado. La referencia espacial también afecta a los resultados o productos, los cuales son expuestos fundamentalmente, bajo la forma de mapas.
- iii) Por último, la palabra información, en este contexto, responde a la definición expuesta en apartados anteriores. De esta manera, la información que es tomada en cuenta, adquiere la jerarquía del material con el cual el sistema producirá los resultados necesarios.

En consecuencia, un SIG constituye mucho más que una base de datos georreferenciada. Es, en un mejor sentido del término, una herramienta que permite al analista plantear y resolver diferentes escenarios virtuales de una determinada región, a fin de lograr la mejor solución para un problema específico (Bosque, 1992).

Sobre la base de estos conceptos, se constituye un instrumento de trabajo, el SIG, con el cual (Bosque, 1992; Meijerink et al, 1994; Barredo, 1996):

- a) Obtener información, en forma manual o mediante digitalización, escaneo, etc.
- b) Almacenar y gestionar la información obtenida, mediante la elaboración de listas y archivos. Como resultado de este proceso se distinguirán los diferentes grupos o elementos que la componen, y cada uno de éstos podrán ser localizados de un modo económico y eficiente.
- c) Transformar a la información original mediante el vínculo de sus componentes, a través de procesos algebraicos, lógicos o una combinación de ambos. Dicha tarea toma como base la presencia y valoración de las propiedades presentes.

- d) Generar productos, de acuerdo a la información utilizada y las transformaciones llevadas a cabo.

Las mencionadas etapas de almacenamiento y recuperación de datos pueden ser denominadas colectivamente como la “gestión de los datos” (Barredo, 1996; p. 7).

Las anteriores definiciones señalan que, dentro del contexto geográfico en el cual se desarrolla un SIG, existe una clara distinción entre los datos, los cuales son valores (numéricos, alfanuméricos, etc.), dispuestos en forma cartográfica. Posteriormente, si la parte viva del sistema (en inglés: “liveware”, según Barredo, 1996; p. 4) añade a cada dato las propiedades consideradas de relevancia para el trabajo a desarrollar, se obtiene así la información. Se consigue entonces la primer agregación en el valor de los datos originales. Es luego de esta etapa cuando se hacen posibles los ya mencionados procesos de transformación y obtención de productos, lográndose un nuevo incremento en valor de los datos inicial, pues puede así asociarse un resultado concreto a cada uno de los datos y propiedades originales.

3.5.2. Estructura de los datos y la información

Los datos con los cuales se alimenta un SIG, están organizados internamente de forma coherente con la estructura informática del software encargado de gestionarla. En la literatura básica y los respectivos manuales de operación de los paquetes informáticos corrientes, se enfatiza acerca de la estructura de los datos y la información (Bosque, 1992; Bosque, et al., 1994; Barredo, 1996; ERDAS, 1994, USACE, 1993; ESRI, 1994; Eastman, 1997). La estructura de datos e información se describe a partir de los siguientes aspectos:

- i) Capas.
- ii) Temas y bases de datos.
- iii) El formato de la información: vectorial o ráster.

A continuación se expone una breve revisión de éstos.

3.5.2.1. Capas

En un SIG, la información es almacenada, procesada y representada gráficamente bajo la forma de capas (en inglés: “layers”) ¹⁸ (Bosque, et al., 1994; Meijerink, 1994). Cada una de éstas representa a una diferente componente del total de datos a analizar (geología, topografía, etc.) (ERDAS, 1994).

La relación entre datos y propiedades en cada capa se materializa por medio del diseño y gestión de una tabla de asignaciones, la cual está compuesta por columnas

¹⁸En particular, ESRI (1994) las define como cubiertas (en inglés: “covers”).

	<i>Campos</i>				
	Identificador	Suelo	Arena [%]	Arcilla [%]	Limo [%]
<i>Registros</i>	1	Argiudol	10	60	30
	2	Ustipsamment	70	10	20

Cuadro 3.5: Ejemplo de tabla de asignación

(campos)¹⁹ y filas (registros)²⁰ (Bosque, et al., 1994; Meijerink, et. al; 1994) (Ver Cuadro 3.5).

La primer columna corresponde al identificador , el cual es un número de orden o índice del registro, éste es el dato. Así, para cada variable, la tabla expone las diferentes cualidades y características que ésta posee . Cada dato está, a su vez referenciado espacialmente (comúnmente se menciona que el dato está georreferenciado), hecho que proviene de su origen cartográfico. El total de columnas para cada índice constituye así la información que se posee o considera relevante para cada dato (ERDAS; 1994; pp: 333).

3.5.2.2. Bases de datos y temas

Un GIS, provee la posibilidad de relacionar las distintas tablas de asignación entre sí, por medio de una base de datos. Este término es también mencionado en Meijerink, et al. (1994) como base de datos espacial.

La base de datos organiza y gestiona los registros existentes en las distintas tablas, con el objeto de poder vincular las diferentes propiedades asociadas a un mismo registro, posición espacial, etc. (Bosque, et al., 1994; Meijerink, et al.; 1994).

Una o más capas componen un tema (ERDAS, 1994; p. 335). Así, por ejemplo, si se pretende realizar un trabajo sobre el volumen anual de sedimentos acumulados en el vaso de una presa, entonces existirán varios temas, entre los cuales estará la erodabilidad de los materiales que componen la cuenca de aporte a la obra mencionada. Si, por ejemplo, se decide utilizar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (Wischmeier y Smith 1978), entonces, el mencionado tema (erodabilidad) estará compuesto por, al menos, dos capas:

- i) características topográficas (pendientes del terreno, longitud de las mismas),

¹⁹En particular, ESRI (1994) las define como items.

²⁰Al igual que ESRI (1994).

- ii) La composición de física de los suelos (textura, estructura, contenido de materia orgánica, etc.).

Cada capa tendrá su correspondiente tabla de valores, los cuales al ser vinculados mediante la ecuación antes nombrada darán el resultado final, correspondiente al tema en cuestión.

En el caso especial de las imágenes provenientes de la detección de sistemas remotos (fotografía aérea e imágenes de satélite), la imagen total equivale a un tema, el cual está compuesto por diferentes bandas, cada una de las cuales es un producto particular del sensor remoto. Las bandas describen el comportamiento físico (reflectividad) de la superficie de terreno analizada, como función de un valor de radiancia detectado dentro de un intervalo determinado de longitud de onda. Cada una de las bandas de datos producidas por un satélite equivalen, en un GIS, a una diferente capa de valores (ERDAS, 1994).

3.5.2.3. El formato de las capas

Las capas de un SIG pueden utilizar dos diferentes estructuras para representar los datos: *vectorial o ráster*.

Una capa vectorial está definida como un conjunto de rasgos distintivos (en inglés: *features*), del elemento cartográfico analizado, donde cada uno de estos rasgos posee una ubicación espacial, y una serie de *atributos* definidos. Su localización espacial se define en función de las coordenadas espaciales de referencia y los correspondientes *indicadores topológicos*. La topología, refleja internamente la conectividad espacial de cada uno de los elementos que componen una capa vectorial.

En base a ésta última es posible relacionar a cada rasgo particular con los demás de la capa. (ERDAS, 1994; pp: 46). En las capas vectoriales se pueden encontrar:

- i) Puntos: que están representados por un único par de coordenadas en el espacio. Pueden representar la ubicación de una muestra o punto de muestreo, cota máxima de una cadena montañosa, etc. Los puntos no tienen área.
- ii) Líneas: éstas componen un conjunto abierto de segmentos que representan una característica lineal, tal como fracturas geológicas, carreteras, cursos de agua, etc. Al igual que los puntos, las líneas no poseen representación areal.
- iii) Polígonos: que representan a un conjunto cerrado de líneas o segmentos, definiendo un área dentro de a cual el dato es el mismo. De esta manera se representan las unidades cartográficas de suelos, geología, un área urbanizada, la superficie de un lago, etc.

A diferencia de las capas vectoriales, en las capas ráster la información se organiza sobre una cuadrícula regular²¹, dividiendo a la capa en celdas (también llamadas

²¹Compuesta por n filas y m columnas.

*píxeles*²².) cada uno de los cuales contiene el valor del dato correspondiente a esa posición espacial. El tamaño de estos píxeles es función de la escala a la cual se representa la información en una capa. Su forma es usualmente cuadrada, aunque generalmente está contemplada una forma rectangular del mismo.

Existen dos tipos de estructura ráster: continua y temática:

- a) Estructura continua: contienen datos cuantitativos, relacionados a una variable numérica continua.
- b) Estructura temática: se trata de capas ráster que contienen información cualitativa y categórica de un área. La información temática es considerada en aplicaciones relacionadas a temas donde se requieren análisis y resultados referidos a la catalogación o clasificación de un rasgo determinado de la realidad.

Las capas ráster de estructura continua pueden ser, por ejemplo: un modelo digital del terreno, las distintas bandas de una imagen de satélite, capas que describan cuantitativamente la distribución altimétrica de un sector de terreno, etc. En cambio, una capa temática se utiliza para representar a las unidades de mapeo de suelos, rocas, cubierta vegetal, riesgos naturales, etc.

3.5.3. Manipulación de capas ráster y vectoriales

Dentro de la manipulación de las capas de información, en los SIG está contemplado la transformación de sus formatos. Surgen así los términos de rasterización y vectorización, cada uno de los cuales está asociado a la variación de la escala del análisis.

Existen dos operaciones básicas de manipulación: rasterización y vectorización.

La transformación de información vectorial al formato ráster se conoce como rasterización. La misma se lleva cabo a partir de analizar, para cada píxel, el valor medio de la variable vectorial, que se encuentra dentro del área cubierta por la mencionada celda. Este valor medio puede ser: la media geométrica, media ponderada o el resultado de un proceso de interpolación más riguroso.

La vectorización es el caso inverso a la rasterización. En este caso la información originalmente en formato ráster se transforma al formato vectorial. En éste, los valores correspondientes cada píxel son transformados en puntos, líneas o polígonos. En este último caso, la entidad vectorial resultante será un contorno del conjunto de píxeles, espacialmente relacionados por uno o más de sus lados y que posean igual identificador.

²²Acrónimo de “picture elements”, elementos pictóricos

Tal como puede deducirse, la rasterización implica una modificación en la escala a la cual se representan las variables, en el formato vectorial. Al rasterizar, inevitablemente se *suaviza* la variabilidad de los elementos analizados. Resulta entonces particularmente crítico la selección de un tamaño de pixel que se adecúe a la escala del análisis, dentro del cual la información pueda considerarse “homogénea”. Por el contrario, la vectorización no implica cambios de escala, ni “suavización” de la información.

3.5.4. La utilización de Sistemas de Información Geográficas en la modelización hidrológica

Existen diferentes razones para la utilización de SIGs en la modelización del terreno y, concretamente, en la hidrológica. En primer lugar, en la actualidad está universalmente aceptado que estos sistemas son herramientas que permiten aumentar la productividad de los trabajos de cálculo y modelización. Las características propias del SIG permiten el manejo de información que permite analizar la realidad observable con mayor facilidad, pudiendo así retroalimentar el proceso de modelización.

En términos concretos, se pueden desarrollar desde un inventario de recursos, hasta la construcción de modelos que reproduzcan la información recogida, pasando por la determinación de los parámetros de modelación. Directamente relacionado con lo visto en secciones anteriores, la utilización de un SIG permite la evaluación de la información, su clasificación y su superposición para la elaboración de HRUs o sus derivadas (Meijerink, et al. 1994, es un ejemplo de lo dicho). De la misma forma, el proceso de análisis de las posibles interacciones y desarrollo de estrategias de muestreo acordes con este concepto sería sumamente difícil de elaborar, de no contar con esta herramienta.

Uno de los avances de mayor interés en la Hidrología ha sido el procesamiento de la topografía, elaborándose modelos de elevación del terreno (en inglés: “digital elevation models” o “DEM’s”²³) (Frederiksen et al, 1985; Carter, 1988; Tsay, 1998; Giles y Franklyn, 1996) . Tal tecnología ha permitido avances en la delimitación automática de cuencas vertientes, red de drenaje y la elaboración de estudios geomorfológicos cuantitativos y de escalas (por ejemplo: Blaszczynsky, 1997; Bian, 1997; Costa-Cabral y Burges, 1994; Tarboton, 1997. Snell y Sivapalan, 1994). Estos desarrollos permitieron, a su vez el avance en la modelación hidrológica distribuida.

En consecuencia, si bien no en todos los casos los modelos hidrológicos (distribuidos o no) están directamente acoplados a un SIG, este último es la herramienta clave para el procesamiento de la información y la preparación de los escenarios de modelación (Salama et al.; 1996). Tanto Beven y Moore (1993) como Singh y

²³En algunos casos se lo conoce como “DTM’s” o “Digital Terrain models” , aunque este término no solo abarca a la topografía sino a los demás componentes del terreno

Fiorentino (1996) exponen una gran cantidad de ejemplos de lo explicado, en los libros de los cuales son co-editores.

3.6. Referencias

Abbaspour, K. C. y Moon, D. E. *Relationships between conventional field information and some soil properties measured u the laboratory.* Geoderma, 55; p.: 119-140. 1992.

Aller, L; Benett, T; Lehr, J. H. Petty, R. J. y Hackett, G. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluation Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings.* US. Environmental Protection Agency Report 600/2-87-035; 622p. 1987.

Ahrens, R. J. y Arnold, R. W. *Soil Taxonomy* En: **Sumner, M. E. (Ed.)**. *Handbook of Soil Science.* CRC Press; Section E. p.: 117 - 136. USA; 2000.

Alexander, L. y Skaggs, R. W. *Predicting unsaturated hydraulic conductivity from soil texture.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 113 (2): 184-197. 1985.

Anderson, M. P. *Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments.* Geological society of America Bulletin; 101: 501-511. 1989.

Anderson, M. P. *Comment on: Universal Scaling of Hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media, by S. P. Newman.* Water Resources Research, 27 (6): 1381-1382. 1991.

Arnold, R. W. *Concepts of soils and pedology* En: **Wilding, L. P.; Smeck, N. E. y Hall, f. F. (Eds.)**. *Pedogenesis and Soil Taxonomy. Concepts and Interactions..* Developments in Soil Science 11, p: 23-50. A. Elsevier. The Netherlands, 1983.

Baker, V. R. *Regional landforms analysis.* En: **Short, N. M. y Blair, R. W. Jr. (Eds.)**. *Geomorphology from Space: A Global Overview of Regional Landforms.* NASA SP - 486, pp. 1 - 26. Reimpreso en: **Foster, N. H y Beaumont, E. A. (Eds.)**. *Photogeology and Photogeomorphology.* American Association of Petroleum Geologist; pp. 333 - 358. USA, 1992.

Bales, J. y Betson, R. *The Curve Number as a hydrologic index.* En: **Singh, V. P. (Ed.)** en: *Rainfall - Runoff Relationship.* Water Resources Publications, p.: . USA; 1982.

Barredo, J. I. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio.* Ed. RA - MA, Madrid. 1996.

Bathurst, J. C. *Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique Europeen for an upland catchment.* Journal of Hydrology, 87: 103-123. 1986.

Batjes, N. H. *Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules.* Geoderma, 71: 31-52. 1996.

- Battaglin, W. A. ; Hay, L. E.; Parker, R. S. y levasley, G. H.** *Applications of a GIS for modelling the sensitivity of water resources to alterations in climate in the Gunninson River Basin, Colorado.* Water Resources Bulletin, 25(6): 1021-1028. 1993.
- Bernáldez, F. G. y Rey Benayas, J. M.** *Geochemical relationships between ground water and wetlands soils and their effects on vegetation in central Spain.* Geoderma, 55; p.: 273-288. 1992.
- Bernardier, C. R.; Ross, S. J. y Grossman, R. B.** *Soil water capacity prediction.* Geoderma, 49: 77-81. 1991.
- Beven, K. J. y Kirkby, M. J.** *A physically - based variable contributing area model for basin hydrology.* Hydrological Science Bulletin, 24: 43-69. 1979.
- Beven, K. J. y Moore, I.D.(Eds.)** *Terrain analysis and distributed modelling in hydrology.* John Wiley and Sons, cop. 1993.
- Bian, L.** *Multiscale of spatial data in scaling up environmental models.* En: **Quattrochi, D. A. y Goodchild, M. M. (Eds.)** *Scale in Remote Sensing and GIS.* Lewis Publishers, p.: 13-26. USA, 1997.
- Bierkens, M. F. P. y Burrough, P. A..** *The indicator approach to categorical soil data.II application to mapping and land use suitability analysis.* Journal of Soil Sciences, 44; p.: 369-381. 1993.
- Bishop, T.F.A. y McBRatney, A. B..** *A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps.* Geoderma, 103, p.: 149-160. 2001.
- Blaszczynsky, J. S.** *Landform characterization with geographic information systems.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 63(2); p.: 183-191. 1997.
- Blöschl, G. y Sivapalan, M.** *Scale issues in hydrological modelling: a review* En: **Kalma, J. D. y Sivapalan, M. (Eds.)** *Scale Issues in Hydrological Modelling.* Wiley, p.: 71-48. UK, 1995.
- Bohne, K.; Roth, C.; Leij, F. J. y van Genuchten, M. Th.** *Rapid method for estimating the unsaturated hydraulic conductivity from infiltration measurements.* Soil Science, vol. 155; n° 4; p.:237-244. 1993.
- Bosque, J.** *Sistemas Geográficos de Información.* Ediciones RIALP, S.A. Madrid. 1992.
- Bosque, J.; Escobar, F. García, E. y Salado, M. J.** *Sistemas de Información Geográfica: Prácticas con ArcInfo PC e IDRISI.* Ed. RA-MA; Madrid. 1994.
- Bonham - Carter, G. F. ; Agterbeg, F. P. y Wright, D. F..** *Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia.* Photogrammetric Engineering and remote Sensing, vol 54, N° 11; p.: 1585-1592. 1988.
- Bonta, J. V.** *Determination of watershed Curve Number using derived distributions.* Journal of Irrigation and Drainage engineering; vol. 123; n° 1; p.: 28-36. 1997.
- Bosznay, M.** *Generalization of SCS Curve Number Method.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 115 (1): 139-144. 1989.
- Bourennane, H.; King, D. y Couturier, A..** *Comparison of krigging with*

external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. Geoderma, 97: p.: 255-271. 2000.

Box, G. E. P.; Hunter, W. G. y Hunter, J. s. *Estadística para Investigadores. Introducción al diseño de Experimentos, análisis de datos y Construcción de modelos.* Ed. Reverté. España; 1993.

Brakensiek, D. L.; Engleman, R. L. y Rawls, W. J. *Variation within texture classes of soil water parameters.* Transactions of the ASAE, 24 (1-3): 335-339. 1981.

Bregt, A. K.; Bouma, J. y Jellienek, M. *Comparison of thematic maps derived from a soil map and from krigging of point data.* Geoderma, 39; p.: 281-291. 1987.

Brus, D. J. *Incorporating models of spatial variation in sampling strategies for soil.* PhD. Thesis, Wageningen, 1993.

Buol, S. W.; Hole, F. D. y Mc. Cracken, R. J. *Soil Genesis and Classification. Third Edition.* Iowa State University Press. USA, 1989.

Burrough, P. A. *Sampling Design for qualifying map unit composition.* En: **Soil Survey society of America.** *Spatial Variabilities of soils and Landforms.* SSSA, special Publication N° 28; p: 89-125 USA; 1991.

Burrough, P. A.; Bouma, J. y Yates, S. R. *The state of the art in pedometrics.* Geoderma, 62: 311-326. 1994.

Carter, J. R. *Digital representations of topographic surfaces.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54 (11); p.: 1577-1580. 1988.

Cazemier, D. R.; Lagacherie, P y Martin-covaire, R. A *Possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise information contained in soil databases.* Geoderma, 103, p.: 113-132. 2001.

Chen, C. *An evaluation of the mathematics and physical significance of the soil conservation service curve Number procedure for estimating runoff volume".* En.: **Singh, V. P. (Ed.)** en: *Rainfall - Runoff Relationship.* Water Resources Publications. USA; 1982.

Chen, J. y Weather, H. S. *Identification and uncertainty analysis of oil water retention models using lysimeter data.* Water Resources Research, vol 35; n° 8; p.: 2401-2414. 1999.

Chong, S. K. y Teng, T. M. *Relationship between the Runoff Curve Number and hydrologic soil properties.* Journal of Hydrology; 84: 1-7. 1986.

Chow, V. T. Maidment, D. R. Y Mays, L. W. *Hidrología aplicada.* Mc Graw - Hill; Colombia. 1994.

Clapp, R. B. y Hornberger, G. M. *Empirical equations for some soil hydraulic properties.* Water Resources Research, vol 14 (4). 1978.

Claver, I. (Coord.). *Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico: Contenido y Metodología. Tercera Edición.* Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente; Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid. 1991.

Colosimo, C y Mendicino, G. *GIS for distributed rainfall-runoff modelling.* En:

- Singh, V. P. y Fiorentino, M (Eds.)** *Geographical Information Systems in Hydrology*. p.: 195-235. Kluwer Academic Press. 1996.
- Congalton, R. G.** *A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data*. Photogrammetric Engineering and remote Sensing, vol 54, N° 5; p.: 593-600. 1988.
- Conesa, V.** *Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Tercera Edición*. Ed. Mundi - Prensa. España, 1997.
- Cook, F. J. y Broeren, A.** *Six methods for determining sorptivity and hydraulic conductivity with disk permeameters*. Soil Science, vol. 157; n° 1; p.: 2-11. 1994.
- Costa, J. E. y Baker; V. R.** *Surficial Geology*. John Willey and Sons. USA; 1981.
- Costa-Cabral, M. y Burges, S. T.** *Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas*. Water Resources Research, 30(6): 1681-1692. 1994.
- Cressie, N.** *Statistics for Spatial Data*. Wiley. USA; 1993.
- Davis, J. C.** *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley and Sons. 1986.
- Domburg, P.; deGruijter, J. J. y Brus, D.J.** *A structured approach to designing soil survey schemes with prediction of sampling error for variograms*. Geoderma, 62; p.: 151-164. 1994.
- Drury, S. A.** *Image Interpretation in Geology. Second Edition*. Chapman and Hall; UK. 1993.
- Eastman, J. R.** *IDRISI for Windows. V 2.0. User's Guide*. Clark University. 1997.
- Elena, R.** *Clasificación Biogeoclimática de España y Península Balear*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Madrid, 1997.
- Elrick, D. E. y Clothier, B. E.** *Solute transport and leaching*. En: **Stewart, B. A. Y Nielsen, D. R. (Eds.)**. *Irrigation of Agricultural Crops*. American Assoc. of Agronomy; Crop Sci. Soc. of Am. and Soil Sci. Soc. of Am.; Agronomy Series N° 30. 1990.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI).** *PC ARC / INFO Users Guide*. Environmental Systems Research Institute, Inc. USA; 1994.
- Erdas Inc.** *Erdas Field Manual. Third Edition*. USA, 1994.
- FAO.** *Unesco Soil Map of the World. 1:5.000.000*. FAO, Roma. 1975.
- FAO. *Guías para la descripción de perfiles de suelos*. Roma; 1977.
- FAO.** *Guía para la Descripción de Perfiles de Suelo. Segunda Edición*. Roma. 1978.
- Ferrer, F. J.** *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de Avenidas*. CEDEX. Madrid, 1993.
- Finke, P. A.** *Spatial Variability of Soil Structure and its Impact on Transport Process and some Associated Land Qualities*. PhD. Thesis, Wageningen, 1993.
- Fitzpatrick, E. A.** *Soils : Their formation, classification and distribution*. Longman. UK; 1980.

- Fortin, M. J. Dale, M. R. T. y ver Hoef, J.** *Spatial analysis in ecology*. En: **El-Shaarawi, A. H. y Piegorsch, W. W. (Eds.)**. *Encyclopedia of Environmetrics*. John Wiley and Sons,. UK; 2002.
- Franks, S. W.; Gineste, P.; Beven, K y Merot, P.** *On constraining the predictions of distributed model: the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process*. *Water Resources Research*, 34 (4): 787-797. 1998.
- Frederiksen, P. Jacobi, O. y Kubik, K.** *A review of current trends in terrain modelling*. *ITC Journal*, 2: 101-106. 1985.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A.** *Groundwater*. Prentice Hall. USA; 1979.
- Gallego, E. y Bascones, M.** *Bases Cartográficas para la evaluación de impactos ambientales*. En: **ITGME**. *Evaluación y corrección de Impactos Ambientales*. Instituto Geominero de España; pp. 81 - 93. Madrid, 1991.
- Gascuel-Oudou, C. y Boivin, P.** *Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling: a case of study*. *Geoderma*, 62; p.: 165-182. 1994.
- Giles, P. T.; y Franklyn, S. S.** *Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62 (10); p.: 1165 - 1171. 1996.
- Giménez, D.; Perfect, E.; Rawls, W. J. y Pachepsky, Y.** *Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review*. *Engineering Geology*, 48: 161-183. 1997.
- Goodinson, B. E. (Ed.)**. *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*. IAHS Publication N° 145; Wallingford. 1985.
- Goovaerts, P.** *Estimation or simulation of soil properties?. An optimization problem with conflicting criteria*. *Geoderma*, 97; p.: 165-186. 2000.
- Gowda, P.; Ward, A.; White, D.; Lyon, J. y Desmond, E.** *The sensitivity of ADAPT model predictions of streamflows to parameters used to define hydrologic response units* *Transactions of the ASAE*, 42(2): 381-389. 1999.
- Gringarten, E. y Deusch, C.** *Teacher's aide: variogram interpretation and modelling*. *Mathematical Geology*, 33(4): 507-534. 2001.
- Gupta, R. P.** *Remote Sensing Geology*. Springer-Verlag, Berlin. 1991.
- Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M. y Reichenbach, P.** *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology*, 31; 181-216. 1999.
- Hall; G. F. y Olson, C. G.** *Predicting variability of soils from landscape models*. En : **Mausbach M. J. y Wilding; L. P.**; *Spatial Variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication n° 28; pp. 9 - 24. Soil Science Society of America, Inc., USA. 1991.
- Harden, J. W.** *Measurement of water penetration and volume percentage water-holding capacity for undisturbed, coarse-textured soils in Southwestern California*. *Soil Science*, vol. 146; n° 5; p.: 374-383. 1988.
- S. Henin; R. Gras y G. Monnier** *El perfil cultural: El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas*. Ed. Mundi-Prensa. España; 1972.

- Heuvelink, G. B. y Webster, R.** *Modelling of soil variation: past, present, and future*. Geoderma, 100, p.: 269-301. 2001.
- Hjelmfelt Jr., A. T.** *Investigation of curve Number procedure*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117 (3): 725-737. 1991.
- Hope, A. S.** *Improved estimates of stormflow volume using the SCS curve number method*. En: **Singh, V. P.** En.: **Singh, V. P. (Ed.)** en: *Rainfall - Runoff Relationship*. Water Resources Publications . USA; 1982.
- Hopmans, J. W. y Overmars, B.** *Presentation and application of an analytical model to describe soil hydraulic properties*. Journal of Hydrology; 87: 135-143. 1986.
- Ibarra, P.** *Una propuesta metodológica para el estudio del paisaje integrado*. Geographicalia, n° 30; pp. 229 - 242. 1993.
- Isaaks, E. H. y Srivastava, R. M.** *Applied geostatistics*. Oxford University Press. 1989.
- Jansen, L- L- F. y Molenaar, M.** *Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of GIS and remote sensing*. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 33 (3): 749-758. 1995.
- Jeton, A. E. y Smith, J. L.** *Development of watershed models for two Sierra Nevada basins using a geographic information system*. Water Resources Research, 29(6): 923-932. 1993.
- Journel, A. G. y Huijbregts, C. J.** *Minning Geostatistics*. Academic Press. UK; 1978.
- Kent, M. y Cooker, P.** *Vegetation description and analysis : A practical approach*. John Wiley and Sons. UK; 1994
- Kite, G. W. y Kowen, N.** *Watershed modelling using land classifications*. Water Resources Research, 28(12): 3193-3200. 1992.
- Kite, G. W. Ellehoj, E. y Dalton, A.** *GIS for large-scale watershed modelling*. En: **Singh, V. P. y Fiorentino, M (Eds.)** *Geographical Information Systems in Hydrology*. p.: 237-268. Kluwer Academic Press. 1996.
- Klingebiel, A. A. y Montgomery, P. H.** *Land Capability Classification*. USDA, Soil Conservation Service, Agriculture Handbook 210. USA, 1961.
- Knotters, M. Brus, D. J. y Oude Voshaar, J. H.** *A comparison of krigging, co-krigging and krigging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations*. Geoderma, 67; 227-246. 1995.
- Krebs, C. J.** *Ecología*. Ed. Pirámide. Madrid, 1986.
- Leij; F. J.; Russell; W. B. y Lesch, S. M.** *Closed-form expressions for water retention and conductivity data*. Ground Water; 35(5): 848-858. 1997.
- Lenhard, R. J.; Parker, J. C. y Mishra, S.** *On the correspondence between Brooks-Corey and Van Genuchten models*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 115 (4): 744-751. 1989.
- Leong, E. C. y Rahardjo, H.** *Review of soil-water characteristic curve equations*. Journal of Geotechnical and Bioenvironmental Engineering, vol. 123; n° 12; p.: 1106-1117. 1997.

- Lewis, P.** *Maps and Statistics*. Methuen Ltd; Cambridge. UK, 1977.
- López, M. L.** *Manual de Fotogeología*. Publicaciones científicas de la Junta de Energía Nuclear; Madrid. 1971.
- Mamillapalli, Sudhakar; Srinivasan, R.; Arnold, G; Engel, Bernard A.** *Effect of spatial variability on basin scale modelling*. Journal of Hydrology, 1998
- Markewich, H. W. y Cooper, S. C.** *One perspective of spatial variability in geological mapping*. En: **Soil Survey Society of America . Spatial Variabilities of soils and Landforms**. SSSA, special Publication N° 28; p: 25-38. USA; 1991.
- Martínez, L.M., Ramón, R. Y Eguiluz, L.** *Aplicaciones de la Teledetección (foto-satélite)*. *Análisis de Fotolíneas de la Cuenca Vasca*. Universidad del País Vasco. Bilbao. 1988.
- Maselli, F, Petkov, L. y Aracci, G..** *Extension of climate parameters over de land surface by the use of NOAA-AVHRR and ancillary data*. Photogrammetric Engineering and remote Sensing, vol 64, N° 3; p.: 199-206. 1998.
- Mattauer, M.** *Las deformaciones de los materiales de la corteza terrestre*. Omega. España; 1976.
- McBratney, A. B. y Odeh, I.O.A..** *Application of fuzzy sets in soil science; fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions*. Geoderma 77, p.: 85-114. 1997.
- McBratney, A. B.; Odeh, I. O. A.; Bishop, T. F. A.; Dumbar, M. S. y Shatar, T. M..** *An overview of pedometric techniques for use in soil survey*. Geoderma, 97, p.: 293-327. 2000.
- McKenzie, N. J. y Austin, M. P.** *A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation*. Geoderma, 57: 329-355. 1993.
- McKenzie, N. J. y Ryan, P. J..** *Spatial prediction of soil properties using environmental correlation*. Geoderma, 89, p.: 67-94. 1999.
- Meijerink, A. M. J.; Brower, H. A. M.; Mannaerts, C. M. y Valenzuela, C.** *Introduction of the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology..* ITC Publications n° 23. The Netherlands, 1994.
- Mbagwu, J. S. C.** *Saturated hydraulic conductivity in relation to physical properties of soils in the Nsukka Plains, southeastern Nigeria*. Geoderma, 68: 51-66. 1995.
- Miall, A. D.** *Principles of sedimentary basin analysis*. Springer, New York, 1995.
- Miall, A. D.** *The geology of fluvial deposits : sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology* . Springer. Berlín, 1996.
- Michiels, P.; Hartman, R. y De Strooper, E.** *Comparisons of the unsaturated hydraulic conductivity of a coarse-textured soil as determined in the field, in the laboratory, and with mathematical models*. Soil Science, vol. 147, n° 4; p.: 299-304. 1989.
- Mitchell, C.** *Terrain Evaluation*. Logman Scientific and Technical; Singapore. 1991.

- Moore, I. D.; Grayson, R. B. y Ladson, A. R.** *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications.* En **Beven, K. J. y Moore, I. D.** *Terrain Analysis and Distributed Modelling in Hydrology.* John Wiley and Sons, pp. 7 - 34. Norfolk. 1991.
- Montgomery, D. C.** *Design of analysis of Experiments. Fourth Edition.* John Wiley and Sons. USA; 1996.
- Montgomery, D. C. y Runger, R. C.** *Applied statistics and probability for engineers.* John Wiley and Sons. USA; 1999.
- MOPU.** *Instrucción 5.2-IC. Drenaje superficial.* Ministerio de Obras Públicas. España. 1990.
- Moral, F. J. y Giráldez, J. V.** *Influencia de la variabilidad del suelo en la hidrología superficial de una cuenca.* Ingeniería del Agua 2 (1): 51-60.1995.
- Moser, E. B. y Machiavelli, R. E..** *Methods for spatial analysis.* En: **Singh, V. P. y Fiorentino, M (Eds.).** *Geographical Information Systems in Hydrology..* p.: 91-113. Kluwer Academic Press. 1996.
- Myers, D. E..** *Spatial interpolation: an overview.* Geoderma, 62; p.: 17-28. 1994.
- Newman, S. P.** *Universal scaling of hydraulic conductivities and dispersivities in geologic media.* Water Resources Research, 16(8): 1749-1758. 1990.
- Odeh, I. O. A.; Mc Bratney, a. B. y Chittleborough, D. J..** *Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model.* Geoderma, 63; p.: 197-214. 1994.
- Odeh, I. O.A.; Mc Bratney, A. B. y Chittleborough, D. G..** *Further results on predictions of soil properties from terrain attributes: heterotropic cokrigging and regression-krigging.* Geoderma, 67; p.: 215-226. 1995.
- O'Loughlin, E. M.** *Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic properties.* Journal of Hydrology, 53: 229-246. 1981.
- Perez, F; Garcia, P; Antón, C. y Gumiel, J.C.** *Integration of Data Using a Geographical Information System.* En: **Gumiel, P.; Antón-Pacheco, C y Campos, R. (Eds.).** *Development of New Multi-disciplinary Techniques for Mineral Exploration in Several Areas of the Western Iberian Peninsula.* Instituto Tecnológico Geo Minero de España. Publ. Especial, pp.: 80 - 86. España; 1991.
- Ponce, V. M.** *Engineering Hydrology, Principles and Practices.* Prentice Hall. USA, 1989.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C.** *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* Editorial Mundi-Prensa. España; 1994.
- Puricelli, M. M.** *Funcionamiento hidroedáfico y sostenibilidad ambiental en la cuenca del Arroyo Guaminí, Provincia de Buenos Aires.* Ms of Sci. Tesis. Argentina, 1996.
- Raab, T. y Brosch, F. J.** *Uncertainty, subjectivity, experience: a comparative study.* Engineering Geology, 44; p.: 129-145. 1996.
- Rallison, R. E. y Miller, N.** *Past, present and future SCS runoff Procedure.* En: **Singh, V. P. (Ed.)** en: *Rainfall - Runoff Relationship.* Water Resources

Publications. USA; 1982.

Rawls, W. J. ; Brakensiek, D. L. y Saxton, K. E. *Estimation of soil water properties.* Transactions of the ASAE. 1982.

Rawls, W. J., Pachepsky, Y y Shen, M. H. *Testing soil water estimation with MUUF pedotransfer model using data for the Southern United States.* Journal of Hydrology, 251: 177-185. 2001.

Reading, H. G. (Ed.). *Sedimentary environments and facies 2nd. Ed.* Blackwell, Oxford, 1986.

Reading, H. G. (Ed.) *Sedimentary environments : processes, facies and stratigraphy 3rd Ed.* Blackwell Science, Oxford, 1996.

Reid, E. H. *Rangeland Hydrology.* Soc. for Range Management; Range Series N° 1, second Edition. USA, 1981.

Rosenbaun, M. S.; Losén, L y Gustafson, G.. *Probabilistic model for estimating lithology* Engineering Geology, 47; ‘: 43 - 55. 1997.

Rosso, R. *An introduction to spatially distributed modelling of basin response.* En:

Roso, Peano, A, Becci, I y Bemporad, G. A. (Ed.). *Advances in Distributed Hydrology.* Water Resources Publications; p: 3 - 30. USA. 1994.

Salama, R. B.; Ye, L. y Broun, J. *Comparative study of methods of preparing hydraulic-head surfaces and the introduction of automated hydrogeological-GIS techniques.* Journal of Hydrology, 185: 115-136. 1996.

Sanchez, J.; Rubio; J. L; Salvador, P; Arnal; S. *Metodología de la cartografía básica.* I Congreso Español de Geología; (I); pp. 771 - 782. 1984.

Santiesteban, A y Muñoz, L. *Principal components of multispectral image: application to a geologic problem.* IBM Res. Develop. v 22; n° 5; 1978. Reimpreso en: **Santiesteban, A (Ed.);** *Tratamiento Digital de Imágenes y sus Aplicaciones.* UAM - IBM; Madrid. 1980.

Scheidegger, A. E.. *The fundamental principles of landscape evolution.* Catena supplement 10; p.: 199-210. 1987.

Scheinost, A. C.; Sinowsky, W. y Auerswald, K. *Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function.* Geoderma, 78: 129-143. 1997.

Shouse, P. J.; Russell; W. B.; Burden, D. S.; Selim, H. M.; Bisson, J. B. y van Genuchten, M. Th. *Spatial variability of soil water retention functions in a silt loam soil.* Soil Science, vol. 159; n° 1; p.: 1-12. 1995.

Singh, V. P. *Hydrologic Systems* Prentice - Hall. 1988.

Singh, V. P. y Fiorentino, M. (Eds.) *Geographical Information Systems in Hydrology.* Kluwer Academic Press. 1996.

Sinowsky, W.; Scheinost, A. C. y Auerswald, K. *Regionalization of soil water retention curves in highly variable soilscape, II. Comparison of regionalization procedures using a pedotransfer function.* Geoderma, 78: 145-159. 1997.

Smith, G. D. *Historical development of soil taxonomy - background.* En: **Wilding, L. P.; Smeck, N. E. y Hall, f. F. (Eds.).** *Pedogenesis and Soil Taxonomy.*

Concepts and Interactions.. Developments in Soil Science 11, p: 23-50. A. Elsevier. The Netherlands, 1983.

Snell, J. D. y Sivapalan, M. *On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph.* Water Resources Research, 30(7):2311-2323. 1994.

Sobieraj, J. a.; Elsenbeer, H y Vertessy R. A. *Pedotransfer functions for hydraulic conductivity: implications for modelling of storm flow generation.* Journal of Hydrology, 251: 202-220. 2001.

Soil Conservation Service *Hydrology. Part I: Watershed Planning.* U.S. Department of Agriculture, National Engineering Handbook; Sec. 4. 1964.

Soil Survey Staff. *Soil Survey Manual.* USDA, Agriculture Handbook N° 18. USA, 1951.

Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* USDA, Agriculture Handbook N° 436. WUSA, 1975.

Sole, A. y Valanzano, A. *Digital terrain modelling.* En: **Singh, V. P. y Fiorentino, M. (Eds.)** Geographical Information Systems in Hydrology. Kluwer Academic Press. 1996.

Soriano; A.; Salvador; P; Garcia; P; Sanchez, J. y Rubio; J. L. *Cartografía básica y su relación con la litología en la zona de Alpuente, Valencia.* I Congreso Español de Geología; (I); pp. 573 - 584. 1984.

Spaargaren, O. C. *Other systems of soil classification.* En: **Sumner, M. E. (Ed.)**. *Handbook of Soil Science.* CRC Press; Section E. p.: 137 - 173. USA; 2000.

Sperry; J. M. y Peirce; J. *A model for estimating the hydraulic conductivity of granular material based on grain shape, grain size, and porosity.* Ground Water; 33(6): 892-898. 1995.

Steele, G. J.. *Soil Survey Interpretation and its Use.* FAO, Soils Bulletin n° 8, Roma. 1967.

Steenhius, T. S.; Winchell; M.; Rossing; J. ; Zollweg; J. A. y Walter, M. F. *SCS runoff equation revisited for a variable-source runoff areas.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering; vol. 121; n° 3; p.: 234-238. 1995.

Stein, A.; Staritsky, I. G.; Bouma, J., Van Eijnsbergen, a. C. y Bregt, A. K.. *Simulation of moisture deficits and areal interpolation by universal cokrigging.* Water resources Research, vol 27, n° 8: 1693-1973. 1991.

Stein, A. *The use of prior information in spatial statistics.* Geoderma, 62; 199-216. 1994.

Tarakanik, J. V. y Trautwein, C. M. *Integration of geological remote-sensing techniques in subsurface analysis.* En: *Subsurface Geology, Petroleum, Mining, Construction. 4a Ed.* Colorado School of Mines, pp. 767-787. Reprint en: **Foster, N. H y Beaumont, E. A. (Eds.)**. *Remote Sensing.* American Association of Petroleum Geologist, pp. 129 - 149. USA, 1992.

Tarboton, D. G. *A new method for the determination of flow directions and*

upslope areas in grid digital elevation models. Water Resources Research, 33(2): 309-319. 1997.

Tietje, O. y Hennings, W. *Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes.* Geoderma, 69: 71-84. 1996.

Timjum, J. M.; Benson, C. H. y Blotz, L. R. *Soil-Water characteristic curves for compacted clays.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 123; n° 11; p.: 1060-1069. 1997.

Tsay, J. R. *A new algorithm for the surface determination based on wavelets and its application..* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 64 (12); p.: 1179 - 1188. 1998.

Upchurch, D. r. y Edmons, W. J. *Statistical procedure for specific objectives.* En: **Soil Survey society of America.** *Spatial Variabilities of soils and Land-forms.* SSSA, special Publication N° 28; p: 49-71. USA; 1991.

USACE. *GRASS Installation Guide. (V4.0 y 4.1).* USA Corps of Engineers. USA; 1993.

Van Genuchten, M. Th.; Leij, F. J. y Yates, S. R. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.* U.S. Salinity Laboratory; US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. California; 1991.

Van Genuchten, M. T. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* Soil Science Society of American Journal, 44; p: 892-898. 1980.

Van Niekerk, A. W. y Heritage, G. L. *The use of GIS techniques to evaluate sedimentation patterns in a bedrock controlled channel in a semi-arid region.* **En: Kirby, C. y White W. R. (Eds.)** *Integrated River Basin Developments.* John Willey and Sons. 1994.

Van Wambeke, A. y Forbes, T. R. *Criterios Para el Uso de la Taxonomía de Suelos en la Denominación de Unidades Cartográficas.* Monografía Técnica SMSS n° 15. Chile, 1985.

Van Zuidam, R. A (Ed.). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphic Mapping.* ITC. The Hague, The Netherlands. 1985.

Vereecken, H.; Maes, J.; Feyen, J. y Darius, P. *Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content.* Soil Science, vol. 148, n° 6; p.: 389-403. 1989.

Voltz, M. y Goulard, M. *Spatial interpolation of soil moisture retention curves.* Geoderma, 62: 109-123. 1994.

Walsh, S. J.; Evans, T. P.; Welsh, W. F.; Entwisle, B. y Ribndfus, R. R. *Scale -dependent relationships between population and environment in North-eastern Thailand.* Photogrammetric Engineering and remote Sensing, vol 65, N° 1; p.:97-105. 1999.

Westman, W. E. *Ecology, Impact Assessment and Enviromental Planning.* John Wiley and Sons. USA, 1985.

Webster, R. y Oliver, M. A. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press. 1990.

Webster, R. *The development of pedometrics*. *Geoderma*, 62; p.: 1-15. 1994.

Wilding, L. P. y Drees, L. R. *Spatial variability and pedology*. En: **Wilding, L. P.; Smeck, N. E. y Hall, G. F. (Eds.)**. *Pedogenesis and soil taxonomy. I Concepts and Interactions*. Elsevier Science Publishers; p. 83 - 116. The Netherlands. 1983.

Williams, R. D. y Ahuja, L. R. *Using available water content with the one-parameter model to estimate soil water retention*. *Soil Science*, vol. 156; n° 6; p.: 380-388. 1993.

Williams, R. D.; Ahuja, L. R. y Naney, J. W. **Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data**. *Soil Science*, vol. 153; n° 3; p.: 172-184. 1992.

Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. *Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to conservation Planning*. USDA Handbook 537. USA, 1978.

Wood, E. F.; Sivapalan, M, Beven, K y Band, L. *Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modelling*. *Journal of Hydrology*, 102, p.: 29-47. 1988.

Wösten, J. H. M.; Finke, P. A. y Jansen, M. J. W. *Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics*. *Geoderma*; 66: 227-237. 1995.

Wösten, J. H. M.; Pachepsky, Y y Rawls, W. J. *Pedotransfer functions: bringing the gap between available basic soils data and missing of soil hydraulic characteristics*. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150. 2001.

Wösten, J. H. M.; Lilly, A; Nemes, A y Le Bas, C. *Development and use of a database of hydraulic properties of European Soils*. *Geoderma*, 90: 169-185. 1999.

Wysocky, D. A.; Scheneberger, P. J. y LaGarry, H. E. *Geomorphology of soils landscapes*. En: **Sumner, M. E. (Ed.)**. *Handbook of Soil Science*. CRC Press. USA; 2000.

Yu; B. *Theoretical justification of SCS method for runoff estimation*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*; vol. 124; n° 6; p.: 306-309. 1998.

Zhang, R. y van Genuchten, M. Th. *New models for unsaturated soil hydraulic properties*. *Soil Science*, vol. 154; n° 2; p.: 77-85. 1994.

Zonneveld, I. S. *The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications* *Landscape Ecology*, vol. 3(2); p.: 67-86. 1989.

Capítulo 4

Valores de referencia

4.1. La elaboración de valores de referencia

Uno de los puntos destacados en el primer capítulo de esta Tesis es la definición conceptual y numérica de los *valores de referencia*. Por esta razón, en el presente capítulo se analizará la distribución y formas de variación de los *valores* de algunos de los procesos físicos que más afectan a los procesos hidrológicos, esto es: percolación, almacenamiento de agua en el suelo, intercepción y almacenamiento de agua en la superficie del terreno.

Para desarrollar lo dicho es necesario tener en cuenta un número limitado de consideraciones. Las mismas tratan, fundamentalmente respecto al *origen y significado* de los valores de referencia. Éstas son:

- i) Los valores de referencia representan el *valor modal* que una cualidad o característica toma en una determinada situación¹, *tipo de material*² o *estado*³.
- ii) Los valores de referencia admiten usualmente un *rango de variación* alrededor de éste, el cual representa la dimensión con que éste ha sido descrito en la bibliografía.
- iii) Las situaciones, tipos de material o estado para las cuales se determina un valor de referencia resultan de la división de todo el campo posible en la naturaleza, en un *número reducido de intervalos*, los cuales han sido los más frecuentemente citados en la literatura.

En consecuencia, queda claro que ya desde el punto de partida los valores de referencia deben ser empleados *con sumo cuidado y no reemplazan al buen juicio y experiencia de quien los utiliza*.

¹Por situación se entiende en este trabajo a los indicadores ambientales que suelen acompañar la cita de un valor de referencia; por ejemplo: suelos arcillosos sin cubierta vegetal.

²Por material se entiende en este trabajo al conjunto de sedimentos, rocas, suelos etc.

³Por estado se entiende en este trabajo aquella condición que modifica las cualidades o características originales del material; por ejemplo: fracturación, alteración, salinización, etc.

Para poder definir correctamente los valores de referencia, es necesario conocer el proceso al cual representan. Así, al analizar cada uno de estos procesos, se presentará un breve estudio de los procesos físicos ya mencionados, centrándose en su mecánica, las variables que más afectan su comportamiento y algunas de las formas existentes de modelar su comportamiento. En los objetivos se establecieron las *características y cualidades* a ser analizadas, y los componentes del terreno donde centrar el análisis. La relación entre las cualidades y características analizadas, y los componentes del terreno está dada por los *procesos hidrológicos*. Por otra parte, una cualidad o característica puede ser afectada por una o más variables (por ejemplo: la conductividad hidráulica del suelo), y cada uno de éstos es significativo en función de qué componente del terreno sea tenido en cuenta (por ejemplo: suelos, rocas o sedimentos). En consecuencia, para lograr sintetizar los resultados en un conjunto de valores de referencia coherentes con los objetivos, fue necesario, en primer lugar, analizar la forma en que se desarrollan los mecanismos de generación de escorrentía y abstracción hidrológica. Una vez descriptos los procesos, fue posible analizar sus fuentes de variación, así como las formas más comunes de su modelación. Como consecuencia de esto último se determinó cuáles son las variables más importantes que afectan a los valores de referencia. Al final de esta etapa, se pudieron establecer los criterios para poder desarrollar la nomenclatura y clasificación de los elementos del terreno.

En cada caso analizado en este capítulo se expondrá un *análisis de la variabilidad* de los valores medidos o estimados de los diferentes procesos analizados. Dicho análisis surge de la recopilación de fuentes de información bibliográfica diversa, fruto de la elaboración de un muestreo de fuentes de información científica, técnica y de divulgación. Se estudió un conjunto amplio de referencias bibliográficas, dentro de las cuales se analizaron diferentes citas tanto técnicas como de divulgación. El conjunto en su totalidad, por ser un número limitado de casos debe ser considerado como una *muestra del universo de las citas de valores de referencias existentes en la literatura universal*. Sobre la base de estos valores, se extrajo información referida a tres *cualidades* (conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento hídrico en suelos). Los resultados fueron expresados mediante cuadros de valores y gráficos.

Por último, la sección final de este capítulo está dedicada a mencionar diferentes *fuentes de información disponibles*, las cuales pueden proveer de elementos de juicio y material para la re-elaboración y/o utilización de los valores de referencia aquí expuestos.

4.1.1. Método de selección y análisis

En esta Tesis, poseer valores de referencia significa contar con un *conjunto de valores* de referencia de ciertas cualidades y características hidrológicas del terreno, concretamente:

- i) Conductividad hidráulica en suelos y rocas.

ii) Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo.

El propósito de este tipo de trabajo se concentra, entonces, sobre las *características y cualidades hidrológicas del terreno* y no en analizar los cambios que se producen cuando éstos actúan influyéndose entre sí⁴. Por lo tanto, el análisis se dirige a los *componentes* del terreno en sí mismo.

En este trabajo, los componentes del terreno que son de interés son:

- a) Suelos.
- b) Sedimentos.
- c) Rocas.

Los *suelos* se distinguen de las rocas y sedimentos en base reconocer que sobre ellos han actuado una serie de procesos físicos y químicos después de la sedimentación y/o consolidación de los materiales (procesos pedogenéticos). Éstos fueron tenidos en cuenta como la mayor fuente de variabilidad en los valores de velocidad de infiltración y almacenamiento hídrico. Finalmente, los *sedimentos y las rocas* fueron considerados como la fuente más importante de variación en los valores de conductividad hidráulica y porosidad del substrato de los suelos.

Por otra parte, el problema que presenta el análisis de valores de referencia es que se encuentran dispersos en la bibliografía referida a temas agronómicos, geotécnicos e hidrológicos, entre otras materias. Adicionalmente, la forma de expresión con que se encuentran dicha información es variada, ya sea por el criterio de clasificación empleado como por las unidades en las cuales se expresan (SI, anglosajón, etc.). En consecuencia, se agrega así un objetivo adicional: *organizar la información existente* del tema. Dado el enorme volumen de información que potencialmente es posible analizar, se optó por seleccionar aquellas citas que por el tipo de información que presentaban cubrían un amplio espectro de casos o situaciones. Así se dio preferencia a la *variedad* de información respecto al número de *casos particulares*. Esto involucró una *selección* previa de las citas bibliográficas.

Posteriormente se llevó a cabo la tarea de *unificación de valores*. Ésta fue necesaria dado el hecho que el trabajo se basó fundamentalmente en *homologar* los resultados en grupos que sinteticen al conjunto más probable de casos observables en el terreno. En consecuencia, el rango total de la variación de cada tema analizado fue dividido en un número reducido de intervalos. De esta forma se logró distinguir los cambios más evidentes en los valores de las cualidades y características analizadas. Los criterios de clasificación obedecieron a la necesidad de presentar un esquema

⁴Se considera que las relaciones funcionales mutuas entre los diferentes mecanismos hidrológicos forman parte de la modelación hidrológica. Así, su estudio constituye una etapa posterior al análisis de los valores de referencia.

general de la mayor cantidad de casos posibles en la naturaleza. Así, se definieron los cuatro elementos básicos del terreno destacados en los objetivos (suelos, rocas, sedimentos y uso del suelo). En función de los intervalos considerados se calculó un análisis de la varianza (ANOVA) a fin de comprobar que existieran diferencias estadísticamente significativas entre los grupos. Previamente, se llevó a cabo el estudio de la distribución probabilística de los datos y las correspondientes transformaciones, a fin de que éstos cumplan con el requisito básico del ANOVA: la normalidad de los valores analizados. Posteriormente, en cada uno de los intervalos fue calculado el *valor medio* de la cualidad o característica analizada, junto con su intervalo LSD (en inglés: “Least Square Difference”); Romero y Zúñiga; 1993). Dichos intervalos se calculan en función de la media y el desvío estándar según la ecuación:

$$\bar{x} \pm 0,707t_n S_x = LSD \quad (4.1)$$

donde:

t_n es el valor de probabilidad para una distribución t de Student de n grados de libertad.

n total de grados de libertad en el ANOVA

De esta forma, los resultados incluyen *no sólo* el valor medio de la cualidad o característica, sino el rango de valores dentro del cual la misma se encuentra. Los extremos de este intervalo son los señalados por los valores máximos y mínimos obtenidos en la ecuación 4.1, denominados aquí como *límite superior* y *límite inferior* de la media. Complementariamente, en cada caso se tuvo en cuenta los valores máximos y mínimos absolutos de los valores analizados, su mediana, y su desvío estándar. En función de lo anterior, el medio de expresión más frecuentemente utilizado en este trabajo fue el gráfico. Las cuadros de valores fueron empleadas a fin de ampliar la información gráfica.

En cuanto a las unidades de medida, en este trabajo se optó por aquellas con las que fuera más práctico definir los valores de referencia. Así, se optó por unidades que puedan expresar los resultados con claridad, y/o por aquellas que comúnmente se utiliza un determinado tipo en especial. En consecuencia, se definieron las siguientes unidades de medida (Cuadro 4.1):

4.1.2. Ambiente de aplicación

Los conceptos de homogeneidad/heterogeneidad e isotropía /anisotropía que afectan a las cualidades y características hidrológicas ⁵ indican el sentido (práctico, general, etc.) que debe tener una determinada clave taxonómica. Esto surge de

⁵ya desarrollados en el Cap. 1

Cualidad o característica	Unidades de medida
Conductividad hidráulica en rocas y sedimentos	m/d ; milidarcys
Conductividad hidráulica en suelos	cm/h
Porosidad (en rocas, sedimentos y suelos)	porciento
Almacenamiento hídrico en suelos	porciento en peso de suelo seco
Velocidad de infiltración base en suelos	mm/h ; cm/h
Abstracciones iniciales de precipitación	mm
Lámina de agua interceptada por la vegetación	mm

Cuadro 4.1: Unidades utilizadas en los valores de referencia.

considerar al *ambiente* donde se aplicará una determinada taxonomía y sus correspondientes valores de referencia. Así, el rango de situaciones o escenarios tomados como posibles, hace que se decida sobre considerar uno u otro criterio taxonómico en particular.

En síntesis: las formas en que se pueden clasificar a un conjunto de elementos es amplia y cada una es correcta en función de los objetivos que se persiguen. En particular, en este trabajo la clasificación y los valores de referencia correspondientes son orientados a la *caracterización general del medio físico*, acordes con los objetivos que se especificaron en páginas anteriores.

El ambiente donde se aplicarán los valores de referencia afecta también a la taxonomía, mediante el rango de situaciones o escenarios posibles de ser analizados. Concretamente, las cualidades y las características consideradas en los objetivos de este trabajo, y los procesos hidrológicos involucrados, determinan en el ambiente *dos* escenarios concretos (Figura 4.1):

- i) Los *niveles superiores del terreno*: suelos y sedimentos. Éstos son el soporte de las plantas y participan en el almacenamiento hídrico y la infiltración.
- ii) El resto de materiales que componen el *substrato* cercano a la superficie; que afectan a la percolación y transmisión del agua en el interior del terreno.

Si se analiza cada uno de estos escenarios, puede observarse que:

- a) Los suelos, por ser elementos del paisaje derivados de materiales rocosos o sedimentarios serán los que concentrarán la mayor proporción de la heterogeneidad y anisotropía en el desarrollo de la velocidad de infiltración y el almacenamiento hídrico ⁶. Se suman así las discontinuidades de los materiales originales con las producidas por la pedogénesis.

⁶Se incluye aquí a la variación de la conductividad hidráulica y porosidad.

- b) Los procesos de percolación profunda y flujo saturado en medios porosos o fracturados serán de importancia en función de la porosidad y conductividad hidráulica de los materiales sedimentarios y rocas que conforman el substrato de los suelos y la vegetación.

En consecuencia, la clasificación a desarrollar dará importancia a los componentes del terreno en función de ciertos tipos de procesos, cualidades y características.

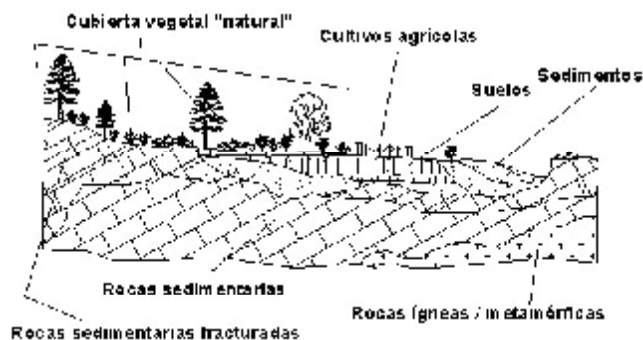


Figura 4.1: Ambiente y escenarios de trabajo

4.2. Conductividad hidráulica de suelos y rocas

4.2.1. Definición

Según (Heath; 1983; p.: 12) la *conductividad hidráulica* reemplaza al término de *coeficiente de permeabilidad* del terreno (*field coefficient of permeability*). Este término es el empleado para referirse a la cualidad de los materiales del terreno para transmitir el agua de un punto a otro en términos cuantitativos. La conductividad hidráulica es uno de los parámetros de la ecuación de Darcy. Sus unidades son de velocidad; comúnmente m/d ; *darcys*; y menos frecuentemente cm/h .

4.2.2. Fuentes de variación

Los valores intrínsecos del material original son modificados en forma notable en función de la interacción de diferentes variables. Las más importantes son: (Davis; 1969):

En rocas consolidadas:

- i) El grado de consolidación, donde interviene fundamentalmente el tipo y grado de cementación, y el nivel de compactación de las rocas elásticas. Ésta es una fuente de anisotropía en rocas.
- ii) La presencia y frecuencia de la fracturación, favoreciendo la alteración de los materiales (en rocas ígneas y metamórficas) y la disolución de los componentes solubles (tales como carbonatos y sulfatos). Esto se relaciona a su vez con la presencia y grado de desarrollo de procesos cársticos en rocas carbonáticas y evaporitas. Ésta es una fuente importante de anisotropía y heterogeneidad en materiales y afloramientos. En el caso de la conductividad hidráulica de rocas consolidadas, es común referirse a términos de conductividad primaria, cuando los valores corresponden a los intrínsecos del material, y conductividad secundaria cuando provienen del efecto de la fracturación, carstificación etc. Idéntico sentido tienen los términos porosidad primaria y porosidad secundaria.
- iii) La presencia de estructuras de flujo en rocas ígneas volcánicas. El ejemplo más citado es el de los basaltos (Figura 4.2). Éste es una fuente clara de anisotropía.

En sedimentos no consolidados:

- a) El grado de selección de los materiales, afectando a la heterogeneidad de los materiales.
- b) La anisotropía debida a la forma de depositación de los materiales (estratificación; presencia de lentes de diferente composición; grado de uniformidad de la masa de sedimentos).

Lo expuesto en el caso de los materiales no consolidados coincide con las expresiones de Davis (1969; p.: 82), el cual señala que:

- i) La conductividad hidráulica se relaciona en forma directa con la mediana del tamaño de los granos.
- ii) Para un valor dado de mediana del tamaño de grano, la permeabilidad disminuye con el aumento del desvío estándar.
- iii) Las distribuciones de grano unimodales poseen, en general, mayores conductividades que los materiales granulares cuya distribución de frecuencias sea polimodal.

Freeze y Cherry, (1979; p.: 37) exponen gráficamente algunos de las causas de la variación de la conductividad hidráulica en rocas y sedimentos (Figura 4.3), con los cuales se pueden analizar gráficamente alguno de los conceptos anteriores.

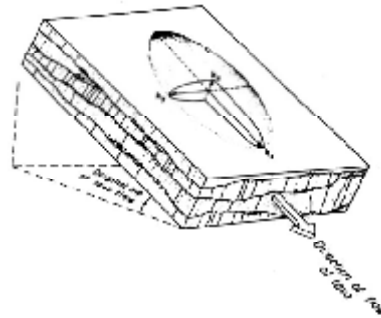


Figura 4.2: Influencia de la dirección de flujo en basaltos (En Davis; 1969; p.: 68).

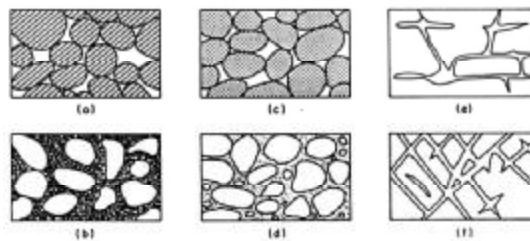


Figura 4.3: Características que influyen el valor de la conductividad hidráulica y la porosidad.

- En el caso (a), se trata de un depósito sedimentario bien seleccionado, el cual tendrá un alto valor de porosidad y conductividad hidráulica.
- El caso (b) representa a un depósito sedimentario pobremente seleccionado, el cual tendrá bajos valores de porosidad y permeabilidad.
- El caso (c) representa a un depósito de gravas bien seleccionado el cual presentará altos valores de porosidad y permeabilidad.
- El caso (d) representa a un depósito bien seleccionado de gravas, en el cual sus poros han sido rellenos por materiales finos, reduciendo así tanto su porosidad como su conductividad hidráulica. El caso
- El caso (e) representa a una roca cuya capacidad para la conducción hidráulica ha sido aumentada por disolución.
- El caso (f) señala a una roca cuya porosidad y permeabilidad ha aumentado por fracturación.

En el caso de los suelos, el factor clave que afecta a los valores de conductividad hidráulica es la estructura, es decir: el tipo y grado con que se agregan las partículas del suelo. La estructura contribuye mayoritariamente sobre el desarrollo de la macroporosidad de los suelos.

La Figura 4.4 (en: SCS; 1964; p.: 5) señala con claridad la influencia de esta cualidad edáfica en el desarrollo de la conductividad hidráulica. En suelos sin estructura (*single grain*), la conductividad dependerá del tamaño de grano de las partículas. En estructuras granulares finas, la conductividad será generalmente alta. En cambio, estructuras en bloques, dependiendo del tamaño de los mismos, o en suelos con estructuras prismáticas la conducción del agua será menor que las anteriores. Las estructuras que más claramente impiden altas velocidades en la conducción del agua serán las estructuras laminares o masivas.

Por otra parte, como ya pudo analizarse en el caso del almacenamiento del suelo, la densidad aparente será un indicador de la porosidad total y eficaz del suelo. Una modificación de ésta influirá en los valores finales de porosidad. Asimismo, en los suelos, el tipo de labor agrícola, contenido de sales y de materia orgánica afectan al desarrollo de la estructura, en consecuencia a la conductividad hidráulica y la porosidad.

Finalmente, el grado de desarrollo edáfico del suelo, es decir la forma y grado en que se diferencian distintos horizontes dentro del perfil, influyen decididamente en el grado de anisotropía y en la distribución de los valores de conductividad hidráulica y porosidad. Existen pocas referencias respecto a la variación de la conductividad hidráulica y la porosidad respecto de la *profundidad*. En este sentido, Davis (1969; p.: 85; expone un caso *particular*, en el cual se comprueba la disminución de los valores de conductividad hidráulica y porosidad a medida que aumenta la profundidad (Figura 4.5). Se trata de los valores de conductividad hidráulica en un suelo bien desarrollado, donde los materiales arcillosos han sido transportados por *iluvación*⁷ hacia las partes bajas del perfil. Lo señalado coincide con las hipótesis desarrolladas por Beven (2001) respecto a la reducción de la conductividad hidráulica a medida que aumenta la profundidad del suelo.

⁷Proceso que interviene en la formación y desarrollo edáfico, en el cual los materiales coloidales (arcillas y materia orgánica, entre otros) son transportados desde los horizontes superiores del perfil hacia los niveles inferiores del mismo.

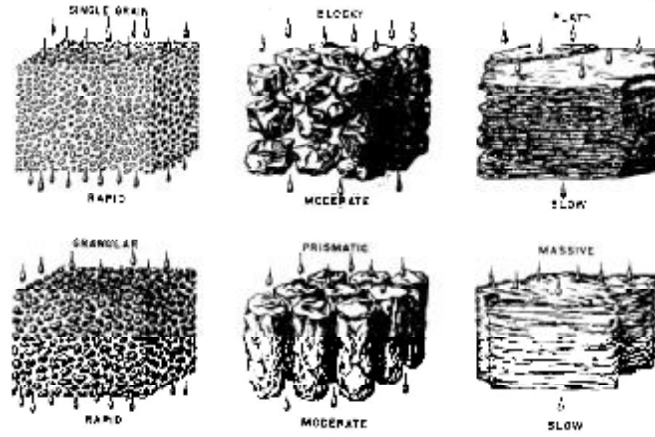


Figura 4.4: Influencia de la estructura edáfica en los valores de conductividad hidráulica.

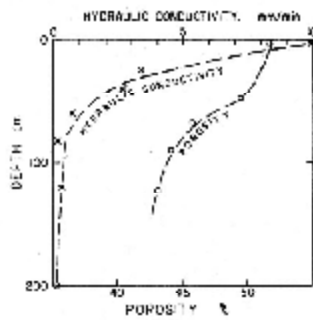


Figura 4.5: Variación de la conductividad hidráulica y la porosidad con la profundidad.

4.2.3. Valores de referencia

El origen de la información que corresponde a estas propiedades del terreno proviene de dos fuentes principales: la Hidrología, en el caso de materiales consolidados y no consolidados; y la Agronomía en el caso de los suelos. A continuación se exponen los resultados de analizar datos provenientes de veintiocho citas diferentes.

4.2.3.1. Rocas

En el caso de materiales consolidados, es común el estudio de la conductividad hidráulica en referencia al tipo litológico. Esta forma de representación, incluye normalmente referencias respecto al grado de consolidación de las rocas y la influencia de la fracturación en la variación de los valores. Para el caso particular de las rocas calcáreas, se agrega la presencia o ausencia de procesos cársticos. Asimismo, en el caso de los basaltos, se hace notar la presencia de estructuras de flujo.

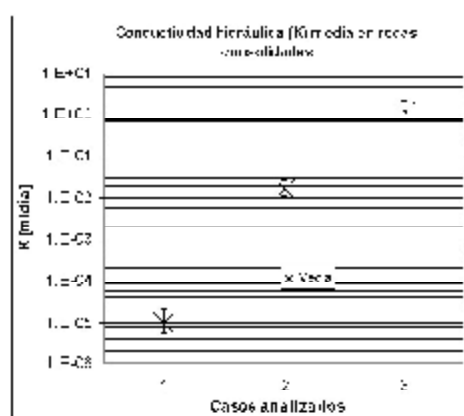


Figura 4.6: Valores medios de K en materiales consolidados

La Figura 4.6 y los cuadros 4.2 y 4.3 representan una síntesis de relación a los materiales consolidados. El total de valores fueron agrupados en tres grupos diferentes sobre la base de su estado de agregación y consolidación. En el Cuadro 4.2 se pueden distinguir así tres tipologías básicas en rocas consolidadas, cuyos valores medios de conductividad hidráulica son estadísticamente diferentes entre sí. La diferenciación se realizó en base al grado de modificación secundaria que sufrieron los materiales (fracturación y desarrollo de procesos cársticos). Puede observarse en el Cuadro 4.3 que la conductividad hidráulica es uno de los parámetros de mayor variabilidad dentro de los parámetros hidrológicos.

Caso	Estado del material
1	Rocas ígneas y metamórficas cristalinas con poco o nada de fracturación Rocas metamórficas con desarrollo de estructuras planares con poco o nada de fracturación Rocas sedimentarias clásticas gruesas, con poco o nada de fracturación Rocas sedimentarias clásticas finas y rocas sedimentarias no clásticas
2	Rocas ígneas, y metamórficas cristalinas, con bajo desarrollo de permeabilidad secundaria Rocas sedimentarias clásticas gruesas con bajo desarrollo de permeabilidad secundaria
3	Rocas ígneas, y metamórficas con fuerte desarrollo de permeabilidad secundaria Rocas metamórficas con desarrollo de estructuras planares y fuertemente fracturadas Rocas sedimentarias clásticas gruesas con fuerte desarrollo de permeabilidad secundaria Rocas sedimentarias no clásticas con fuerte desarrollo de permeabilidad secundaria

Cuadro 4.2: División de las rocas consolidadas según su grado de fracturación.

Caso	N	Media	L. inf.	L. sup.
1	44	$1,02E - 5$	$5,36E - 6$	$1,75E - 5$
2	87	$1,76E - 2$	$1,11E - 2$	$2,75E - 2$
3	59	$1,28E0$	$7,36E - 1$	$2,25E0$
ANOVA altamente significativo ($p < 0,01$)				

Cuadro 4.3: Valores de conductividad hidráulica saturada según el grado de fracturación de rocas consolidadas.

La Figura 4.7 es una representación gráfica y ampliada de los resultados anteriores. Está basado en los valores expuestos por Freeze y Cherry, (1975), y Heath; (1983), y se complementaron con los datos provenientes utilizados en los análisis anteriores. Se destacan en esta figura los elementos considerados en la clasificación de rocas, expuesta anteriormente. Cabe destacar que en el caso de sales y yesos, el extremo superior de conductividad hidráulica no está determinado en base a referencias bibliográficas, ya que esos materiales pueden sufrir un alto grado de disolución. En todo caso, el extremo que se señala en la Figura 4.7 es una propuesta de este trabajo.

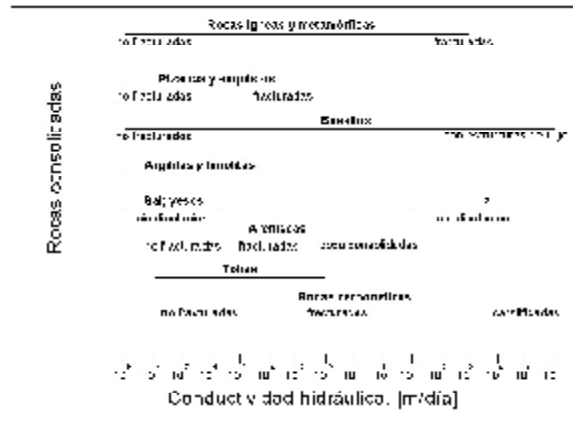


Figura 4.7: Rangos de la conductividad hidráulica en materiales consolidados.

Complementando la Figura 4.7, la Figura 4.8(A) (en Hoek y Bray; 1981; p.: 133) indica un criterio cuantitativo para la estimación de la conductividad hidráulica en caso de masas rocosas fracturadas. En la misma figura, Selley (2000) aporta una síntesis de las relaciones entre conductividad hidráulica, porosidad y grado de fracturación en rocas consolidadas que matizan los valores indicados anteriormente (Figura 4.8(B)).

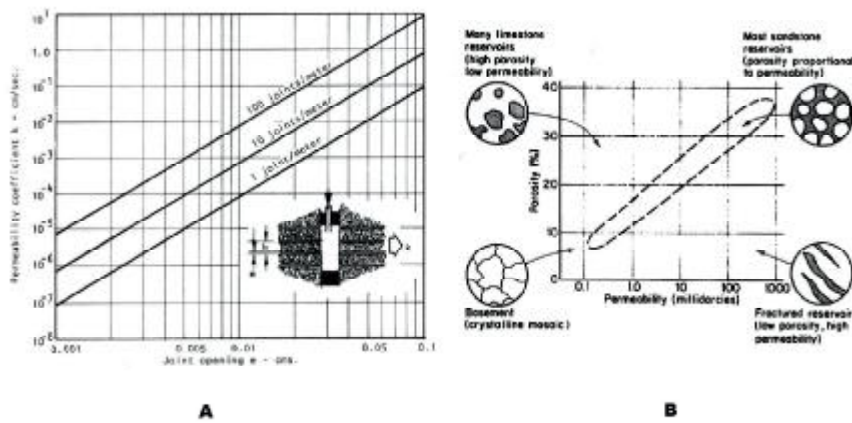


Figura 4.8: Valores de conductividad hidráulica en función de la densidad de fracturación.

4.2.3.2. Sedimentos no consolidados

En cuanto a los materiales no consolidados se elaboró una síntesis similar al caso de las rocas. Aquí, la diferenciación de clases se basó en cuatro distintos tipos de mezclas posibles de encontrar en el terreno (Figura 4.9). En este caso se utilizaron datos provenientes de doce citas diferentes. Puede observarse con claridad que, desde el punto de vista de promedios, los valores se separan de los extremos, agrupándose en valores no inferiores a 1.10^{-2} y no superiores a 1.10^2 , lo equivalente al rango comprendido entre *limos y arenas*.

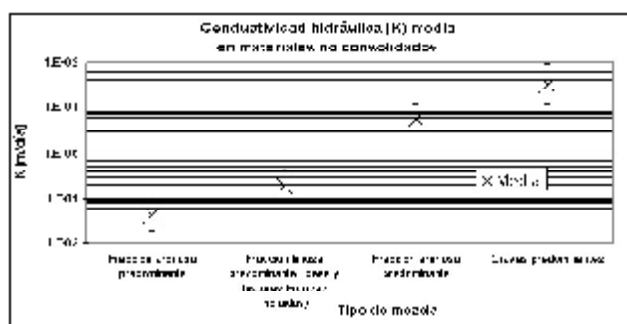


Figura 4.9: Categorías básicas de K en mezclas sedimentarias

Mezcla	N	Media	L. Inf.	L. Sup.
Fracción arcillosa predominante	34	4.15E-2	1.81E-2	1.00E-1
Fracción limosa predominante	41	1.86E-1	3.96E-1	8.74E-2
Fracción arenosa predominante	47	5.49E0	1.11E1	2.71E0
Gravas predominantes	21	3.21E1	9.24E1	1.12E1
ANOVA altamente significativo ($p < 0,01$)				

Cuadro 4.4: Conductividad hidráulica en mezclas sedimentarias

En el caso particular, el Cuadro 4.5 señala la influencia de los materiales finos en los valores medios de la conductividad hidráulica de las gravas y materiales gruesos, cuando éstos no se presentan en estado puro. Así puede observarse que el valor de la conductividad hidráulica depende del material que se encuentra entre los clastos gruesos (matriz) y, en consecuencia, el efecto de la *selección* del sedimento sobre esta cualidad.

El grado de mezcla en materiales sedimentarios no consolidados y el dominio de un componente sobre los demás, ejerce un efecto claro sobre los valores de conductividad hidráulica. Basándose en las curvas granulométricas creadas por Dürbaum

Mezclas	k media [m/d]	L. inf.	L. sup.	N
Gravas con arcillas y/o limos	3.E - 01	7.E - 02	2.E + 00	9
Gravas con arenas	1.E + 01	5.E + 00	3.E + 01	32
ANOVA altamente significativa ($p < 0,01$)				

Cuadro 4.5: Mezcla de gravas.

Caso	Mediana[ϕ]	Selección	k [m/d]
1	-3.6	2.2	2.E+03
2	-1.42	1.8	6.E+02
3	-0.5	1.5	6.E+01
4	0.25	1.4	6.E+01
5	1.06	1.4	4.E+01
6	2.2	1	7.E+00
7	2.99	1	4.E+00
8	3.57	0.7	1.E+00
9	4.28	0.99	6.E-01
10	5.27	1.79	6.E-02
11	6.47	2.05	8.E-02
12	7.48	2.2	8.E-03

Cuadro 4.6: Comparación entre valores de conductividad hidráulica, mediana y selección, en sedimentos no consolidados.

(1963; en Custodio y Llamas; 1976; p.: 1497) es posible comprobar este fenómeno. El Cuadro 4.6 señala 12 casos diferentes de materiales (desde muy gruesos hasta muy finos) en los cuales se han calculado los valores de mediana y selección según lo propuesto por Tauber (1997a y 1997b). En este cuadro, la escala granulométrica utilizada es la ϕ (Ecuación 4.2). Así a mayor tamaño de la mediana (Ecuación 4.3) del grano del material, le corresponde un menor valor en grados ϕ . La selección del sedimento (Ecuación 4.4) expresa el grado de homogeneidad en la distribución del tamaño de grano. Cuanto más homogéneo sea el material, menor es el valor de selección.

$$\phi = \log_2 \delta \quad (4.2)$$

donde δ es el diámetro del grano en mm .

$$mediana = Q_{50} \quad (4.3)$$

$$s = \sqrt{Q_{50}/Q_{75}} \quad (4.4)$$

En la Figura 4.10 se comprueba la relación directa entre el tamaño mediano y la selección de los sedimentos y el valor de la conductividad hidráulica. Se puede comprobar la influencia de la selección en los valores de conductividad hidráulica. Puede observarse que, para valores superiores a 1 m/d , la relación conductividad/selección es directa, es decir que a medida que los materiales se hacen más gruesos, y las proporciones de finos se reducen respecto del total, los materiales serán más “limpios”, y su conductividad será mayor. Por otra parte, si los valores de permeabilidad son inferiores a 1 m/d , la relación conductividad/selección es inversa. Esto se explica porque, a medida que predominan los materiales más finos (limos y arcillas), la conductividad disminuye, tal como se comprueba en la misma figura.

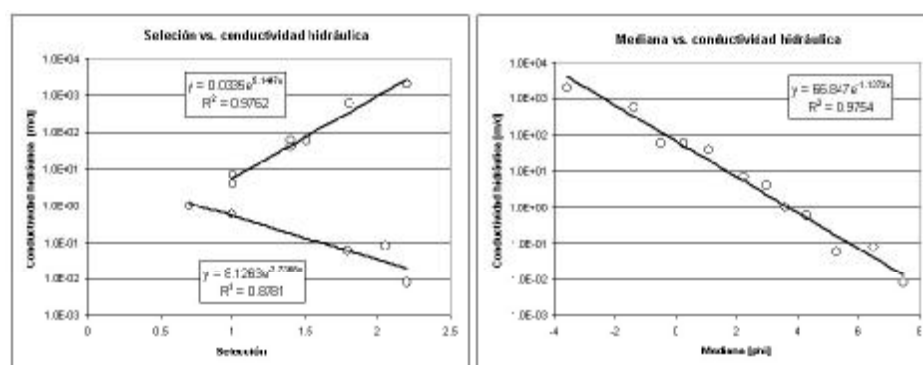


Figura 4.10: Relación entre la conductividad hidráulica y el tamaño mediano y la selección de los sedimentos.

En el mismo sentido, Poireé y Ollier (1986); expusieron una aproximación al cálculo de la conductividad hidráulica en función de relacionar su valor con el tamaño de las partículas de un material granular (Figura 4.11).

Por otra parte, las figuras 4.12 y 4.13 indican procedimientos prácticos para determinar estos valores, en función de la curva granulométrica de los sedimentos (ambos en: Custodio y Llamas; 1976). Como puede observarse, las relaciones entre tamaño de grano y conductividad hidráulica son claras. Ésta es la razón más clara para explicar lo común que es encontrar en la literatura relaciones entre las características granulométricas y los valores de permeabilidad o porosidad de los sedimentos no consolidados, tales como las expuestas. Sin embargo, se ha destacado suficientemente la influencia claramente condicionante de la selección en el valor de esta cualidad hidrológica, tema no siempre destacado en la literatura.

Finalmente, para completar el panorama descripto, la Figura 4.14 es una representación gráfica y ampliada de los resultados anteriores. Está basado en los valores

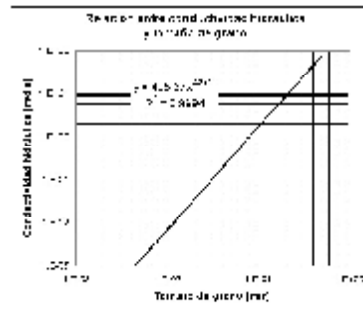


Figura 4.11: Conductividad hidráulica como función del tamaño de grano de un material granular (Tomado de Poireé y Ollier; 1986; p.: 182).

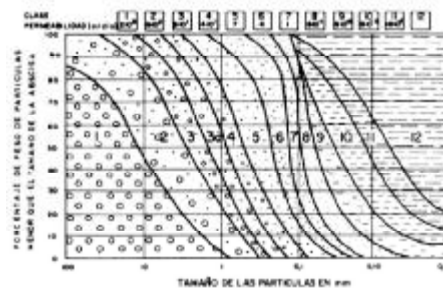


Figura 4.12: Relación entre conductividad hidráulica y textura, según Dürbaum (en Custodio y Llamas, 1976).

expuestos por Freeze y Cherry, (1979), y Heath; (1983), y se complementaron con los datos provenientes utilizados en los análisis anteriores. Se destacan aquí el valor de ciertas mezclas características en Sedimentología así como el caso del till, un sedimento de origen glaciar caracterizado por el amplio rango de componentes que involucra (desde arcillas hasta gravas y bloques). A modo de referencia, se incluye también los valores hallados de conductividad para fangos orgánicos (generalmente vegetales) en estado parcial de descomposición.

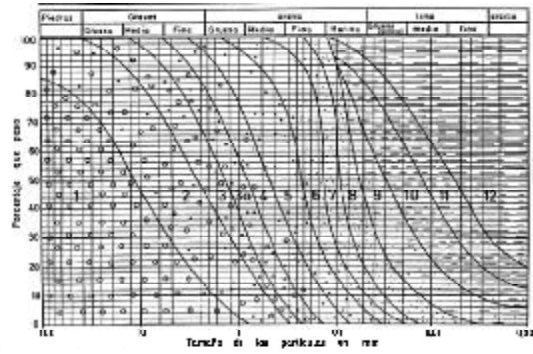


Figura 4.13: Relación entre conductividad hidráulica y textura, según Breddin (en Custodio y Llamas, 1976).

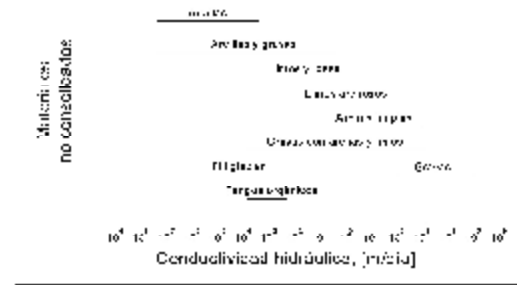


Figura 4.14: Rangos de conductividad hidráulica en materiales sedimentarios no consolidados.

4.2.3.3. Suelos

En el caso particular de los suelos, Rawls y Brakensiek (1983; p: 109) presentaron un conjunto de valores de conductividad hidráulica saturada en función de la textura del suelo (excluyendo los materiales mayores a 2 mm.). Éstos pueden observarse en la Figura 4.15. La referencia utilizada para estos valores es *exclusivamente* la granulométrica, en consecuencia no se ha tomado en cuenta la estructura del suelo. Puede observarse así que, igual que en los sedimentos, los valores de conductividad disminuyen a medida que aumenta el dominio de los materiales finos, en forma aproximadamente directa.

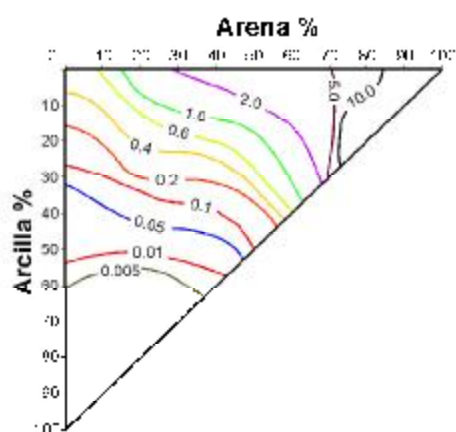


Figura 4.15: Conductividad hidráulica saturada en suelos [cm/h].

Autores mencionados en el resumen de los cuadros 4.3; 4.4; 4.5
Davis, S. N. y De Wiest, R.J.M. (1971); Davis, N. S.(1969); Costa y Baker (1981); FAO (1990); Jiménez (1980); Mitchell, C. W. (1991); Polubarinova - Kochina, P. Y (1962); Riou, G. (1992).

Cuadro 4.7: Autores mencionados en cuadros referidos a la conductividad hidráulica saturada de suelos, rocas y material sedimentario

4.3. Almacenamiento del agua en el suelo

Éste es un tema profundamente analizado en la Física de suelos. Los conceptos desarrollados por esta rama de la ciencia, son normalmente utilizado en agronomía. En ésta, el contenido de humedad tiene importancia en particular en Edafología y producción vegetal, involucrando así al riego de cultivos.

En esta Tesis las definiciones y valores de referencia analizados provienen básicamente de trabajos en materia agronómica, cuyos resultados sean comparables en la literatura científica y técnica.

4.3.1. Definiciones

4.3.1.1. Contenido de humedad en suelos

El contenido de humedad en el suelo puede definirse en términos porcentuales o como la lámina de agua equivalente (en milímetros).

En términos porcentuales se define como la fracción de agua contenida en el total de una masa dada de suelo (medidas éstas en términos de masa o volumen, Hillel; 1980; p.: 12 - 13).

$$w = M_w/M_s \quad (4.5)$$

donde:

w : es el contenido másico de humedad

M_w : masa de agua contenida en la muestra de suelo [*gr.*]

M_s : masa de la muestra de suelo seco a 105°C [*gr.*]

También:

$$\theta = (V_w/V_t)100 \quad (4.6)$$

donde:

θ : es el contenido volumétrico de humedad [%]

V_w : volumen de agua contenida en la muestra de suelo [*cm*³]

V_t : volumen de la muestra de suelo [*cm*³]

Ambos valores de contenido de humedad están relacionados en función de la densidad aparente del suelo y la densidad del agua.

4.3.1.2. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa de una muestra de suelo y el volumen que ésta ocupa (Hillel; 1980; p.: 1 l). Ésta es diferente, y menor en valores que la densidad real de las partículas minerales que componen el suelo, cuyo valor medio se considera igual a 2.65 gr/cm^3 . Así:

$$\rho_b = M_s/V_t \quad (4.7)$$

donde:

ρ_b : densidad aparente del suelo seco [gr/cm^3]

M_s ,: masa de la muestra de suelo [gr]

V_t ,: volumen de la muestra de suelo [cm^3]

Entonces:

$$\theta = w \frac{\rho_{bd}}{\rho_w} \quad (4.8)$$

donde:

ρ_{bd} : es la densidad aparente del suelo seco [gr/cm^3].

ρ_w : densidad del agua (por convención) = 1 [gr/cm^3]

Para analizar el contenido de agua en un suelo no saturado, se hace referencia a la relación entre el *potencial matricial* y el *contenido másico de humedad*.

4.3.1.3. Potencial matricial y curvas características

El agua del suelo puede contener diferentes cantidades y formas de energía. A este contenido se refiere el término de *estado energético*.

La energía que puede contener el agua del suelo puede ser la cinética y la potencial. La primera de éstas, dado que la velocidad de circulación en los suelos es muy lenta, se considera despreciable. En consecuencia, la *energía potencial* es la que determina el estado energético del agua en el suelo. De esta forma es posible analizar el *trabajo*⁸ que debe realizar una planta para extraer una determinada cantidad de agua del suelo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se denomina *potencial matricial* al valor de la cantidad de energía por unidad de volumen de agua requerida para transferir de forma reversible e isotérmica una cantidad infinitesimal de agua, desde un estado

⁸Bajo condiciones donde sea posible realizar una transferencia reversible e isotérmica de un punto a otro en la matriz del suelo.

de referencia a un punto determinado de la fase líquida sin que varíe la presión de referencia (P_o). Este valor es negativo en suelos no saturados, mientras que por debajo del nivel freático es igual a cero. Sus unidades son: atmósferas o kPa ⁹.

La relación entre el potencial matricial (también llamada tensión matricial) y el contenido de humedad se analiza midiendo el contenido de humedad para distintos valores de potencial matricial en una muestra de suelo (Hillel; 1980; p.: 148-152). Estos valores se grafican, describiendo así la curva característica del suelo (Figura 4.16).

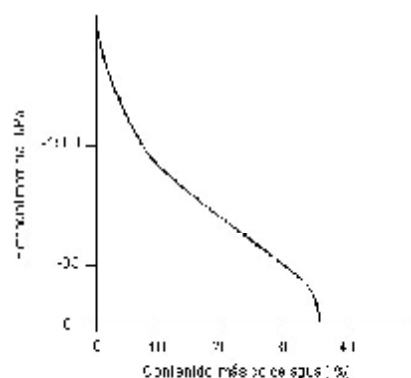


Figura 4.16: Curva característica para un suelo.

Las curvas características son la base de información para determinar los valores del contenido de humedad del suelo cuando éste se encuentra a capacidad de campo y/o en el punto de marchitez permanente.

La Figura 4.17 (SCS; 1964) expone una síntesis gráfica de lo expresado. Se trata de las curvas características de dos tipos texturales de suelos. En las ordenadas se representa la tensión matricial (*soil moisture tension*, medida en atmósferas), y en las abscisas el contenido másico de humedad porcentual.

4.3.1.4. Capacidad de campo

Porta et al. (1994; p.: 310), coincidiendo con el SCS (1964; p.: 7-14) explican que la capacidad de campo (en inglés: *field capacity*) se define como el contenido de agua en un suelo después de 48 horas de un riego o lluvia abundante. Se supone así que transcurrido ese tiempo empieza un drenaje lento del agua contenida en el suelo (Figura 4.18). Los mismos autores señalan que esta medida representa el *contenido máximo de agua* que puede retener un suelo cuando la mayoría de los macroporos

⁹1 $Atm = 1.013 \cdot 10^5 Pa$

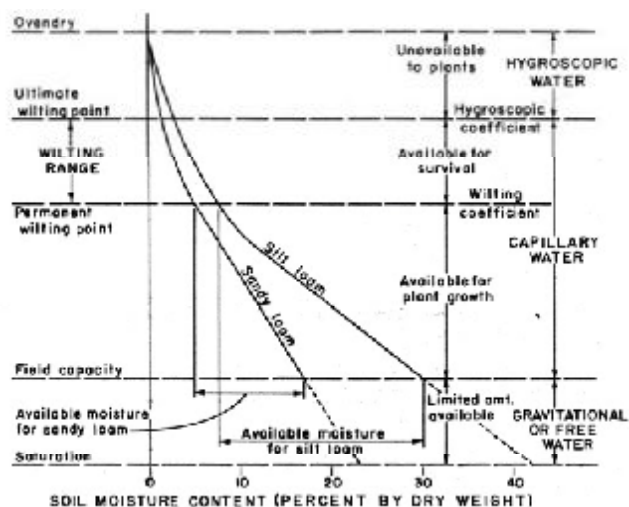


Figura 4.17: Contenido de humedad del suelo.

están ocupados por aire. El SCS (1964 ; p.: 7-14) expresa que se considera que un suelo alcanza la capacidad de campo cuando éste ha drenado el total del agua retenida por *fuerzas gravitatorias* (Figura 4.17).

En la práctica, se considera que la capacidad de campo se obtiene cuando una muestra de suelo está en equilibrio con una presión negativa (succión) de 33 kPa en un equipo de placas de presión.

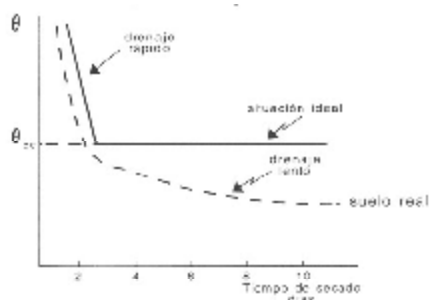


Figura 4.18: Drenaje de un suelo y capacidad de campo.

Hillel(1980) propone una interesante discusión del tema. Sobre la base de autores y estudios anteriores, se puede afirmar que analizando el humedecimiento de suelos, los cambios en el contenido de agua decrecen rápidamente respecto al tiempo.

Ahuja y Nielsen (1990) indican que la velocidad de drenaje en suelos decrece progresivamente hasta ser prácticamente despreciable o nula transcurrido unos pocos días desde el momento que fue humectado el perfil de suelo. Así, el contenido de agua que posee el suelo en el momento que el drenaje interno se detiene es denominado como capacidad de campo. Esto se logra normalmente entre los 3 y los 5 días después de llegar a la capacidad de campo.

El problema en la definición de la capacidad de campo de un suelo se basa en que normalmente se lo ha considerado como una característica física intrínseca del suelo, cuando en realidad esto no es completamente correcto. Ahuja y Nielsen (1990; p.: 145) y Nachabe (1998) indican que en suelos sin problemas de drenaje, o niveles acuíferos libres cercanos a la superficie, el proceso de drenaje interno es apreciable a lo largo de algunos días (a excepción de suelos de textura gruesa). Los mismos autores indican que el intervalo de tiempo en el cual el proceso de drenaje es apreciable, *no es constante para todos los suelos* siendo dependiente no sólo del tipo de suelos sino de la cantidad de agua aplicada a los mismos. En consecuencia, el contenido de humedad de un suelo a capacidad de campo es una cualidad, cuyo comportamiento es dinámico. Así Ahuja y Nielsen (1990; p.: 145) ejemplifican el comportamiento de un suelo durante el proceso de drenaje interno utilizando una serie de valores de contenido de humedad, respecto del tiempo de drenaje, y ajustándole a éstos la ecuación (4.9); (Figura 4.19). En el caso A; la figura representa al contenido de agua retenido a diferentes profundidades dentro de la zona humectada en un suelo franco arenoso, luego de ser aplicado una lámina de riego de 10 cm. En el caso B; el suelo es el mismo, pero la lámina de riego aplicada fue de 5 cm. En este sentido, Nachabe, (1998), analizando la distribución de la humedad durante el proceso de drenaje de agua en el suelo, encuentra que si se considera un flujo de drenaje de 0.05 mm/d, los valores de contenido de agua a capacidad de campo son similares los tradicionalmente medidos a una presión de succión de 1/3 de bar.

$$W = W_0 t^{-b} \quad (4.9)$$

donde:

W : es la lámina de agua [cm] almacenada en el perfil de suelo [cm].

W_0 es la lámina de agua almacenada en el perfil de suelo en $t = 0$ [cm].

t : tiempo de redistribución posterior a la aplicación del agua sobre el suelo [días].

b : coeficiente de calibración

Por otra parte, la capacidad de campo es tradicionalmente considerada como el límite superior del contenido de agua disponible para el consumo de las plantas. Ahuja y Nielsen (1990; p.: 146) indican que, basándose en citas anteriores; este

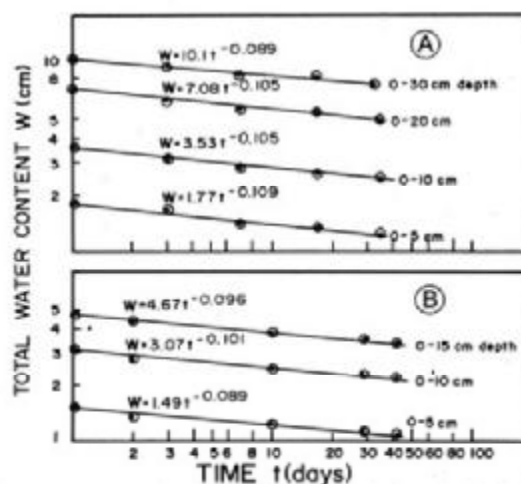


Figura 4.19: Evolución temporal del contenido de humedad del suelo.

límite superior es el contenido de agua cuando se ha reducido en un 0.1 a un 0.2 % del contenido total de agua almacenada, a causa del drenaje interno diario del suelo. En la práctica, esto implica el transcurso de 2 a 12 días a partir de la aplicación del agua. Estas evidencias ponen en duda al concepto tradicional, reafirmando que (en términos estrictos) *el valor de capacidad de campo debe analizarse en función del comportamiento del suelo*, como medio poroso no saturado. Sin embargo, cabe destacar que en origen estos conceptos han sido establecidos dada la necesidad de contar con valores *de referencia* respecto al comportamiento hídrico del suelo. Su objetivo es la aplicación de criterios prácticos en el diseño y control del riego y manejo de cultivos (bajo riego o en secano), una actividad agronómica fundamentalmente práctica. Por lo tanto, es necesario separar los términos prácticos y descriptivos de los análisis *físicamente correctos*.

En síntesis: el término de capacidad de campo es básicamente práctico y usualmente preciso, aunque no es el correcto si se lo utiliza para describir en términos exactos la dinámica hídrica del suelo.

4.3.1.5. Punto de marchitez permanente

Porta et al. (1994; p.: 31 1) y SCS (1964; p.: 7-14) indican que el punto de marchitez permanente (en inglés: *wilting point*) se define como el contenido de humedad por debajo del cual las plantas no son capaces de extraer agua del suelo. Corresponde al límite inferior de la retención hídrica por medio de fuerzas capilares absorbibles por las raíces. Coincidentemente, el SCS (1964; 7-14) indican que el punto de marchitez permanente es aquel donde el suelo sólo conserva el agua retenida principalmente

por medio de fuerzas higroscópicas (Figura 4.17).

En la práctica, este valor se estima como el contenido que retiene una muestra de suelo equilibrada con una presión negativa (succión) de 1500 kPa en un equipo de placas de presión.

De la misma manera que en el caso anterior, el término de punto de marchitez permanente resulta de una generalización en términos operativos. En términos estrictos y puntuales, este valor será no una característica del suelo sino una *cualidad*, resultante de la evolución de las relaciones agua-suelo-planta.

4.3.1.6. Agua disponible

En Agronomía, se denomina *agua disponible* o *agua útil* al contenido de humedad del suelo capaz de ser *aprovechado por las plantas*. Es la diferencia entre el contenido de humedad del suelo a *capacidad de campo* y en el *punto de marchitez permanente*. La capacidad de almacenamiento de agua útil en un suelo se denomina capacidad de retención de agua disponible (*CRAD*; Porta et al.; 1994; p.: 310).

Si se observa la Figura 4.17, puede comprobarse que el rango de agua disponible representa *aproximadamente* al contenido de agua capilar del suelo.

Técnicamente, una vez obtenidos estos valores, el contenido de agua disponible se calcula como función de la *profundidad de cada horizonte de suelo*, *densidad aparente* y los *contenidos de humedad* a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente (ecuación 4.10).

$$H_u = \frac{\rho_b \cdot p \cdot (H_{cc} - H_{pmp})}{\rho_w \cdot 100} \quad (4.10)$$

donde:

H_u : contenido de agua útil [mm].

H_{cc} : contenido de humedad a capacidad de campo [porcentaje en peso de suelo seco].

H_{pmp} : contenido de humedad en el punto de marchitez permanente [% en peso de suelo seco].

p : profundidad del suelo considerado [m].

Finalmente, para el perfil de suelo analizado se obtiene que:

$$CRAD = \sum_i H_{u_i} \quad (4.11)$$

Al igual que en el caso anterior, la definición del rango de agua disponible para el consumo de las plantas es un término susceptible de discusión.

En principio puede llegar a considerarse que dentro de este rango, el agua está igualmente disponible por las plantas, aunque es natural que la disponibilidad de agua disminuye progresivamente a medida que los potenciales hídricos se hacen progresivamente más negativos desde la capacidad de campo al punto de marchitez permanente. Ahuja y Nielsen (1990; p.: 146) lo destacan.

Por otra parte, la relación suelo-planta no será la misma a medida en todo el intervalo de agua útil, ya que el organismo deberá realizar mayor trabajo a medida que los potenciales disminuyan. Ahuja y Nielsen (1990) señalan este tipo de comportamiento (Figura 4.20).

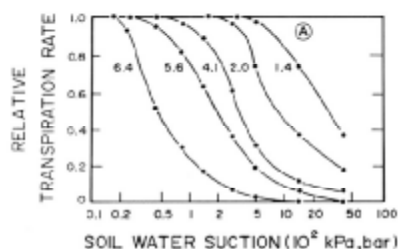


Figura 4.20: Variación de la transpiración vegetal en función del contenido de agua en el suelo.

En síntesis, el contenido de agua útil es un término eficiente en función de que sea considerado como el valor de referencia del intervalo en el cual el suelo puede actuar como un reservorio *dinámico* de agua.

4.3.1.7. Materia orgánica

Por otra parte, en base a lo expuesto por Porta et al.(1994; p.: 168) se considera aquí como *materia orgánica* al contenido de materia orgánica oxidable incorporada en la matriz de suelo. Se hace así una diferenciación clara entre:

- i) El contenido de material de origen orgánico (generalmente vegetal) que cubre la superficie del suelo y que está parcialmente descompuesta o intacta (generalmente conocido como mantillo vegetal o “mantillo”).
- ii) El contenido de material de origen orgánico (generalmente vegetal) que forma parte de materiales sedimentarios localizados en ambientes particularmente húmedos, como marismas, albuferas, turberas, etc.

- iii) El conjunto de compuestos orgánicos que han sido incluidos íntimamente en el suelo (generalmente los primeros horizontes) producto de procesos edáficos. Ésta se conoce también como materia *orgánica mineralizada* (en: Porta, et al.; 1994; p.: 187.)

4.3.2. Fuentes de variación

El contenido de humedad del suelo está directamente afectado por:

- i) La *textura del suelo*; a menor tamaño de grano, aumenta el contenido de humedad.
- ii) La presencia de *fragmentos de roca* o materiales de tamaño de grano superior al de las arenas. A mayor contenido de fragmentos gruesos, mayor es la reducción del almacenamiento hídrico del suelo. Así, dado un suelo con determinada relación entre arenas, limos y arcillas, su capacidad de almacenamiento será mayor que si éste incluyera, además, un cierto porcentaje de fragmento de rocas o granos gruesos (por ejemplo: gravas).
- iii) *Densidad aparente*: afecta a la distribución y tamaño de los poros del suelo donde se retiene el agua. Un aumento en la densidad aparente (por ejemplo: por compactación en labores de labranza) disminuye el contenido hídrico.
- iv) *Contenido de materia orgánica*, la cual incrementa el almacenamiento hídrico a causa de sus propiedades específicas (más retención de agua) y porque afecta a la estructura del suelo y a la densidad aparente del mismo. Un aumento en el contenido de materia orgánica provoca un aumento en el contenido de agua almacenada en el suelo.
- v) *Contenido de sales solubles* en el suelo ¹⁰: la presencia y concentración de sales solubles en el perfil de suelos modifica reduce la capacidad de almacenamiento hídrico, por afectar los valores de la presión osmótica en el complejo suelo-agua-planta y el grado de agregación de las partículas del suelo.

Los valores de referencia que se consideran son aquellos que normalmente se encuentran en condiciones *normales*, es decir:

- a) En ausencia de perturbaciones o cambios importantes en los valores de los factores señalados anteriormente.
- b) En condiciones de *homogeneidad del perfil*, es decir que todo el intervalo de suelo que se analiza puede considerarse homogéneo a escala de campo.

¹⁰Se hace referencia a compuestos solubles de sodio. Una referencia detallada de sus efectos (salinización y alcalinización) en suelos es expuesta por Richards (1954).

En consecuencia, si se constata la presencia de concentración de sales, cambios en la densidad aparente, materia orgánica, presencia de fragmentos gruesos, etc.; será necesario modificar los valores de referencia.

Por otra parte, en un suelo que presente diferentes horizontes en su perfil, se deberá realizar el cálculo en cada uno de los mismos y, finalmente, realizar un promedio ponderado de los mismos en función del espesor de cada horizonte respecto a la profundidad total analizada.

4.3.3. Agua disponible: Valores de referencia

El Cuadro 4.8 señala los cuatro grandes grupos en que se dividió el rango total de combinaciones entre arenas; limos y arcillas. El primer grupo incluye a las texturas más gruesas; el segundo a las mezclas más o menos similares de los tres componentes. El tercer y cuarto corresponden al dominio de las arcillas y limos, respectivamente.

1	Texturas arenosas, areno-francas y franco-arenosas
2	Texturas franca, areno-arcillosas, franco-areno-arcillosas y franco-arcillosas
3	Texturas arcillosas y arcillo-limosas
4	Texturas limosas y franco-limosas

Cuadro 4.8: Tipos texturales.

En el Cuadro 4.9 y en la Figura 4.21 se presentan los resultados obtenidos de analizar los valores medios en cada una de las categorías mencionadas. El análisis de la varianza señala una diferencia significativa entre las medias de los diferentes grupos. Los intervalos LSD expuestos en este el cuadro y en la figura antes mencionados indican que prácticamente no existe solapamiento entre los diferentes intervalos; por lo cual se puede afirmar que los cuatro grupos texturales poseen valores medios de agua útil estadísticamente diferentes entre sí. Estos valores representan una primera aproximación al problema. Así, a medida que disminuye el tamaño de grano de las partículas de suelo, aumenta la capacidad de almacenamiento hídrico. Los valores medios se duplican entre las texturas arenosas y las arcillosas, alcanzando un máximo de 15% y un mínimo de 7%.

Un procedimiento algo más sofisticado, pero más correcto tanto en términos teóricos y prácticos es el que exponen Rawls y Brakensiek (1983; p.: 111) y que puede observarse en las figuras 4.22 y 4.23. Mediante el mismo, es posible calcular los valores correspondientes al contenido de humedad en capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente, en forma independiente. Finalmente, el cálculo del agua útil se realiza mediante las ecuaciones ya mencionadas.

Tipo	N	Media	L. inf.	L. sup.
1	56	7.5 %	7.0 %	8.1 %
2	97	12.1 %	11.5 %	12.6 %
3	55	16.8 %	15.9 %	17.7 %
4	29	14.0 %	12.9 %	15.1 %

ANOVA: altamente significativo ($p < 0,01$)

Cuadro 4.9: Valores medios del agua disponible en suelos.

Al comparar los valores provenientes de diferentes fuentes se puede comprobar la coherencia en la cifras. Esto significa que, en esencia, la estimación de valores de agua disponible en suelos varía dentro de un rango acotado y concreto, lo cual facilita el proceso mismo de estimación. Así, la aparición de valores anómalos por exceso o por defecto son claramente distinguibles por el operador y pueden ser descartados con facilidad.

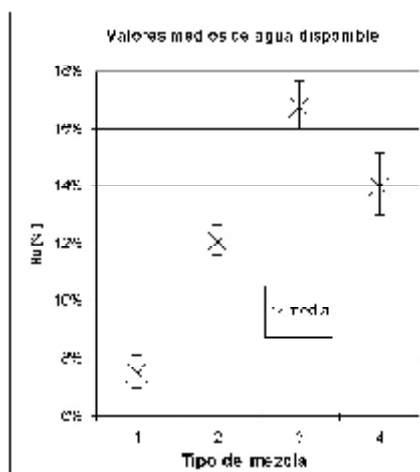


Figura 4.21: Valores medios de agua disponible.

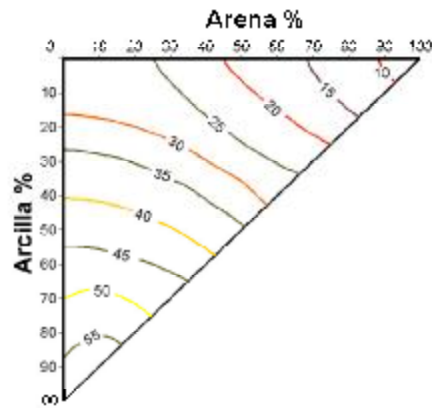


Figura 4.22: Contenido de humedad a capacidad de campo ([%]).

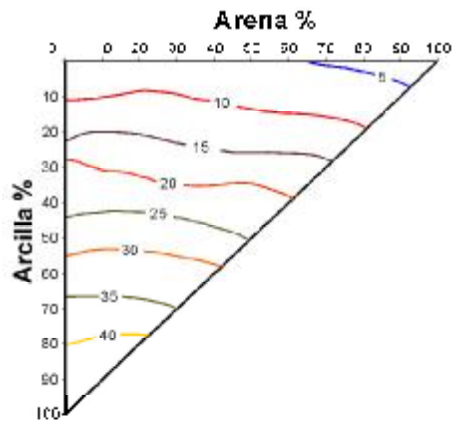


Figura 4.23: Contenido de humedad en el punto de marchitez permanente ([%]).

4.3.4. Densidad aparente: Valores de referencia

Los posibles valores de la densidad aparente en suelos no están ampliamente disponibles en la literatura. El Cuadro 4.10 y la Figura 4.24 señalan los valores medios obtenidos en esta revisión bibliográfica. Para su cálculo se tomaron los mismos intervalos de textura considerados en el análisis anterior. Se observa que los valores medios de cada grupo son estadísticamente diferentes de los restantes; a excepción de los pertenecientes a la fracción limosa y limo arcilloso (Tipo 4). Esto último puede deberse a la escasez de valores hallados en la literatura.

Tipo	N	media	L. inf.	L. sup.
1	18	1.6	1.5	1.6
2	22	1.4	1.3	1.4
3	9	1.3	1.2	1.3
4	2	1.2	1.1	1.3

ANOVA: altamente significativo ($p < 0,01$)

Cuadro 4.10: Valores medios de la densidad aparente.

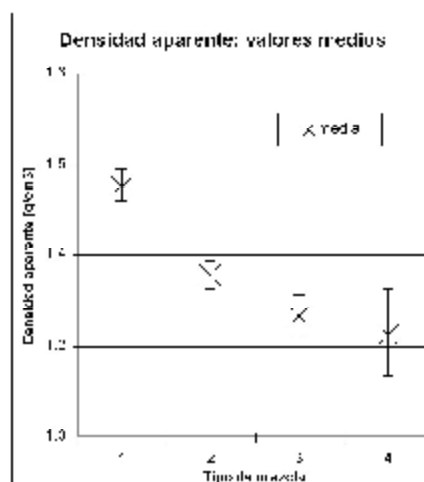


Figura 4.24: Valores medios de la densidad aparente.

Porta, et al. (1994; p.: 264) exponen dos cuadros de valores referidas a la densidad real de los componentes minerales y orgánicos del suelo (Cuadro 4.11) y de la densidad aparente del suelo (Cuadro 4.12).

Mineral	Densidad real [gr/cm ³]
Minerales de arcilla	2.0-2.65
Cuarzo, feldespato	2.5-2.6
Minerales con elementos metálicos	4.9-5.3
Horizontes minerales	2.6-2.75
Horizontes orgánicos	1.1-1.4
Horizontes ricos en minerales pesados	2.75
Valor medio para suelos minerales	2.65
Valor medio para horizontes ricos en materia orgánica	1.45

Cuadro 4.11: Densidad real de los componentes del suelo.

Horizonte	Densidad real [gr/cm ³]
Arenoso	1.45 – 1.6
Arcillosos con estructura desarrollada	1.05 – 1.1
Compactados	1.9 – 1.95
Suelos volcánicos	0.85
Valor medio	1.35

Cuadro 4.12: Densidad aparente de horizontes de suelo.

Como dato adicional, Poireé y Ollier (1986; p.: 17) indican que la densidad aparente en suelos arenosos con “alto”¹¹ contenido de materia orgánica varía entre 0.6 y 1.0 gr/cm³. Porta et. al. (1994; p.: 264) indican que en horizontes turbosos la densidad aparente puede ser de 0.25 gr/cm³.

Debe tenerse en cuenta que la densidad aparente es una cualidad fácilmente modificable del suelo por acciones antrópicas. Las labranzas con remoción la reducen temporalmente, la compactación (por pisoteo animal o labranzas repetidas con humedades cercas al “límite plástico” de Atterberg la reducen (Puricelli, C.; 2003, com. pers.).

Rawls y Brakensiek (1983) proponen una forma de aproximar al valor de la densidad aparente, por medio de la Ecuación(4.12) (Figura 4.25). Los resultados no siempre se adecúan a la realidad.

¹¹Los autores no especifican el valor del contenido de materia orgánica.

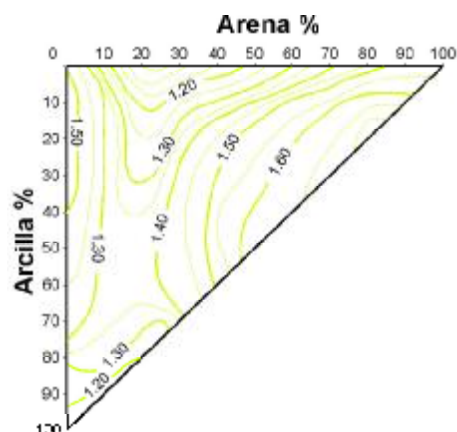


Figura 4.25: Densidad aparente de la fracción mineral

$$D_{ap} = \left(\frac{MO}{OMD} + \frac{100 - MO}{MD} \right)^{-1} 100 \quad (4.12)$$

donde:

D_{ap} : Densidad aparente [gr/cm^3]

MO : contenido de Materia orgánica de suelo [%]

OMD : densidad aparente media de la materia orgánica [$0.224 gr/cm^3$]

MD : densidad aparente de la fracción mineral [gr/cm^3]

De esta forma, es posible deducir un valor indicativo de la densidad aparente, y en consecuencia obtener los valores de humedad útil a partir de la información que normalmente acompaña a un mapa de suelos.

4.3.5. Materia orgánica: valores de referencia

Los valores de materia orgánica son difíciles de predecir ya que son sensibles a un gran número de interacciones, tales como tipo de labor cultural, cultivos, ambiente edáfico, etc. En general, este tipo de valores se obtiene a partir de toma de muestras en estudios específicos de cartografía de suelo o estudios edafológicos. Como valores indicadores generales pueden considerarse los expuestos por Porta et al. (1994; p.: 187), señalados en el Cuadro 4.13.

En la Provincia de Valencia, la fuente de referencia general son los valores de contenido de materia orgánica publicados por la Consellería d'Àgricultura, Pesca i

Tipo de suelo	Contenido de M.O. [%]
Suelos de pradera	5 – 8
Turberas (histosoles, según Soil Survey Staff; 1975)	Más del 40 %
Suelos de secano semiárido	1 – 2
Suelos de regadío	2 – 4
Suelos de zonas templadas húmedas	6-8

Cuadro 4.13: Contenidos materia orgánica en suelos.

Alimentació (1995), que se resumen en el Cuadro 4.14. En ésta puede observarse que en los suelos observados los valores oscilan entre 0.1 y 24 %, aunque en la mayoría de los casos no superan el 2.4 %. Como dato de referencia valen los valores medidos en limos de la Albufera, cuyos valores pueden alcanzar el 60 %.

Por otra parte, Gandullo y Sánchez (1994) exponen una serie de valores obtenidos en estaciones ecológicas dedicadas al estudio de los pinares españoles. En éstos se asocia el contenido de materia orgánica con las diferentes especies de pino analizadas aparentando haber diferencias entre las mismas (Cuadro 4.15).

Fuente	Q25	Q75	Clase modal	Max.	Min.
Suelos de la Provincia de Valencia	0.74	3.89	0.1-2.4	24	0.1
Limos de albufera				60	34

Cuadro 4.14: Valores de contenido de materia orgánica en suelos.

Variedad de pinar	Min.	Media	Max.	N
<i>Pinus canariensis</i>	0.8	3.93	18.7	61
<i>Pinus halepensis</i>	0.6	2.84	15.1	131
<i>Pinus nigra</i> var. <i>Pyrenaica</i>	0.8	4.29	15.5	54
<i>Pinus nigra</i> var. <i>Hispanica</i>	0.7	4.31	15.1	68
<i>Pinus pinaster</i> ssp. <i>Atlantica</i>	0.6	5.22	10.9	21
<i>Pinus pinaster</i> ssp. <i>mediterranea</i>	0.1	2.73	10.6	102
<i>Pinus pinea</i>	0.1	0.88	5.6	119
<i>Pinus radiata</i>	1.1	4.82	24.4	174
<i>Pinus sylvestris</i>	0.1	3.48	10.1	108

Cuadro 4.15: Contenido de materia orgánica en suelos forestales (pinares)

En este Cuadro, el límite inferior representa el valor mínimo encontrado en las n muestras provenientes de las parcelas de una especie determinada. De la misma manera, el límite superior es el máximo valor encontrado en las n muestras correspondientes a cada especie.

4.4. Disponibilidad de información a nivel global

Las fuentes de información respecto a la distribución espacial de elementos vinculados a las propiedades hidrológicas de una cuenca, están tradicionalmente relacionadas al ámbito de la cartografía.

La distribución espacial de los suelos, la vegetación, el relieve, etc., es expuesta en base a mapas, y complementado con esquemas y diagramas explicativos. Las entidades u organismos que permiten el acceso a esta información basan sus resultados en observaciones recogidas del terreno, las cuales fueron realizadas a distintas escalas y con particulares criterios de apreciación. Tales criterios son, afines a los objetivos específicos con los que fueron planteados cada uno de los trabajos. En otras palabras: es menester reconocer la diversidad de criterios y formas de expresar cartográficamente los resultados y mediciones obtenidas en una misma unidad de terreno.

Autores como Gallego y Bascones (1991) y Elena (1997) ya se han ocupado de este tema. Los mismos enumeraron en su momento diferentes tipos de cartografía generada en España y Europa, sus fuentes y escalas. Éstos indican que las escalas de representación varían, según los casos ente 1:5.000.000 y 1:50.000, siendo desarrolladas por diferentes organizaciones y bajo distintas modos de representación y escalas. Concretamente en España, existen organismos estatales como el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación (MAPA), Comunidades Autónomas, Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), Instituto Geográfico Nacional (IGN); etc. Los fines con que han sido desarrollados, o se están llevando a cabo, son tan diversos como, por ejemplo:

- a) Geología: involucrando a la litoestratigrafía, tectónica, hidrogeología, rocas industriales, metalogenia, mapas sismoestructurales.
- b) Suelos y tierras agrícolas: erosión, clases agrológicas, texturas de suelo, taxonomía edafológica.
- c) Cultivos y aprovechamientos agrícolas, explotaciones forestales, productividad potencial, vegetación natural, usos y aprovechamientos del suelo.
- d) Caracterizaciones agroclimáticas, Atlas climáticos.

En muchos de los casos mencionados, las disciplinas científicas que han hecho posible este aporte al conocimiento han expresado sus resultados en términos descriptivos, apoyando frecuentemente sus conclusiones en estructuras taxonómicas (Soil Survey Staff, 1975; FAO, 1978; Mc. Donald, et al., 1990; Elena, 1997; etc.).

4.4.0.1. Datos e información disponible

Existen conjuntos de datos e información estrechamente vinculada con procesos hidrológicos o de elementos del terreno relacionados a la respuesta hidrológica, de gran utilidad como información *a priori* en la calibración de modelos y la estimación de parámetros de modelación.

En general, los primeros grupos de datos fueron representados según mapas. Esos mapas estuvieron disponibles a diversas escalas, normalmente de baja resolución. A medida que las técnicas de procesamiento y almacenamiento de información evolucionaron, los conjuntos de datos pasaron a estar en formato digital. En términos cartográficos, la resolución más común es de píxeles de 1° por 1° de lado.

A continuación se enumeran algunos ejemplos de bases de datos, generalmente a escala global, disponibles, separándolos en dos de los campos más visitados en hidrología: suelos y cubierta del suelo.

1. Cubierta del suelo. Las características de la cubierta del suelo han sido analizadas globalmente, elaborándose diferente tipo de información.
 - Matthews Vegetation data set (1983). Se trata de un conjunto de mapas que señala la distribución global de los tipos de vegetación, uso de suelos y albedo superficial. Deriva de la compilación y análisis de hasta 100 diferentes mapas e imágenes satelitales, existentes en el Goddard Institute for Space Studies (GiISS; Columbia University in N. York). su resolución es de celdas de 1° por 1°.
 - World Vegetation Map: Este mapa global de vegetación deriva de imágenes NOAA ¹²/GVI ¹³, recolectadas a lo largo del período 1985 - 1987, e incluye 8 tipos generales de vegetación.
 - En Europa, el programa CORINE (Coordination of Information on the Environment) es la respuesta de la Unión Europea a las nuevas problemáticas de este sector del mundo, surgidas a fines del siglo XX. Sus objetivos fueron definidos en la mitad de los años 80, iniciándose en

¹²NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration; Estados Unidos

¹³Tanto en GVI (Global Vegetation Index) como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) son índices derivados de la información de radiación infrarroja reflejada por la vegetación, relacionada con el estado de la biomasa, porcentaje de cubierta vegetal y el LAI (Leaf Area Index)

los países de la Comunidad Europea. Dentro del programa, cada miembro produce una serie de bases de datos, sobre la base de una metodología unificada. Su almacenamiento y post procesamiento se lleva a cabo por medio de tecnología GIS. Los equipos del programa CORINE cooperan estrechamente con otras organizaciones internacionales como la OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), el Consejo Europeo, UN ECE (United Nations European Committee on Economics), y CERCO (Committee of the European Union Countries). Finalizados los primeros seis años del programa, el mismo fue renovado, expandiéndose a través de la European Environmental Agency (EEA). Algunos de los productos más destacados del programa son:

- CORINE land cover: relevamiento del uso del suelo, basados en el análisis de imágenes satelitales.
 - CORINAR: desarrollado para el análisis de las principales fuentes de emisión y migración de contaminantes aéreos.
 - CORINE biotopes: referida a la identificación, inventario y descripción de sitios cuya protección es espacialmente importante para la preservación del medio natural europeo.
- Natural Vegetation Map of the European Communities. Originalmente publicado en 1979 a escala 1:4.000.000. Una versión actualizada que señala la *vegetación pseudo climática* fue publicada en 1987 por el Consejo de Europa a Escala 1:3.000.000. Esta versión es más amplia y detallada que la anterior. En 1989 el mapa fue digitalizado y transferido al proyecto CORINE.
 - The European Remote Sensing Forest/Non-forest Digital Map. Fue originalmente preparado por la Agencia Espacial Europea (ESA), como contribución al World Forest Watch Project, en el año 1992. Está basado en la clasificación digital de imágenes NOAA/AVHRR ¹⁴ multiespectral de 1km. por 1km. de resolución. El conjunto total abarca unas 70 escenas tomadas en el período 1990-1992.
 - Bajo el auspicio de la International Geosphere-Biosphere Program (IGBP; 1992) se produjo un mapa global de las características de la cubierta del suelo utilizando datos de NDVI utilizando información satelital AVHRR recolectada entre abril de 1992 y marzo de 1993.
 - Producción propia de la NOAA. Se trata de diferentes productos provenientes del procesamiento de imágenes AVHRR/GVI, a diferentes escalas temporales (anual, mensual y semanal) y en diferentes períodos de tiempo (1982 - 1994; 1983 - 1990). Pueden señalarse así:
 - NOAA/GVI Weekly Vegetation Index, First Generation.

¹⁴AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer.

Información	Disponible en:
Matthews Vegetation data set	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv2.php
World Vegetation Map	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv27.php
Natural Vegetation Map of the European Communities	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv154.php
European Remote Sensing Forest / Non forest map	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv170.php
Producción de la NOAA	http://www.grid.unep.ch/data/grid/vegetation.php

- NOAA /GVI Vegetation Index, Monthly Maximum.
- NOAA/GVI Vegetation Index, Seasonal Maximum
- NOAA/GVI Vegetation Index, Annual Maximum.
- NOAA/GVI Weekly Vegetation Index, Second Generation.
- NOAA/GVI Weekly Calibrated Vegetation Index.
- NOAA/AVHRR DECADAL (10-DAY) COMPOSITES OF THE C.I.S. (Commonwealth of Independent States)
- NOAA/GVI Eight-Year (1983-1990) Mean Maximum.

2. Suelos:

El primer antecedente de un mapa de suelos en la comunidad Europea fue el resultado de más de 30 años de trabajo, iniciado en la década del 50. La primer versión data de 1965, siendo un mapa a escala 1:2.500.000. La segunda versión se elabora a partir del mapa de Suelos de FAO-Unesco, más detallado, generándose un mapa a escala 1:1.000.000 en los primeros años de la década del 70. El mapa, previamente actualizado, fue digitalizado en el año 1986 e incorporado al proyecto CORINE. El número total de clases de suelos es cercano a los 350.

A nivel global, existen desde los principios de 1960 iniciativas y trabajos concretos con el objetivo de obtener una base de datos global de suelos. Nachtergaele (2000) señala la evolución de los mismos y el tipo de información que se posee en diferentes sectores del planeta. Algunas de las mismas se mencionan a continuación:

- FAO-Unesco Soil Map of the World; 1992 Digital Version. Originalmente publicado a escala 1:5.000.000 desde 1974 a 1978. posteriormente digitalizado por ESRI Corporation en la década del 80. Incluye diferentes unidades cartográficas compuestas por unidades de suelos o asociaciones de suelos. En su leyenda se diferencian 106 tipos diferentes de unidades de suelos o asociaciones.

- The GLASOD Digital Database. El Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD) fue conducido por la International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) de Wageniongen, en Holanda. El mencionado centro fue comisionado por las Naciones Unidas. Se produjo un mapa escala 1:10.000.000 en 1990, el cual fue posteriormente transformado a formato digital. Contiene información referida a la degradación de suelos (tipo grado y origen), distribuida en unidades cartográficas a escala mundial.
- Soil Water Holding Capacity. Esta base de datos indica la distribución mundial de la capacidad de almacenamiento hídrico a capacidad de campo, para los primeros 30 cm de suelo. Fue desarrollado por la NASA.
- Información global de suelos ISRIC-WISE ¹⁵ (1996). Se trata de diferentes imágenes raster (0.5° por 0.5°) derivadas de la base de datos del World Inventory of Soil Emission Potentials (WISE) database. Incluye capacidad de almacenamiento de suelos, ph de suelos, densidad de carbono orgánico, etc.
- Para regiones específicas existen bases de datos más detalladas. La más destacada es la STATSGO (State Soil Geographic Database), generada y mantenida por el USDA (U.S. Department of Agriculture). La misma contiene información detallada de todos los tipos de suelos analizados en los Estados Unidos, tal como textura, densidad aparente, composición, espesor, etc, incluyéndose los perfiles edafológicos.

Información	Disponible en:
Mapa de suelos de la Comunidad Europea	http://www.grid.unep.ch/data/grid/soils.php
FAO-Unesco Soil Map of the World	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv6.php
The GLASOD Digital Database	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv18.php
Water Holding Capacity	http://www.grid.unep.ch/data/grid/gnv25.php
STATSGO	http://www.soils.usda.gov

A medida que las técnicas de teledetección han avanzado se han estabilizado en cuanto a su precisión y facilidad de adquisición, la comunidad científica y algunos organismos internacionales han puesto su atención sobre ellas como una herramienta útil para relacionar, a nivel global, información del terreno de diferentes orígenes.

Así, como ejemplo cabe destacar, al *International Satellite Land Surface Climatology Project (Initiative I)* que representa un gran esfuerzo cooperativo destinado

¹⁵ISRIC: International Soil Reference and Information Center. WISE: World Inventory of Soil Emission Potentials.

a desarrollar una base de datos global de suelos y cubierta de suelo para la modelación. Así se construyó una base de datos que incluye datos de hidrología, suelos, pendiente topográfica, tipo de vegetación, etc. disponibles sobre una grilla común de 1 *km.* por 1 *km.* Actualmente está en desarrollo una segunda fase del proyecto (Initiative II), la cual incluye información más reciente y de mayor resolución espacial. Otro tipo de bases de datos son las derivadas de experimentos especiales, en los cuales se incluyen mediciones intensivas de campo y de sensores remotos, así como una completa recopilación de información, en una determinada porción de terreno. Como ejemplo de éste se pueden citar algunos de los proyectos desarrollados por la NASA, disponibles a través de DAAC (Distributed Active Archive Center) del Oak Ridge National Laboratory; Tennessee, USA. La información y los documentos correspondientes están disponible en: <http://daac.gsfc.nasa.gov>.

- FIFE, acrónimo de First ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) Field Experiment. el mismo fue un experimento climatológico de gran escala, desarrollado en una región situada en el centro del estado de Kansas (Estados Unidos), desde 1987 a 1989. El proyecto fue elaborado para ampliar los conocimientos respecto del ciclo del carbono y del agua, coordinar la recolección de datos mediante sensores remotos e instrumentos en tierra, y para evaluar las posibilidades de utilizar sensores remotos para la medición de ciclos y variables ambientales del suelo.
- BOREAS. El mismo consistió en una campaña para el estudio del ecosistema y atmósfera boreal, desarrollado en un corto intervalo de tiempo (septiembre del 1993 - octubre de 1996) en una localidad canadiense dentro de un área de 1000 km², con el objetivo de analizar el comportamiento del bioma forestal boreal y sus enlaces con el ciclo global de energía y carbono.
- OTTER Estudio intensivo de una región del oeste de los Estados Unidos, compuesto por mediciones de campo y de sensores remotos en seis localidades diferentes a lo largo de una transecta de 300 *km.* Se desarrolló entre los años 1990 y 1991. La temática fue similar a la del proyecto FIFE, añadiéndosele cierto tipo de mediciones forestales.
- SUPERIOR NATIONAL FOREST . Estudio intensivo de una región del centro Norte de los Estados Unidos, dentro del ambiente de bosque boreal (Minnesota). Se realizaron más de 120 zonas de medición de 50 *km.* por 50 *km.*, entre 1983 y 1984. Se realizaron mediciones de campo y sensores remotos, relativos a LAI (Leaf Area Index), biomasa, propiedades ópticas de la vegetación, reflectancia del follaje, etc.

Existe otra iniciativa, denominado HAPEX-Sahel (Hydrological and Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel) fue un programa de observación internacional tanto del terreno como de la atmósfera. Se desarrolló en el Níger Occidental, en la región

del Sahel. El objetivo general del proyecto fue el de aumentar el conocimiento del rol del Sahel en el esquema general de circulación atmosférica, particularmente respecto a los cambios interanuales de la superficie del terreno. Se elaboró una intensiva campaña de toma de muestras de terreno, vuelos e información satelital, principalmente en la década del 90.

4.4.1. Disponibilidad y aprovechamiento de datos e información en España

La información geológica e hidrogeológica a nivel global se encuentra suficientemente bien expuesta, como producto de un proceso de mapeo y exploración geológica de larga duración, llevado a cabo por el Instituto Geominero de España. Así, a nivel global existe un Mapa Hidrogeológico a nivel nacional, un mapa de Unidades Hidrogeológicas que cubre todo el territorio, el Mapa Geológico de la totalidad de la Península Ibérica, incluyendo Baleares y Canarias, el Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos y un mapa del Cuaternario español. Además, existe información geológica a escalas 1: 200.000, 1:50.000 y 1:25.000.

La información topográfica a nivel nacional está a cargo del Instituto Geográfico Nacional, actualmente dependiente del Ministerio de Obras Públicas.

Existe una edición del Mapa de cultivos y aprovechamientos, a nivel Nacional del año 1962, perteneciente al Mapa Agronómico Nacional y otra más reciente del año 1988. Por otra parte, cabe recordar que el territorio español está incluido en el proyecto CORINE, de la Unión Europea.

Lo expresado por los autores antes mencionados se traduce, entre otros temas a la taxonomía edafológica utilizada en España. En España, se han aplicado diferentes sistemas de taxonomía edafológica, lo cual ha condicionado los productos cartográficos disponibles. Un caso a mencionar es el de Guerra (1968). Existen también información cartográfica en la cual el sistema de clasificación de suelos elegido fue el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), como es el caso de las síntesis edafológicas expuestas en el atlas de suelos presentado por el Instituto Geográfico Nacional. Otra clasificación ampliamente utilizada es la propuesta por FAO, como por ejemplo en el caso de los mapas de suelos desarrollados por la Consellería D'agricultura, Ganadería i Pesca de la Generalitat Valenciana (1995) en el ámbito del proyecto LUCDEME.

4.5. Referencias

Ahuja; L. R. y Nielsen; D. R. *Field Soil-Water Relations*. En: Stewart; B. A. y Nielsen; D. R. (Eds.) *Irrigation of Agricultural Crops*. Am. Soc of Agronomy. Agronomy Series; Publication N° 30; p.: 143-190. USA; 1990.

- Beven, K. J.** *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer.* Willey. UK: 2001.
- Consellería D'Àgricultura Pesca i Alimentació.** *Catálogo de Suelos de la Comunidad Valenciana.* Generalitat Valenciana. Valencia; 1995.
- Costa, J. E. y Baker; V. R.** *Surficial Geology.* John Willey and Sons. USA; 1981.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (Ed.)** *Hidrología Subterránea. Primera Edición.* Tomo II. p: 1454-1497. Ed. Omega. España; 1976.
- Davis, S. N.** *Porosity and Permeability of Natural Materials.* En **De Wiest, R. J. M. (Ed.)**. *Flow Through Porous Media*; p.: 53 – 89. Academic Press; USA, 1969.
- Davis, S. N. y de Wiest, R. J. M.** *Hydrogeology.* Krieger. USA; 1971.
- Elena, R.** *Clasificación Biogeoclimática de España y Península Balear.* Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Madrid, 1997.
- FAO.** *Guía para la descripción de perfiles de suelos.* Segunda Edición. UNESCO. Italia; 1978.
- FAO.** *Evaluación de Tierras para Agricultura en Regadío: Directivas.* UNESCO; Boletín de Suelos de la FAO N° 55; p.: 234235. Italia; 1990.
- FAO.** *Global and National Soils and Terrain Digital Databases (SOTER).* UNESCO, World soils Resources Report 74. Italia; 1995.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A.** *Groundwater.* Prentice-Hall, Inc. New Jersey; 1979.
- Gandullo, J. M. y Sánchez; O.** *Estaciones Ecológicas de los Pinares Españoles.* Ministerio de Agricultura y Pesca, ICONA. Madrid; 1994.
- Gallego, E. y Bascones, M.** *Bases Cartográficas para la evaluación de impactos ambientales.* En: **ITGME.** *Evaluación y corrección de Impactos Ambientales.* Instituto Geominero de España; pp. 81 - 93. Madrid, 1991.
- Guerra, A.** *Mapa de Suelos de España, Península y Baleares. Escala 1:1.000.000.* Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología. Madrid; 1968.
- Jiménez, J. A. (Coord.)**. *Geotecnia y cimientos.* Ed. Rueda. España; 1980.
- Heath, R. C.** *Basic Ground-Water Hydrology.* U.S. Geological Survey. Water-Supply Paper 2220. Virginia; 1983.
- Hillel, D.** *Fundamentals of Soil Physics.* Academic Press. USA; 1980.
- Hoek; E. y Bray, J.W.** *Rock Slope Engineering. Revised Third Edition.* The Institution of Mining and Metallurgy. UK. 1981.
- Mc Donald, R. C.; Isbell, R. F. Speight, J. G; Walker, J y Hopkins, M. S.** *Australian Soil and Land Survey. Field Handbook. Second Edition.* Inkata Press. Australia; 1990.
- Mitchell, J. K. y Jones, B. A.** *Micro-relief surface depression storage: changes during rainfall events and their application to rainfall-runoff models.* Water Resources Bulletin, vol 14 (4); p.: 777-802. 1978.
- Nachabe, M. H.** *Redefining the Definition of Field Capacity.* ASCE; Journal of

- Irrigation and Drainage Engineering, vol 124 (4); p.: 230-232. USA; 1998.
- Nachtergaeae, F. O.** *From Soil Map of the world to the Digital Global Soils Terrain Database: 1960-2002.* En: **Sumner, M. E. (Ed.).** *handbook of soil Science.* CRC Press. USA; 1984.
- Poiree, M. y Ollier, C.** *Saneamiento Agrícola. Segunda Edición.* Editores Técnicos Asociados. S. A. p.: 17. Barcelona; 1986.
- Polubarinova-Kochina, P. Y.** *Theory of Ground Water Movement.* Princeton University Press; p.: 6; 16. USA; 1962.
- Porta, J.; Lopez-Acevedo; M. y Roquero; C.** *Edafología. Para la Agricultura y el Medio Ambiente.* Ed. Mundi-Prensa, S.A. Madrid; 1994.
- Rawls, W. J. y Brakensiek; D. L. A.** *Procedure to predict Green and Ampt Infiltration Parameters.* En: *Advances in Infiltration;* p: 102–112. ASAE Publication 11 – 83. USA; 1983.
- Riou, G.** *El Agua y los Suelos en los Geosistemas Tropicales y Mediterráneos.* Ed. Masson, S.A. Barcelona; 1992.
- Romero, R.R. y Zúñica; L.** *Estadística. Diseño de Experimentos y Modelos de Regresión.* UPV. Valencia; 1993.
- Selley, R. C.** *Applied Sedimentology. Second Edition.* Academic press. USA; 2000.
- Soil Conservation Service.** *Irrigation.* USDA; SCS Engineering Handbook, Section 15. Washington D.C., 1964.
- Soil Survey Staff.** *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soils Surveys.* USDA, Agriculture Handbook N° 436. Washington D.C.; 1975.
- Tauber, F.** *Treating Grain-Size Data as Continuous Functions.* En: **Pawlowky-Glahn, V (Ed.):** *Proceedings of the IAMG'9.* Actas; p: 169 – 173. Barcelona; 1997a.
- Tauber, F.** *A Numerical and Practical Test of Ternary Diagrams for Grain-Size Data Classifications.* En: **Pawlowky-Glahn; V (Ed.):** *Proceedings of the IAMG'9.* Actas; p: 186 – 191. Barcelona; 1997b.

Capítulo 5

Método de estimación distribuida

5.1. Introducción

En el primer capítulo de esta tesis, se destacó la necesidad de elaborar un conjunto de criterios que permitan integrar la información con el fin de elaborar una primera aproximación sistemática a la definición de variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos en el paisaje. La base de tales criterios se expusieron en capítulos anteriores.

Ya se ha señalado que los conceptos de facies y elementos arquitectónicos permitieron elaborar el primer enfoque del terreno. Aumentando progresivamente el detalle en el análisis se elaboró una definición completa del suelo como elemento clave en la caracterización del paisaje. De esta forma, las etapas del análisis del medio (análisis fisiográfico, muestreo y análisis paramétrico) pudieron ser definidas concretamente para el entorno definido por el paisaje y los suelos que lo caracterizan. Se puede afirmar finalmente que la posición de los diferentes elementos del paisaje está en relación directa con la existencia de *gradientes ambientales* por medio de los cuales es posible deducir con claridad el desarrollo de los procesos de modificación del paisaje y génesis de suelos. En consecuencia, los gradientes naturales permiten explicar la realidad observada sobre la base de los elementos que intervienen en los procesos naturales mencionados.

Como se acaba de expresar, el conjunto de conceptos y elementos mencionados son los que permiten definir la distribución espacial de las propiedades hidrológicas analizadas.

Mediante los conceptos y ejemplos descritos en los capítulos anteriores, queda presentado de forma conceptual la base sobre la cual se sostiene el procedimiento que será propuesto en este capítulo. Se trata, en esencia, de ***analizar los gradientes más destacados en las variables principales a partir de su relación con los gradientes observados en las variables ambientales***. Como puede observarse, el método propuesto es, simplemente, la exposición ordenada del razonamiento que comúnmente lleva a cabo un técnico entrenado en el medio natural.

El mismo es, fundamentalmente, un medio para demostrar las hipótesis planteadas en esta tesis. Con estos se pretende destacar el *valor* que posee la información disponible a la luz de un análisis *sistemático* que tenga en cuenta lo que ya se *sabe* del medio y la *experiencia* propia del operador. Lo propuesto en esta tesis no es un método automático. El grado de sensibilidad a los gradientes ambientales depende de forma directa de la información con que se cuenta y de la experiencia del operador. Sin embargo, el contar con una herramienta de trabajo que contenga bases conceptuales suficientes y cuyo desarrollo práctico es reproducible, facilita claramente la solución del problema.

5.1.1. Un ejemplo

La mejor forma de explicar lo expresado es a partir de un ejemplo. La Figura 5.1 representa un caso reproducible en la realidad en el cual se describe el desarrollo de una catena de suelos a lo largo de una ladera.

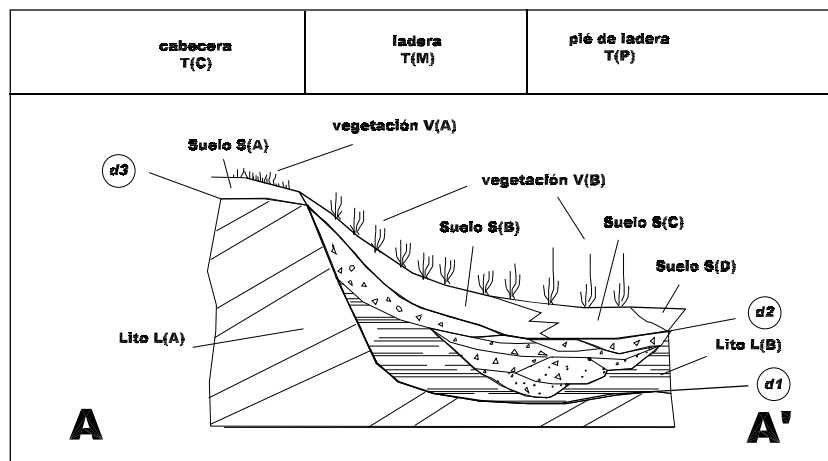


Figura 5.1: Perfil ejemplo

Si se tomasen muestras a distancias fijas a lo largo de la ladera, al modo de una transecta, se arribará a la conclusión por la cual el mayor gradiente en la variación de las propiedades analizadas de los suelos, se produce a lo largo de la *catena*. Es ésta la que representa el *gradiente ambiental* más destacado en el desarrollo de suelos en el paisaje. También se arribaría a la conclusión que para determinar tal gradiente no es necesario un número grande de muestras, sino, simplemente, *destacar los elementos claves del paisaje que ponen de manifiesto tal gradiente*. Utilizando la catena como elemento de referencia, se analizarán los componentes

del terreno presentes en el ejemplo (litología, relieve y vegetación) para detectar el sentido del gradiente que permita analizar la variación de la catena de suelos.

En este perfil (A-A') existen cuatro tipos de suelos (S(A), S(B), S(C) y S(D)), cada uno de ellos situados en diferentes posiciones del paisaje. Dichos suelos se desarrollan sobre diferentes tipos litológicos. Sobre estos últimos se desarrolla una cubierta vegetal, la cual varía lateralmente.

A partir de esta descripción general es posible avanzar en el detalle. Así, cada uno de estos tres elementos definen el sentido y dirección del gradiente ambiental que domina el desarrollo de los suelos analizados:

- a) En el caso de la *litología*, el criterio de arquitectura es el que más destacado. El mismo permite diferenciar por una parte la presencia de tres superficies que separan grandes cuerpos de materiales geológicos y suelos, estos son denominados *d1*, *d2* y *d3*. De ellos, la primera es la principal, ya que es la que interrumpe el desarrollo de las otras dos. Esta superficie permite diferenciar dos elementos principales en la composición litológica del perfil, a ambos lados de la misma. La variedad de cuerpos o “sectores” observados en uno y otro grupo son fáciles de explicar teniendo en cuenta que se trata de diferentes *facies* que componen una *secuencia*, tanto en el sentido vertical como lateralmente. Así, se destaca que las diferencias entre facies son menores que las diferencias puestas de manifiesto por la superficie de discordancia que separa ambos grupos de materiales clásticos.
- b) Por otra parte, la *pendiente topográfica* en la ladera, responde a las diferencias dadas por la arquitectura litológica. Los procesos de formación del paisaje han destacado las diferencias entre los tipos litológicos. Si se la analiza en función de su curvatura, quedan en evidencia dos formas características: la cabecera y la ladera media y baja.
- c) Finalmente, la *cubierta vegetal* varía de diferente forma según la posición del paisaje que ocupe como respuesta a la diferencia en el régimen hídrico que se desarrolla en la ladera. Se destaca así la diferencia entre la cubierta vegetal presente en la cabecera de la ladera respecto del resto, aún teniendo en cuenta la variación de la cubierta tipo “B” en los tramos medios e inferiores de la pendiente.

Así, se concluye que, son las grandes diferencias las que marcan los gradientes ambientales. De esta forma, podemos destacar las diferencias entre el suelo “S(A)” de los demás, a partir de los elementos que poseen en común cada tipo de suelo respecto al terreno sobre el que se desarrollan (en este caso: litología, pendiente y cubierta vegetal). Así, el contraste de la información que se posee de los suelos se hará a partir del gradiente observado, comparando los valores de las cualidades o características seleccionadas en dos casos concretos:

- i) Cabecera de ladera, con litología tipo “L(A)” y cubierta vegetal tipo “V(A)”.
- ii) Ladera media y pie de ladera, con vegetación tipo “V(B)” y litología tipo “L(B)”.

De la Figura 5.1 y de la descripción posterior se deduce que existen dos situaciones claramente contrastadas: cabecera y pie de ladera, intercaladas por una intermedia, que ocupa la ladera, donde los suelos y la cubierta vegetal señalan un cambio transicional desde la parte más alta de la ladera hacia la parte más baja de la misma. Se puede comprobar, también que el gradiente ambiental en el ejemplo queda definido por las situaciones de mayor contraste. Su sentido es desde A hacia A', ya que esa es la dirección de los *flujos naturales* de agua, lixiviación de nutrientes y minerales, y de los procesos de erosión, transporte y depositación de sedimentos que provocan la paulatina modificación de la ladera y de los suelos.

Las coincidencias en los límites, si bien están exagerados en el ejemplo, existen en la realidad. A lo largo de este capítulo se ha expuesto que las características y cualidades del terreno son las que ponen en evidencia la existencia y sentido de los gradientes ambientales que operan en el mismo y son los responsables de la presencia y distribución de los suelos, vegetación etc. Tal gradiente es el que provoca, en primera instancia, el desarrollo en un determinado sentido del paisaje. Esto es: *una determinada arquitectura geológica permitirá la definición de una determinada morfología del terreno, la cual permitirá el desarrollo de una determinada secuencia de suelos. Estos suelos generarán un ambiente más o menos favorable para el desarrollo de una determinada cubierta vegetal. A su vez esta última contribuirá al desarrollo de los suelos.*

Dejando aparte al discusión relacionada a la precisión cartográfica de los límites de las unidades fisiográficas, es de esperar que la información de diferentes fuentes, cuando es la correcta, será coherente entre sí, siendo los errores de solapamiento mínimos en cuanto al área que afectan en el terreno analizado, con relación al total.

El mismo ejemplo se pueda analizar ahora en dos dimensiones, es decir desde la óptica cartográfica. Una visión esquemática de la cartografía que describa al caso de la Figura 5.1 será la expuesta en la Figura 5.2.

En primer lugar, en la figura se puede apreciar la representación cartográfica de los elementos analizados en el perfil de la Figura 5.1, a escala local. En la parte izquierda de la misma se observa la cartografía temática correspondiente a la litología, relieve y vegetación, elementos de importancia fundamental para la delimitación de unidades cartográficas de suelos. En la parte derecha de la figura se observa la distribución areal de las unidades cartográficas de suelos. Puede observarse que, a pesar que los límites entre las unidades cartográficas de litología relieve y vegetación no coinciden exactamente entre sí, por medio del análisis y la síntesis de la información es posible expresar de forma confiable la distribución espacial de los

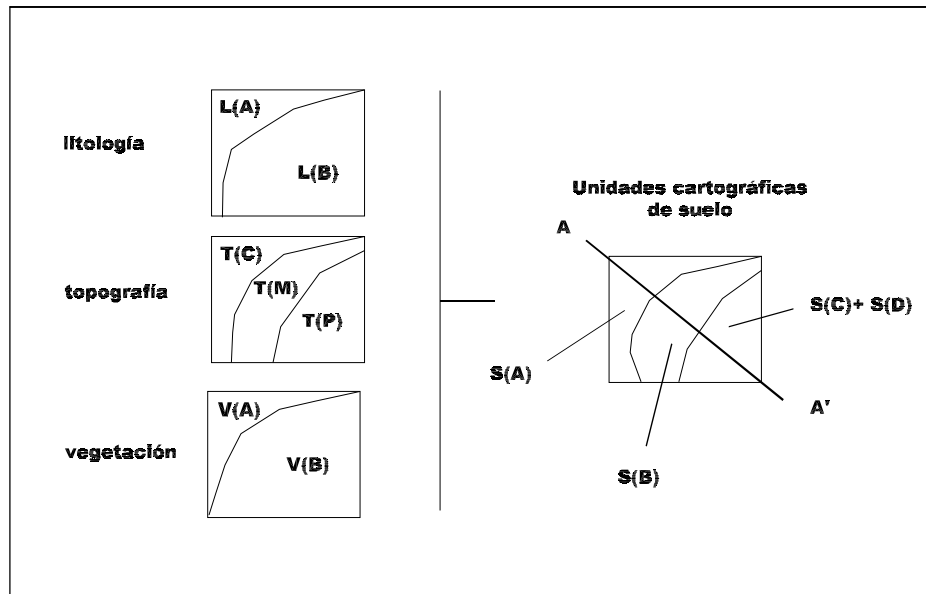


Figura 5.2: Ejemplo bidimensional

suelos. Basa analizar el perfil de la Figura 5.1 para comprobar lo dicho. Por otra parte, debe recordarse que, a excepción de los mapas de gran detalle, los mapas temáticos que señalan información fisiográfica son mapas de síntesis, ya que no es posible expresar la variabilidad completa del terreno por medio de unidades cartográficas. En consecuencia es admisible la divergencia entre límites, dentro de un rango de variación razonable. Así, el mapa de suelos señalado en la Figura 5.2 es la etapa fundamental que servirá de base para un estudio de campo más profundo y también, por ejemplo, para un estudio del comportamiento hidrológico del terreno.

5.1.2. Tendencia y valores modales

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, las unidades cartográficas de un mapa señalan de forma *sintética* la distribución espacial de un determinado elemento o cualidad del terreno (por ejemplo: el suelo), el cual puede ser relacionado (mediante valores de referencia, funciones de pedotransferencia, etc.) con un valor numérico concreto. En esta tesis, el concepto de valor modal descrito para los suelos se extiende a todos los casos posibles en la información fisiográfica. En consecuencia, el elemento o cualidad del terreno que representa a la unidad cartográfica puede ser relacionado de forma directa (medición) o indirecta (valores de referencia, funciones de pedotransferencia, etc.) con un valor numérico concreto:

el valor modal. Si la unidad contiene en su interior más de un elemento o unidad taxonómica, entonces el valor modal procederá del *promedio ponderado* de los valores de cada uno de los elementos presentes. El factor de ponderación será el porcentaje del área que ocupa cada componente dentro de la unidad.

Los valores modales distribuidos según el patrón de las unidades cartográficas señalan las variaciones espaciales más destacadas en el terreno. Sobre este punto existe una interesante discusión expuesta por Burrough et al. (1994). En la misma se pone de manifiesto el rol de la diferencia *entre* las variaciones de unidades cartográficas y las variaciones *internas* de cada unidad cartográfica. Dado que en esta Tesis ya se ha manifestado que es el suelo el elemento clave para la tarea de parametrización en la modelación distribuida, la información edafológica será la clave del trabajo. Este tipo particular de información se construye a partir de determinar unidades cartográficas cuya variabilidad interna es menor o mucho menor que la variabilidad entre unidades cartográficas.

La variación espacial del medio natural no es aleatoria, y los suelos no son la excepción. Es necesario analizar la realidad observable a fin de lograr *aprender* de la naturaleza, deducir el comportamiento del terreno y *reproducir* estos conocimientos en otros casos. Webster (2000) señala que el medio natural es en esencia determinístico, y su “aleatoriedad” está dada por la escala del análisis y lo incompleto del conocimiento. Así, en primera instancia se puede considerar que la variación espacial de una característica o cualidad del suelo varía en el terreno de acuerdo a una tendencia que está determinada a partir de la presencia y orientación de los gradientes naturales, dados por los demás componentes del terreno. La Figura 5.3 ilustra lo expresado. La transecta $A - A'$ afecta a dos unidades cartográficas de suelo, cuyos valores modales son 10 y 1 cm/h respectivamente. La línea discontinua vertical marca el límite entre ambas unidades cartográficas. A partir de estos valores es posible elaborar una tendencia, representada en la figura por la línea curva, que describa la variabilidad de K_s en el terreno a lo largo de la transecta.

Para construir analíticamente una tendencia como la observada en la Figura 5.3 es necesario explicar la existencia de una diferencia entre los valores modales de las unidades cartográficas. Dicha explicación se expresa como función de la presencia y valor de ciertas variables que representan a las condiciones del medio donde se desarrollan los suelos.

Si se utilizan las unidades cartográficas antes señaladas en la Figura 5.2 es posible lograr implementar tal tendencia. En el caso del ejemplo analizado, el muestreo y comparación de los valores obtenidos en una y otra unidad permitirá maximizar el contraste de los valores medios de las propiedades analizadas, aportando así el valor numérico del gradiente ambiental presente. Si este procedimiento se repite en toda el área de análisis de un proyecto, teniendo en cuenta diferentes catenas de suelos, se obtendrán los criterios necesarios para estimar la distribución de las

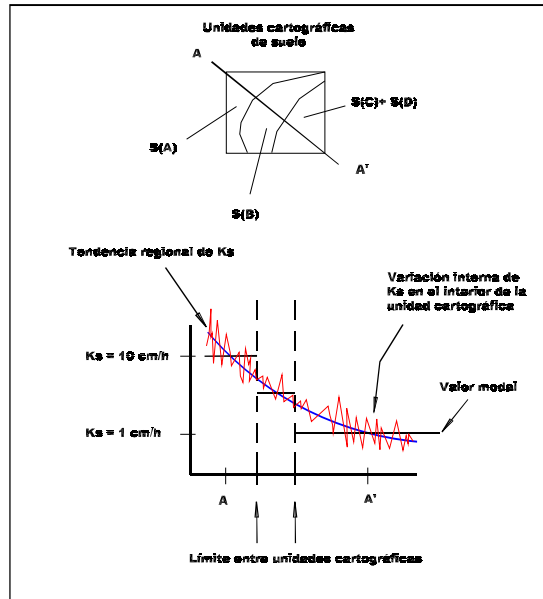


Figura 5.3: Variabilidad espacial

cualidades o características necesarias para la modelación hidrológica. En todos los casos, las unidades de muestreo corresponden con intersecciones entre unidades cartográficas definidas a partir de determinar en información ambiental los gradientes más destacados en cada tema.

5.2. Modelo de variabilidad

El procedimiento práctico se basa en el procesamiento previo, y por separado, de la información ambiental y de las variables principales, para posteriormente ser relacionadas mediante una expresión funcional, que se expone a continuación.

El terreno de estudio es dividido según una malla de elementos individuales y de geometría regular. El modelo de variabilidad de las variables principales explica su tendencia regional y, al mismo tiempo, se utiliza para la estimación a escala de celda. En consecuencia, los resultados de análisis permiten, entonces, obtener valores individuales *para cada una de las celdas* analizadas. El modelo propuesto se basa en el establecimiento de una relación funcional de dependencia entre las variables principales y ambientales. La relación más simple es la lineal:

$$y_c = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{cj} \quad (5.1)$$

donde:

β_0 : valor de y cuando $x_{cj} = 0$

y_c : valor de la variable principal y en la celda c .

β_j : coeficientes del ajuste lineal para cada variable ambiental j , con $j = 1, 2, \dots, k$, siendo k : número total de variables ambientales incluidas en el análisis.

x_{cj} : valor de la variable independiente ambiental j en la celda c .

Se denominan aquí **variables principales** a las variables cuya distribución espacial celda a celda se pretende estimar mediante la aplicación de este análisis. En el caso particular de esta tesis, dichas variables serán:

- a) la capacidad de almacenamiento hídrico útil del suelo, denominada Hu ;
- b) la conductividad hidráulica saturada del suelo, denominada Ks , y
- c) la conductividad hidráulica saturada del substrato del suelo, es decir el material sobre el cual se apoya o se genera el suelo, denominada Ks .

Las variables principales surgen de la interpretación de la información de suelos presente y disponible. A continuación, en secciones posteriores se detalla el procedimiento. Una vez obtenidas, las mismas son transformadas de forma tal que su distribución de frecuencias sea aproximadamente simétrica alrededor de su valor medio.

De la misma forma, se denominan aquí **variables ambientales** a las variables que representan diferentes cualidades o características del terreno, relacionadas con la naturaleza y génesis de los suelos que se encuentran presentes en el sector analizado. A partir de su distribución se deduce la relación funcional 5.1, para cada variable principal, de forma independiente.

Mediante el procedimiento propuesto es posible maximizar el aprovechamiento de la información que se dispone normalmente al inicio de un estudio hidrológico. De esta forma se logra simultáneamente alcanzar dos objetivos. En primer lugar es posible elaborar una estimación de la distribución espacial de la variable y . En segundo lugar se logra definir una explicación razonable de las relaciones mutuas entre las variables independientes ambientales.

La característica fundamental que destaca del método propuesto en esta tesis consiste en que la información aprovechable, para la definición de variables ambientales, puede ser tanto categórica como continua, pudiendo incorporar información de tipo cualitativo.

Las variables ambientales continuas son transformadas linealmente a fin de que quedasen expresadas en una escala continua entre 0 y 1 (Ecuación 5.2).

$$x_n = \left(\frac{x - Min}{Max - Min} \right) \quad (5.2)$$

donde:

x_n : variable normalizada.

x : valor de la variable continua a normalizar en cada celda.

Max , Min : valores máximos y mínimos absolutos de la variable continua a normalizar.

Previa a la normalización, la variable x es transformada, de forma tal que su distribución de frecuencias sea al menos aproximadamente simétrica a su valor medio.

Para la incorporación de variables cualitativas en el ajuste lineal se propone utilizar variables mudas (en inglés: “dummy variables”; Montgomery y Runger, 1996). Así, para introducir el efecto de una variable cualitativa representada por dos categorías, A y B, respectivamente, se puede utilizar una variable muda, donde dicha variable tomará dos valores exclusivamente, 0 y 1, según corresponda a o no a la categoría o rango seleccionado.

De lo anterior cabe aclarar que, en principio, de una variable discreta dividida en n categorías o intervalos es posible obtener $n - 1$ variables mudas (Montgomery y Runger, 1996). Sin embargo, en la realidad, este número resulta excesivo y difícil de manipular. A mayor número de variables mudas derivadas de una variable ambiental cualitativa, mayor complejidad en el análisis, sin que este aumento en la complejidad garantice una mayor y mejor calidad en los resultados. En consecuencia, en el análisis propuesto, de cada variable ambiental recomienda obtener sólo una variable muda.

Adicionalmente, dentro del conjunto de las variables ambientales pueden incluirse las *interacciones* entre dos variables mudas. Así se define una *nueva* variable muda como el *producto* de otras dos. La interacción de variables mudas se incluye en el análisis para destacar la presencia de una combinación variables ambientales mudas en particular.

En consecuencia, para establecer el modelo de variabilidad es necesario seleccionar las variable ambientales a partir de las capas temáticas disponibles o elaboradas, estimar los coeficientes de ajuste del modelo y aplicar al mismo a la totalidad de las celdas definidas en el terreno. Es necesario aclarar que, e la naturaleza, las relaciones entre una variable principal y las diferentes variables ambientales seleccionadas son frecuentemente no lineales. La linealidad expresada en el modelo expuesto en esta tesis se desarrolla a partir de la transformación previa de las variables principales y las variables ambientales continuas.

Por último, debe también quedar claro que *todas* las variables incluidas en el análisis, tanto principales como ambientales, están expresadas *cartográficamente*. Es decir que a partir de la información disponible se ha definido un mapa que cubra totalmente el área de estudio *para cada una de las variables analizadas*. De esta manera, para las variables principales se contará con una capa temática para cada una de ellas donde a cada unidad cartográfica de suelo le fue asignado un valor

modal de la variable analizada. En el caso de las variables ambientales, existirán dos tipos, en función del tipo de variable que represente. Así, las variables ambientales continuas serán representadas por capas temáticas en las cuales se expongan un campo de variación continua en toda la superficie analizada. En cambio, en el caso de las variables ambientales discretas el terreno está dividido en dos únicas unidades cartográficas. Finalmente, las interacciones de variables ambientales discretas generarán dos o más unidades cartográficas, dependiendo de la distribución de las variables de las que derivan. El procedimiento de selección y construcción de las mismas se detalla más adelante, en este capítulo.

5.3. Estimación del modelo de variación espacial

El proceso de estimación comienza con el desarrollo de una estrategia con la cual obtener, para cada valor de la variable principal, un conjunto de valores correspondientes a cada una de las variables ambientales seleccionadas. Debido a que, en la presente metodología, todas las variables tienen expresión cartográfica, tal procedimiento se desarrolla a partir de la intersección entre *todas* las unidades cartográficas de variables ambientales cualitativas (discretas) del total de variables consideradas. El procedimiento se describe gráficamente en la Figura 5.4.

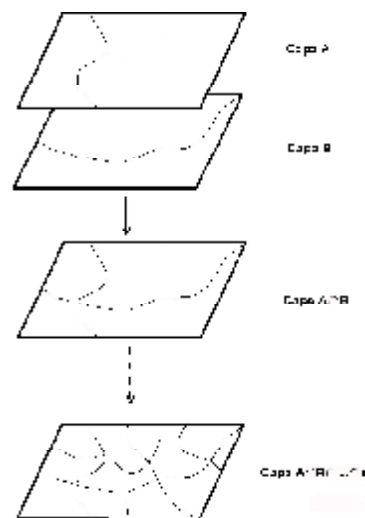


Figura 5.4: Obtención de la intersección entre capas diferentes

Tales fracciones del terreno representan la combinación de la información disponible. De esta combinación se espera, si la información fue correctamente procesada, que se destaquen los mayores gradientes ambientales presentes en la zona de estu-

dio. Particularmente en este estudio, estas unidades cartográficas son denominadas *Unidades Cartográficas de Muestreo* (UCMs).

Una vez definidas las UCM's, a cada una de las mismas le es asignado un valor numérico correspondiente al valor modal de cada variable principal analizada (Figura 5.5). De esta forma, las diversas *porciones* en que fue dividido el terreno (sobre la base de la información disponible y el criterio de análisis del operador) poseerán tres valores modales, correspondientes a las tres variables principales analizadas: Hu ; Ks y Kp . Tal asignación se obtiene a partir de la superposición de la capa temática que contiene al total de las UCMs y las capas temáticas correspondientes a las unidades cartográficas de suelos.

El último paso descrito anteriormente merece ciertas aclaraciones. Resulta claro que la superposición de las unidades de muestreo y las unidades cartográficas de suelos no es perfecta, al menos en la gran mayoría de los casos. Esto se debe a que se trata del análisis conjunto de información procedente de diferentes fuentes y escalas la coincidencia perfecta de criterios resulta sumamente difícil de producirse en la realidad.

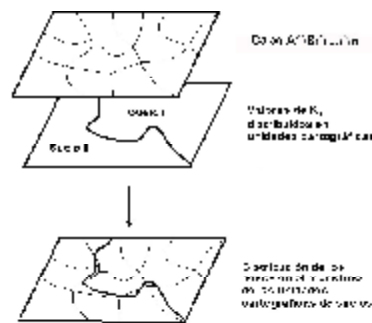


Figura 5.5: Proceso de obtención de los valores muestrales para el análisis

La Figura 5.5 señala el caso más frecuente que se observa en la práctica. En la parte superior de la misma se muestran, a la izquierda la capa temática con el diagrama de UCMs y en la parte derecha la capa de unidades cartográficas de suelos. El resultado de la superposición de ambas expone en la parte inferior de la figura. De tratarse de información proveniente de fuentes confiables y elaborada con criterios aceptables, el grado de coincidencia debe ser evidente. Sin embargo, existen zonas donde se producen la falta de coincidencia, correspondientes a los límites entre una unidad cartográfica y otra. Este tipo de problemas se debe frecuentemente a errores en la digitalización, realizada a una escala demasiado gruesa, errores en la corrección geométrica de la información, la transformación de formato vectorial a raster, etc. En consecuencia, a cada UCM se le asignará un valor modal que será el promedio ponderado de los valores modales de todas las unidades cartográficas de

la variable principal que se intersecten con ella. El factor de ponderación será el área con que cada una de las unidades cartográficas de suelos afectan a la UCM. Este procedimiento se repite para cada UCM, en el análisis de cada una de las variables principales y de las variables ambientales continuas.

5.3.1. Estimación de los coeficientes del ajuste

La obtención de los coeficientes del ajuste lineal propuesto se llevó a cabo desarrollando un esquema multivariado por el método de los mínimos cuadrados ponderados. Los valores utilizados para el ajuste, como se explicó anteriormente, fueron extraídos de cada UCM. La función objetivo a minimizar fue:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}) \quad (5.3)$$

donde:

y_i : valor modal de la variable principal asignada i -ésima UCM, con $i = 1, 2, \dots, n$
 n : número total de UCMs.

ω_i : peso que afecta a cada estimación de la variable principal en cada UCM.

x_{ij} : valor de la variable ambiental j , de la i -ésima UCM

β_0 : valor de la estimación cuando todas las variables ambientales son nulas.

β_j : factor de multiplicación de la j -ésima variable ambiental.

Aplicando este ajuste, por separado para el análisis de las variables principales, se obtienen tres relaciones funcionales diferentes. En cada una de ellas se vincula a una variable principal con diferentes variables ambientales. La selección de las misma se lleva a cabo en función de la capacidad de éstas de agregar explicación a la variabilidad de la variable principal analizada. Cada vez que una variable ambiental es seleccionada, se comprueba que la misma produzca tal aumento. De lo contrario es descartada. El proceso de selección se desarrolla por etapas, evaluando y descartando (o aceptando) cada una de las variables ambientales consideradas en el análisis. La medición del mencionado grado de explicación se detalla a continuación.

5.3.2. Evaluación de la calidad de los ajustes

En primera instancia, la precisión global de la estimación puede ser cuantificada a partir del *coeficiente de determinación* (R^2). A partir de lo expresado por Montgomery y Runger (1996), el coeficiente de determinación es una medida de la magnitud de la reducción de la variabilidad de la variable principal estimada a partir del empleo de las variables ambientales para el ajuste. Este coeficiente indica el grado de variabilidad observada que el modelo ajustado puede explicar.

El mismo se define como el cociente entre la suma de cuadrados de la regresión (SS_R) y la suma total de cuadrados corregida (S_{yy}).

$$R^2 = \frac{SS_R}{S_{yy}} \quad (5.4)$$

donde:

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5.5)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5.6)$$

El valor de R^2 varía entre 0 y 1, o lo que es lo mismo entre el 0 y el 100 %.

Otro estadístico global de utilidad en estos caso es el Error Cuadrático Medio (ECM) definido como el promedio de las diferencias entre los valores estimados y observados elevadas al cuadrado. Es decir:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (5.7)$$

donde:

\hat{y}_i : es el valor estimado de la variable en cada UCM.

y_i : es el valor observado de la variable principal en cada UCM.

A pesar de lo dicho, el valor de R^2 , si bien aporta información fundamental, no es garantía completa para la correcta evaluación del ajuste. Tal como lo expresan Montgomery y Runger (1996; p.:508-510 y 571), un valor grande de R^2 no necesariamente implica que el ajuste sea bueno. La adición de una variable al ajuste aumentará siempre en algo el valor de R^2 , sin importar si la variable es o no estadísticamente significativa. Así, siempre se podrá explicar algo más de la variabilidad observada a medida que se agregan variables al ajuste. Planteado el problema, será necesario comprobar dos cosas. En primer lugar se deberá analizar la evolución del valor de R^2 a medida que las variables seleccionadas en cada caso fueron incorporadas en el ajuste a fin de analizar el efecto de las mismas sobre la precisión de la estimación. En segundo lugar será necesario también comprobar que, más allá del valor concreto de R^2 , la distribución de los residuales señala algún problema en el ajuste. Los residuales se definen como la diferencia entre el valor observado y el estimado de la variable analizada. Es decir:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.8)$$

Así, dado el riesgo existente de que, por compensación entre los errores se genere un valor de R^2 elevado sin que se haya logrado un ajuste correcto a los datos observados, el análisis de residuales resulta fundamental en la evaluación del ajuste.

5.3.3. Aplicación de las relaciones funcionales

Una vez logrado el ajuste y definida la relación funcional *para cada variable principal* se procede a la aplicación de éstas para cada píxel en la que se divide el área analizada. En este sentido existen dos alternativas claras. La primera es la de aplicar directamente la relación funcional obtenida a través del ajuste desarrollado entre las variables principales y las variables ambientales. Así se obtendrá una nueva capa temática para cada variable principal analizada. A cada uno de sus píxeles se le asignará un valor y_c , a partir de la aplicación de la Ec. (5.1), donde los coeficientes de ajuste se obtuvieron a partir de la Ec. (5.3).

La segunda opción es la de aplicar a las capas obtenidas en según lo postulado en la primer alternativa, una corrección con el fin de conservar los valores modales de las variables principales, en cada una de las áreas ocupadas por las unidades cartográficas de suelos. De esta forma las capas obtenidas mediante el proceso de estimación son divididas según el patrón de las unidades cartográficas de suelos. El procedimiento en cuestión apunta a lograr que los valores modales obtenidos a partir de los valores de cada un de los píxeles contenidos en cada una de ellas de cada uno de estos polígonos sean los mismos que los valores modales originales. Así, se aplica la siguiente relación:

$$y_c^* = y_c + [E(y_c) - y^u] \quad (5.9)$$

donde:

y_c^* : valor de la variable principal estimada en cada píxel.

y_c : valor de la variable principal estimado mediante el ajuste de la tendencia regional, para cada píxel c .

$E(y_c)$: valor medio de la variable principal para cada unidad cartográfica de suelo, calculado a partir de los valores de todos los píxeles incluidos dentro de dicha unidad cartográfica.

y^u : valor modal original de la variable principal, asignado a cada unidad cartográfica.

Al igual que en la primera opción señalada, la aplicación de la Ec. 5.9 se generan tres nuevas capas temáticas, cada una de ellas correspondientes a la *estimación distribuida* de una variable principal, en el área de análisis. En este caso su coherencia con la distribución de los valores modales de suelos está asegurada. Tales capas temáticas son la utilizadas para la modelación hidrológica distribuida.

5.3.4. Evaluación de la distribución espacial elaborada

Los estudios respecto a la bondad del ajuste se concentran en el análisis *agregado* de los resultados.

En este trabajo de tesis resulta imprescindible conocer si el método propuesto reproduce adecuadamente el *patrón espacial* de distribución de la información original. De esta manera, se agrega a los análisis anteriores dos nuevos medios de comprobación:

- a) La elaboración de *variogramas experimentales*, tanto a la distribución original de las variables principales como a las estimaciones realizadas con el método que se propone en esta tesis.
- b) La elaboración de *histogramas* de frecuencias. Con estos se pretende comprobar que la distribución de las frecuencias de los valores de las variables principales sea más suave que la observada en el caso de sus valores modales.

La comparación de ambos casos permitirá conocer con mayor certeza el grado en el cual las estimaciones reproducen la realidad presente en la información.

5.4. Selección de las variables principales y ambientales

Como ya se adelantó, el modelo se basa en tener en cuenta un número finito de variables ambientales para obtener una explicación coherente de la distribución espacial y de la variabilidad de la conductividad hidráulica saturada. Dichas variables han sido citadas en gran cantidad de casos en la bibliografía científica. En términos generales se trata de variables que representen:

- a) *La estructura del terreno*: representada por la distribución espacial de la litología, la presencia y características de la fracturación, y la definición de grandes dominios litológicos o litoestratigráficos.
- b) *La morfología del terreno*: en lo relacionado a la dinámica hídrica del mismo, fundamentalmente: forma y jerarquía de la red de drenaje, curvatura del paisaje y pendiente topográfica.
- c) *Cubierta del suelo*: el análisis se concentró sobre la búsqueda de diferencias significativas entre diferentes tipos de cubiertas de suelo y/o usos de suelo.

De acuerdo a lo anterior, se tuvieron en cuenta grandes unidades fisiográficas, ciertas características de la geometría del paisaje (gradiente topográfico, orientación de las pendientes, curvatura y número de celdas acumuladas aguas arriba de cada

punto del terreno) y la geología siguiendo lo propuesto por ejemplo por McKenzie y Austin, 1993 y Bolstad; et al., 1998, etc. Dado que la vegetación es una variable que influye en diferentes cualidades edáficas, se incluyó al uso del suelo como fuente de información general respecto al tipo de vegetación y grado de complejidad vertical y cobertura de la misma. Más adelante, se brindan mayores precisiones al respecto.

5.4.1. Generación de capas temáticas

En primer lugar, es necesario volcar al formato digital los diferentes mapas en formato papel. Durante la etapa de digitalización se obtienen las diferentes capas digitales de información provenientes de dichos mapas. Cada una de estas capas es relacionada a uno o más campos de una base de datos en la cual se sintetiza la totalidad o parte de la leyenda del mapa.

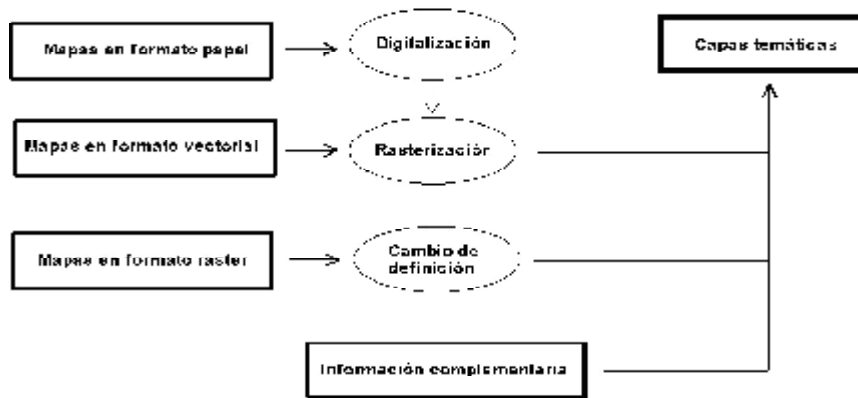


Figura 5.6: Proceso de digitalización y generación de capas temáticas

El formato de las capas que se obtienen por medio del procedimiento de digitalización es frecuentemente el vectorial. El mismo permite modificar, seleccionar o subdividir la información en diferentes temas utilizando herramientas CAD. Con posterioridad, estas capas son transformadas al formato raster. Las dimensiones del pixel en este último formato variarán en función de la escala del análisis, el tipo de información y de los objetivos del trabajo. Normalmente las mismas oscilan entre 100 por 100 *m* para estudios de detalle y 500 por 500 *m* para estudios de grandes cuencas o regiones. Así, no son consideradas todas aquellas unidades cartográficas o rasgos del terreno cuya superficie fuese inferior al tamaño del pixel seleccionado. Las capas de información que originalmente ya estaban en formato digital vectorial también son rasterizadas. La información cartográfica digital es *transformada geoméricamente* a fin de que la proyección de todas y cada una

de las capas de la información estuviese conforme a la especificada en el trabajo (Figura 5.6).

Una vez completada la información de entrada, en cada una de las capas de información queda contenido un único tema. Las variables ambientales son representadas mediante escalas cualitativas (mediante variables mudas), o cuantitativas (valores en escala continua), según el tema tratado. Existen casos en los cuales la misma variable puede ser representada en ambas escalas.

La distribución espacial de las variables ambientales se expresa mediante una capa temática para cada una de ellas. En cada una de éstas, los valores modales puntuales son asignados a la *unidad cartográfica* que contiene a dicho punto. Tal asignación se realiza mediante una herramienta SIG. En el caso de las variables ambientales, cada uno de estos temas es analizado individualmente. Tal análisis tiene por finalidad sintetizar la información en función de su influencia sobre la estimación de los parámetros tratados. Este grado de influencia es establecido sobre la base del conocimiento previo. Tal conocimiento se refiere a la forma en que dicho tema afecta a la variabilidad espacial de cada uno de los parámetros estudiados. El objetivo de este análisis es el de generar capas que sintetizen de forma operativa la tendencia general en la distribución espacial de cada tema analizado. Como norma, el número máximo de unidades cartográficas considerado para cada variable ambiental cualitativa no deberá superar en mucho a la decena. Para esta tarea de síntesis se utiliza la información complementaria no cartográfica (descripciones, informes, etc.), además de la información cartográfica contenida en la capa (Figura 5.7).

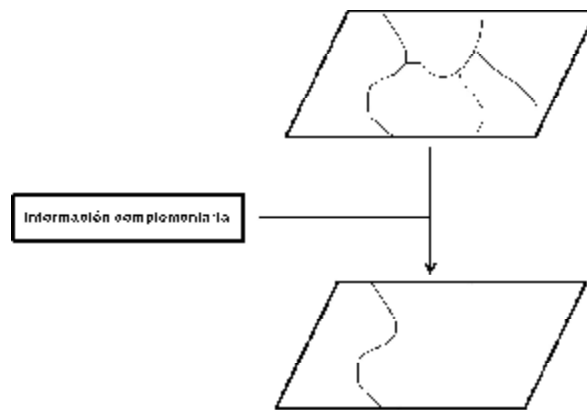


Figura 5.7: Síntesis de capas temáticas

Como ya se adelantó, las variables mudas se generan al aplicar sobre la información cartográfica un criterio de clasificación excluyente, dividiéndolas en dos únicas

categorías. Cada una de éstas fue elaborada de forma tal que represente los contrastes más claros y relevantes entre los valores de conductividad hidráulica saturada, dentro del área estudiada. De esta forma, los elementos que no pertenecen a una clase fueron incluidas, por defecto, en la restante.

Las diferentes categorías fueron determinadas *a priori* basándose en la información auxiliar, y su validación se realiza comprobando las diferencias en los valores medios de las variables principales en cada una de ellas. De no considerarse suficiente las diferencias entre valores, el proceso se vuelve a repetir hasta lograr el objetivo.

5.4.2. Asignación de los valores modales de las variables principales

Una vez lograda la generación las capas temáticas, se procede a la asignación de los valores modales a las mismas.

Esencialmente, aquellas las capas temáticas podrán expresar la variabilidad espacial de la variable que representan de dos formas claramente diferentes. Existirán variables ambientales continuas cuya variabilidad espacial se exprese por medio de unidades cartográficas. En este caso, existirán conjuntos de píxeles, pertenecientes a la misma unidad cartográfica cuyo valor sea exactamente el mismo, Por el contrario su expresión sea la de un campo continua de valores, en la cual cada píxel podrá tener un valor numérico diferente de el de sus vecinos.

En el caso de las capas con unidades cartográficas, el valor asignado a cada una de éstas será e valor modal de la variable en ese sector del terreno. En el caso de las capas de variación continua el valor asignado será representativo sólo del píxel al cual afecta.

Particularmente, en el caso de las variables principales, la tarea se realiza siguiendo la siguiente secuencia:

- 1º) Análisis, por separado, de cada uno de los perfiles de suelo y perfiles geológicos con que se cuenta. El análisis implica la descripción de sus materiales, textura, fracturación y grado de modificación por cementación, presencia de niveles de diferente comportamiento hidrológico, etc.
- 2º) Asignación de un valor modal representativo de cada perfil analizado. Dicho valor procede del estudio del perfil y de la utilización de valores de referencia y/o funciones de pedotransferencia, según sea la variable analizada. Usualmente los primeros se utilizan para el caso de la conductividad hidráulica del substrato del suelo (Kp), mientras que las otra se utilizan para el contenido de agua útil, y la conductividad hidráulica del suelo (Hu y Ks , respectivamente). Para tal fin se utilizaron las funciones de pedotransferencia propuestas por Rawls y Brakensiek (1983a y b).

- 3º) El valor modal de cada unidad cartográfica se asigna en función de los perfiles de suelo y litológicos que representa. Se debe recordar que una unidad cartográfica está integrada por una o más unidades taxonómicas (suelos), cada una de las cuales se encuentra en una proporción variable. En el caso que existan más de una unidad taxonómica en una unidad cartográfica, el valor surgirá del promedio ponderado de los valores modales de cada uno de los perfiles involucrados en la unidad cartográfica. El factor de ponderación será la proporción que ocupan en la unidad cartográfica en cuestión.

El valor modal del perfil surge como el valor *razonado* de los valores de Hu , Ks y Kp de cada uno de los horizontes, estratos o capas presentes en él. Especialmente en el caso de las funciones de pedotransferencia, se debe tener en cuenta que los valores que se obtienen son referidos a la matriz del suelo. En consecuencia, al analizar el perfil, dichos valores deberán, necesariamente, ser modificados ante la presencia de características tales como macroporosidad, presencia de raíces, compactación, cementación, tipo de estructura, presencia de límites netos, etc., tal como ya se analizó en el capítulo anterior de esta Tesis. En otras palabras: los valores deberán ser coherentes con el *objetivo* para el cual fueron seleccionados. Dicho objetivo, se recuerda, es la descripción del comportamiento hidrológico del suelo. Es por esta razón que en la segunda etapa de análisis descripto anteriormente, la tarea es doble y secuencial. A partir de una primera estimación, los valores puntuales de Hu , Ks y Kp fueron revisados y modificados de acuerdo a las características morfológicas de cada perfil, es decir, teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados o cualquier otro rasgo morfológico que evidenciara un posible aumento o disminución del valor obtenido inicialmente. Tal tarea no es factible de ser, ni siquiera parcialmente, automática. Requiere, sin lugar a dudas, del ejercicio del criterio profesional y experiencia técnica del operador.

No debe olvidarse que la evaluación y valoración de las propiedades hidrológicas de un suelo es una tarea en la cual se aplican reglas y procesamientos basados en la experiencia de quien realiza la tarea, tanto en el terreno analizado como en el problema a analizar.

Por otra parte, se debe recordar que los valores de Kp , Ks y Hu se estiman a partir de la información de suelos y del análisis del substrato litológico de los mismos. Existe, pues, la posibilidad de hallar divergencias en el comportamiento hidrológico estimado con estos parámetros en ciertos lugares del terreno donde la dinámica hidrogeológica ejerza una influencia particularmente notoria en el ciclo hidrológico local.

5.4.3. Parametrización de las variables ambientales

En esta etapa del trabajo, la atención se dirige, como ya se apuntó a tres elementos clave en el terreno: la estructura y la morfología del terreno, y la cubierta del suelo. A continuación se desarrolla el análisis de cada uno de éstos.

5.4.3.1. Estructura del terreno

El análisis de las variables geológicas permite, en primer lugar, la separación de los componentes del terreno analizado según su naturaleza (ígneas, sedimentaria o metamórfica) y grado de cohesión (rocas o sedimentos). Así se definen grupos litológicos amplios con los cuales describir en forma precisa los diferentes tipos de rocas y materiales sedimentarios. Tales tipos serán incluidos en diferentes sectores de la estructura geológica del terreno analizado.

Por su parte, la información respecto a la estructura geológica permite definir el grado y forma en que el terreno ha sido afectado por esfuerzos mecánicos que obligaron al acomodamiento de los materiales según uno o más tipos de estructuras tectónicas. Concretamente, en el presente estudio se tuvieron en cuenta las estructuras de escala regional, es decir aquellas que afectan uno o más tipos litológicos dentro de extensiones de terreno del orden de los cientos de kilómetros de superficie.

La estratigrafía, da la oportunidad de profundizar más en la diferenciación del terreno en unidades internamente coherentes en cuanto a su origen y comportamiento hidrológico a la escala del análisis. Normalmente, en la escala regional, la estratigrafía es coherente con la tectónica, pero divide en distintos grupos a un mismo tipo de roca, o por el contrario puede agrupar a distintas litologías en función de haberse generado en un mismo intervalo de tiempo o en un ambiente deposicional común. Agrupando a la litología en diferentes conjuntos, cada uno de ellos identificado con un determinado período de la historia geológica del terreno, se obtiene la información litoestratigráfica.

Para la escala a la cual es definida la información geológica, existen dos alternativas. Por una parte se cuenta con la información general, que involucra a una columna litoestratigráfica, de varias decenas de metros. Por la otra está la información local, en la cual se encuentran perfiles litológicos específicos, que representan situaciones especiales y concretas del sector analizado. En el caso de tratarse de información genérica, que involucre a un gran volumen de material geológico es conveniente utilizar directamente valores de referencia, como los analizados en capítulos anteriores, donde ya se toma en cuenta el efecto de la fracturación, estratificación y alteración. Es sólo en el caso de perfiles sedimentarios locales donde es potencialmente posible utilizar funciones de pedotransferencia, como herramienta de referencia en la asignación de valores modales.

Como síntesis de lo anterior, el análisis geológico permite definir las combinaciones litológico-estructurales que dominan en el terreno analizado. Tales combinaciones surgen por la superposición de los tres temas analizados, constituyéndose como un punto de apoyo fundamental en el estudio de la distribución espacial de los suelos y su comportamiento hidrológico.

5.4.3.2. Morfología del terreno

La morfología del terreno hace referencia, en esta tesis, a la forma cartográficamente observable del terreno analizado. La misma se manifiesta a través de diferentes variables ambientales, tales como a altimetría, la pendiente topográfica, a orientación de dicha pendiente, la curvatura del paisaje y el grado de desarrollo de la red de drenaje. Las variables analizadas provienen en su totalidad del procesamiento del modelo de elevación del terreno del sector analizado.

La altimetría, es decir la distribución de las cotas topográficas en el terreno, guarda relación con las demás variables de la morfología del terreno y fue utilizada como elemento de diagnóstico en la distribución de los tipos de suelos y la cobertura de los mismos.

La pendiente topográfica, por ser una clara limitante para el desarrollo edáfico y de uso de suelos, fue analizada en función a su potencial diagnóstico en el comportamiento hidrológico del terreno. Junto con esta variable, la orientación de la pendiente fue analizada.

La red de drenaje es una característica fundamental en la descripción del comportamiento hidrológico del terreno. La misma se relaciona tanto al proceso de transporte de agua y sedimentos, en el tramo principal de la cuenca, como la distribución local de la humedad de suelos. A ésta se asociaron la curvatura topográfica y el índice topográfico. Ambas fueron variables derivadas del modelo de elevación del terreno.

Sobre la base de la información topográfica se generan diferentes capas de información: altimetría, pendiente topográfica, orientación de las pendientes, curvatura del relieve e índice topográfico. Todas son elaboradas a través de la herramienta SIG. Particularmente, la curvatura del relieve es calculada utilizando un filtro propuesto por Bolstad, et al.(1988), en el cual se realiza una comparación entre las diferencias de cota topográfica entre el pixel central de ventana de 3 por 3 elementos, con relación a los 8 pixeles restantes (Figura 5.8).

-1/8	-1/8	-1/8
-1/8	1	-1/8
-1/8	-1/8	-1/8

Figura 5.8: Filtro digital utilizado para la generación de la curvatura del terreno

Los resultados negativos indican que el pixel central se encuentra deprimido en relación a los que le rodean. El caso contrario señala una elevación relativa. La capa resultante es dividida por el valor medio de la distancia entre cada pixel de la periferia respecto al central.

El índice topográfico definido por Beven, et al. (1995) se considera un medio para señalar el grado de “similitud hidrológica” existente dentro de la cuenca hidrográfica y de ésta respecto a otras unidades hidrológicas. En esencia, este índice relaciona la pendiente topográfica con la red de drenaje interna de la cuenca. La ecuación (5.10) señala una forma operativa para su cálculo a partir de los datos de un modelo digital del terreno (Colosimo y Mendicino, 1996).

$$IT = \ln\left(\frac{a_i}{\tan(\beta)}\right) \quad (5.10)$$

donde:

\ln : logaritmo natural.

a_i : número de celdas acumuladas aguas arriba de la celda analizada.

$\tan(\beta)$: pendiente topográfica.

El cálculo de las direcciones de flujo, elaboración de la red de drenaje y número de celdas acumuladas en el modelo digital del terreno es realizado utilizando un módulo perteneciente a la herramienta GIS.

5.4.3.3. Cubierta del suelo

La cubierta del suelo es un tema amplio, en el cual se incluye el uso del suelo. En esta tesis esta variable ambiental fue utilizada como herramienta para poder profundizar en el análisis de las cualidades hidrológicas del terreno.

Cabe recordar que los mapas de uso del suelo son la representación gráfica de la forma en que la superficie del terreno es aprovechada por el hombre, ya sea para uso urbano, agrícola, vegetación natural, etc.

En casos donde la escala del análisis permite un análisis mas detallado es posible analizar la cubierta vegetal como función de su estructura y su densidad. Sin embargo, cuando la escala del análisis permite un análisis más cercano al regional, el uso del suelo es la variable idónea, pudiéndose dividir a ésta en función de su estructura y densidad dominante.

El análisis del patrón de distribución de los diferentes tipos de uso del suelo permite elaborar conclusiones en dos temas claros. Por una parte es posible definir con claridad cuál es la proporción de tierras afectadas directamente por la actividad humana.

Lo expresado anteriormente permite sintetizar los usos dominantes y, a su vez, poder elaborar conclusiones respecto a la relación entre los tipos de suelo, sus características hidrológicas y los usos que el hombre le da a los mismos. Así, en estos casos, fue posible diferenciar dos tipos de uso del suelo asociadas a estructuras de claramente diferente: por una parte los terrenos afectados por la acción antrópica, como terrenos urbanizados, industriales, y campos de labor (incluyendo los terrenos forestales de repoblación) y los terrenos que muestran un menor impacto antrópico.

Por otra parte, dentro de estas dos categorías, fue posible diferenciar dos clases diferentes, en función de la densidad de la cubierta vegetal observable, o asociada a cada uso del suelo.

En aquellos casos donde la escala de trabajo, y la información disponible es suficiente, la tarea se orienta directamente hacia la cartografía directa de estas dos características de la cubierta vegetal.

5.5. Referencias

- Beven, K; Lamb, R; Quinn, P.; Romanowicz, R. y Freer, J.** *TOPMODEL*. En: **Singh, V.P. (Ed.)**. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. 1995.
- Boer, M.; Del Barrio, G. y Puigdefábregas, J.** *Mapping soil depth classes in dry Mediterranean areas using terrain attributes derived from a digital elevation model*. *Geoderma*, vol. 72; p.: 99 - 118. 1996.
- Bolstad, P. V.; Swank, W. y Vose, J.** *Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data*. *Landscape Ecology*, vol. 13; p.: 271-283. 1998.
- Burrough, P. A.; Bouma, J y Yates, S. R.** *The state of the art in pedometrics*. *Geoderma*, 62; p.: 311-326. 1994.
- Colosimo, C y Mendicino, G.** *GIS for rainfall-runoff modelling*. En: **Singh, V. P. y Fiorentino, M. (Eds.)**. *Geographical Information Systems in Hydrology*. Kluwer Academic Publishers; p.: 195-235. 1996.
- McKenzie, N. J. y Austin, M. P.** *A quantitative Australian approach to medium and small scale surveys based on soil stratigraphy and environmental correlation*. *Geoderma*, vol. 57; N° 4; p.: 329-355. 1993.
- Montgomery, D. C. y Runger, G. C.** *Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería*. Mc Graw-Hill. México; 1996.
- Rawls, W. J. y Brakensiek, D. L.** *Procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters*. *Advances in Infiltration*; p.: 1021-112. ASAE Publication 11-83. USA; 1983a.
- Rawls, W. J.; Brakensiek, D. L. y Miller, N.** *Green-Ampt infiltration parameters from soils data*. *J. Hydraulic Division ASCE* vol 109 (1); p.: 62-70. USA; 1983b.
- Webster, R.** *Is the soil random?*. *Geoderma*, 97, 149-163. 2000.

Capítulo 6

Resultados

6.1. Introducción

En este capítulo se exponen los resultados de la aplicación del procedimiento propuesto en esta tesis, en tres casos distribuidos dos en España y uno en el sur de Francia. Los tres casos permiten analizar diferentes situaciones, en distintos tipos de terreno, donde la calidad y la cantidad de la información no es la misma.

6.2. Desarrollo del trabajo

En cada caso analizado, el estudio comienza con la descripción sintética del área de estudio, según el buen saber y entender de quien elaboró esta tesis. La descripción sigue el criterio usual en un estudio del terreno. De esta forma se comienza desde las características de mayor influencia areal, finalizando en las características de orden local. En los tres casos considerados en esta tesis, el análisis de la estructura tectónica inicia la descripción del área, finalizando con el uso del suelo. El objetivo de esta descripción es la de definir con la mayor claridad posible las características principales de los elementos que constituyen el terreno, es decir: su estructura, su morfología y su cubierta vegetal y los suelos que se definen en él. Durante la etapa

descriptiva, debe quedar claro al lector que la descripción de las diferentes áreas de trabajo se realizó de forma sintética, utilizando categorías *amplias y simplificadoras*. Con éstas, *se intentó destacar las mayores diferencias entre grandes grupos de elementos*. Particularmente en el caso de los suelos, y coherente con los objetivos de esta Tesis, el criterio descriptivo seleccionado es la de asociar a los diferentes perfiles modales analizados, a un perfil “genérico” (por ejemplo: A/C-C, o A-B-C) con el cual destacar sus mayores características morfológicas, el grado de desarrollo del perfil, y sobretodo su significado hidrológico. De esa forma, el hecho que se señalen durante el trabajo unas pocas combinaciones de horizontes de suelo no significa que éstos sean los únicos observados o reportados, sino que son los “tipos

de perfiles” o “modelos de perfiles” que mejor describen las características de los suelos analizados, fundamentalmente desde el punto de vista hidrológico.

Debe quedar

Una vez descrito el terreno, la etapa siguiente implica la definición de las variables principales y ambientales, sobre la base de la información disponible. La misma es la consecuencia de la etapa anterior. Se procede así a la elaboración de las correspondientes capas temáticas y la asignación de valores modales, tal como se describió en el capítulo anterior.

Definidas las variables del análisis, se procede a la aplicación del procedimiento propuesto, ya explicado en el Capítulo anterior. Lo dicho implica no sólo calcular las tendencias regionales de los valores de las variables principales, sino también el análisis de los resultados obtenidos: precisión de ajuste y distribución espacial.

La etapa final del estudio es la utilización de la estimación de las variables principales en la modelación hidrológica distribuida. Para tal fin se procedió a la calibración y validación del modelo TETIS (Vélez et al., 2002; Puricelli y Francés, 2003) en cada uno de los casos analizados. Esta tarea tuvo como objetivo probar el funcionamiento práctico de las estimaciones realizadas en la modelación de la respuesta hidrológica del terreno analizado. De esta forma se procuró comprobar la capacidad del modelo, sobre la base de las estimaciones de las variables principales, para:

- i) reproducir otros eventos diferentes a los utilizados en la calibración (validación temporal) y,
- ii) reproducir el comportamiento hidrológico del terreno de forma simultánea, en diferentes puntos de la cuenca (validación espacial), hecho que se puede comprobar exclusivamente en modelos distribuidos.

Al comparar los resultados obtenidos en las simulaciones, con los datos originales, el criterio utilizado para aceptar o rechazar una calibración fueron, básicamente dos:

- a) La conservación del balance hídrico.
- b) La calidad de reproducción del evento simulado.

La conservación del balance fue el principio básico tanto para la aceptación de una calibración, como para el análisis de la falta de ajuste de las simulaciones a los valores observados. Así, fue requerido en todos los casos analizados que los volúmenes de entrada superen (o igualen) a los de salida.

Posterior a la comprobación del balance hídrico, la bondad del ajuste fue analizada visualmente, comparándose los resultados de la simulación respecto a los valores observados originalmente en cada punto de aforo. Así, concretamente, se tuvieron en cuenta tres puntos clave:

- 1) El grado de ajuste del tiempo al pico. Es decir que el pico en los caudales simulados debió, necesariamente, coincidir o estar muy próximo al pico observado.
- 2) El grado de ajuste de los volúmenes. Gráficamente fue considerado necesario que tanto los volúmenes observados como los simulados fuesen de proporciones similares.
- 3) La curva de recesión. Debido a que la curva de recesión en un hidrograma señala el comportamiento del terreno una vez que ha cesado el evento de precipitación, el punto de inicio, su curvatura y los valores finales de la misma son fundamentales a la hora de analizar el comportamiento hidrológico del terreno.

Finalmente, se adoptó una medida cuantitativa de la bondad del ajuste, como complemento de los criterios anteriormente citados. Esta medida fue el índice de Nash-Shutcliffe:

$$R_N^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\widehat{Q}_t - Q_t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t - \overline{Q_t})^2} \quad (6.1)$$

donde:

t : representa a cada uno de los intervalos de tiempo de la simulación.

Q_t : es el caudal observado en cada intervalo de tiempo.

\widehat{Q}_t : es el valor estimado del caudal.

$\overline{Q_t}$: valor medio del caudal observado.

El criterio para aceptar una calibración es muy subjetivo. En la literatura parece que es aceptable una calibración con un índice de Nash-Shutcliffe superior a 0.6, y se considera como excelente un valor superior a 0.8.

Lógicamente, los criterios de ajuste en validación son peores que en calibración. Por ello, normalmente se considera en la literatura como aceptable un índice de Nash-Shutcliffe superior a 0.5, siendo excelente las validaciones por encima de 0.7.

6.3. Caso 1: Cuenca del Tajo

En este primer caso analizado, el estudio se desarrolló en dos partes. En la primera, la principal, se procedió a la estimación de la distribución espacial de las variables hidrológicas Hu (capacidad de almacenamiento del suelo), Ks (conductividad hidráulica del suelo), y Kp (conductividad hidráulica del substrato del suelo). La segunda parte del análisis consistió en comprobar la validez de la estimación por medio de la calibración del modelo hidrológico distribuido TETIS, empleando para ello diferentes eventos hidrológicos, registrados en diferentes puntos de la cuenca.

A continuación se exponen las diferentes etapas del análisis realizado, desde la revisión general del área de trabajo hasta la estimación propiamente dicha, y la modelación hidrológica.

6.3.1. Descripción del área de trabajo

La cuenca del Tajo se localiza en el intervalo de los 2 y 8 grados de longitud Oeste y entre los 35 y los 45 grados de latitud Norte. Sus divisorias Norte (Cordillera Central) y Oeste (Cordillera Ibérica) son las zonas más elevadas, localizándose sobre éstas las nacientes de la mayor parte de sus cuencas interiores. La zona considerada en este informe comprende un rectángulo de terreno que incluye a la totalidad de la cuenca hidrográfica del Tajo, tanto en territorio español como portugués. Las coordenadas que limitan el área se describen en el Cuadro 6.1.

Extremo geográfico	$X(UTM)[m]$	$Y(UTM)[m]$
Mínimo	90000.0	4320000.0
Máximo	640000.0	4590000.0

Cuadro 6.1: Coordenadas de los extremos del área de trabajo.

Tratándose de una de una de las cuencas más extensas de la Península Ibérica, es necesario comenzar la exposición de la geología y tectónica de la cuenca del Tajo, partiendo de una visión general de la región. A partir de estas observaciones generales, se irá profundizando progresivamente hasta alcanzar el nivel de detalle de la información utilizada en el cálculo de los parámetros hidrológicos del terreno.

6.3.1.1. Tectónica y morfología regional

El área de la Península Ibérica está compuesta por terrenos que fueron afectados por diferentes eventos tectónicos, en distintas épocas de su historia geológica. La historia tectónica de la zona indica diferentes ciclos de deformación, superpuestos unos sobre otros. Basándose en lo indicado por Julivert et al. (1980), los terrenos que afloran en la península ibérica que afectan a la cuenca del Tajo pueden ser agrupados en cuatro grandes grupos:

- i) Terrenos precámbricos, deformados con anterioridad al Paleozoico.
- ii) Terrenos paleozoicos, deformados por la orogénesis hercínica.
- iii) Terrenos mesozoicos y terciarios deformados por la orogénesis alpina.
- iv) Terrenos mesozoicos no deformados por la orogénesis alpina.

Los terrenos paleozoicos deformados por la orogénesis hercínica y anteriores afloran mayoritariamente en la Cordillera Central y las Sierras de Toledo y Extremadura. Los terrenos mesozoicos y terciarios afectados por la orogénesis alpina componen mayoritariamente la Cordillera Ibérica.

Los terrenos no deformados por estos movimientos componen la cobertera que se sitúa entre los tres elementos topográficos anteriores. A consecuencia de la evolución tectónica del área, es posible separar tres grandes grupos estructurales cuyo significado hidrológico es contrastado: uno correspondiente a la estructura hercínica (Cordillera Central y Montes de Toledo y Extremadura), otra referida a la Cordillera Ibérica y otra correspondiente a los materiales de cobertera poco o nada estructurados (Cuadro 6.2 2 y Figura 6.1).

Grupo	Denominación
1	Cordillera Central y Montes de Toledo y Extremadura
2	Depresión del Tajo, cobertera sedimentaria
3	Cordillera Ibérica

Cuadro 6.2: Grupos estructurales definidos en el área de trabajo

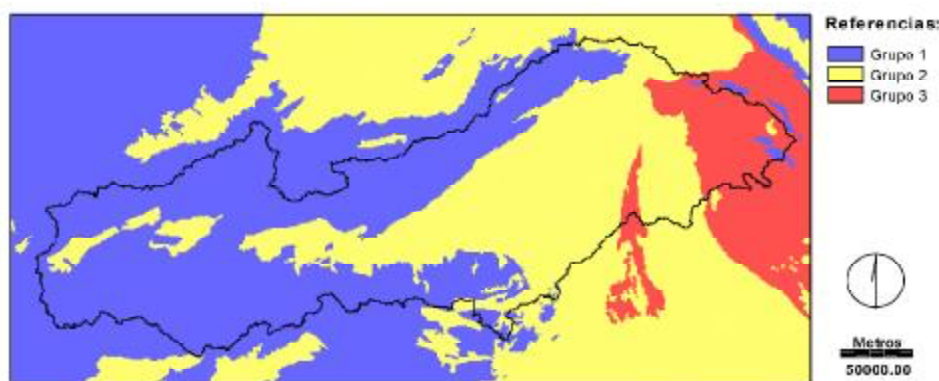


Figura 6.1: Grupos estructurales definidos en el área de trabajo

A continuación se expone una breve descripción de cada uno de los elementos morfológicos de importancia regional en la cuenca del Tajo.

En primer lugar, el *Sistema Central y Montes de Toledo y Extremadura* se relaciona con el núcleo estable de la Península Ibérica; afecta ampliamente a la cuenca del Tajo, e incluye a la Cordillera Central. Este macizo afecta a la divisoria Norte, y a los terrenos orientales y surorientales de la cuenca. En lo referente a la estructura, el elemento más llamativo lo forman los largos núcleos sinformes orientados de SE a NO. Éstos recorren longitudinalmente a la zona, apareciendo claramente en la morfología regional del terreno: la Cordillera Central. Éste presenta una morfoestructura en bloques y una fisonomía de planicies escalonadas (Pedraza; 1989).

Sus límites están claramente definidos por dos cuencas sedimentarias que lo bordean: las fosas del Duero y del Tajo, al Norte y Sur, respectivamente. Hacia el Oeste, en cambio, los límites son menos claros al integrarse éste con el conjunto del Macizo Hespérico. La fisonomía escalonada del Sistema Central se estructura según uno o varios sillares, que según el caso dejan entre sí una serie de depresiones o fosas interiores como son las del Alto Lozoya, Tiétar, Alberche, etc. El predominio de este tipo de formas se deben a la continuidad y persistencia de los esfuerzos tectónicos afectan a la región (Pedraza, 1989; p.: 166). Otro elemento morfológico que también pertenece al macizo Hespérico son los Montes de Toledo y de Extremadura. Se trata de un conjunto de sierras fragmentadas y discontinuas que conforman una unidad morfológica que limita al N con la meseta granítica toledana, al Este con la Mancha y al Oeste con la penillanura cacereña. Al Sur, su límite con el Campo de Calatrava es difuso. Su rumbo general es N120.

Martín y Molina (1989; p.: 189) indican que estos relieves, comprendidos entre el Tajo y el Guadiana, son el resultado de un largo proceso de erosión diferencial sobre superficies paleozoicas y prepaleozoicas, afectadas por la orogenia hercínica.

Para el caso de la *Depresión del Tajo*, Julivert, et al. (1980; p.: 9) indican que el dominio hercínico ibérico aflora ampliamente en la península, aunque también se encuentra oculto en amplias zonas bajo materiales mesozoicos y terciarios, que forman áreas de plataformas tabulares o con un grado de deformación variable. De éstas, las zonas con poco o nada de deformación ocupan la parte centro-oeste de la cuenca, y parte de la divisoria sur de la misma. Esta plataforma alcanza su máxima deformación en la Cordillera Ibérica, la cual afecta a la zona oriental de la cuenca. Dentro de las zonas poco o nada deformadas, en la Cuenca de Castilla La Nueva, entre el Sistema Central y los Montes de Toledo, la estructura del terreno corresponde a la de una fosa tectónica: la Fosa del Tajo. El espesor de los sedimentos que rellenan a esta fosa disminuyen progresivamente hacia el Noreste. Por el Sur, el zócalo sobre el cual se apoya esta estructura asciende paulatinamente hacia La Mancha, donde aflora ya la cobertera mesozoica y, finalmente, el propio zócalo. Superpuesto a este conjunto existe una tectónica de fracturas de edad cenozoica,

autónoma con respecto a las estructuras anteriores. Perez, et al. (1989; p.: 177) explican que una característica notable de esta cuenca sedimentaria es su compartimentación en diferentes subdominios morfoestructurales, los cuales han tenido una diferente evolución en el tiempo, y han condicionado a los procesos externos de morfogénesis cuaternaria. Los mismos autores indican que la causa de esta división interna se encuentra en la presencia de juegos de fallas siendo la mayoría tardihercínicas. Éstas son las que han delimitado los umbrales y depresiones que han controlado los espesores y distribución de los materiales de relleno de la fosa.

Engranando lateralmente con la Cuenca de La Mancha, y genéticamente relacionado con el Macizo Hespérico, se encuentra la *Cordillera Ibérica*. Ésta constituye una alineación montañosa con rumbo general NW - SE, que llega hasta el Mediterráneo, en su extremo sur. En el interior de la misma se sitúa la divisoria de aguas más importante de la Península entre los ríos Duero, Ebro, Tajo, Turia, Júcar y Guadiana. Limita al Norte con la Depresión del Ebro, al Oeste con la del Duero, Sistema Central y Cuenca del Tajo. Al Sur, la Cordillera Ibérica limita con La Mancha y el enlace con las Cordilleras Béticas. Finalmente, al Este toma contacto con el litoral valenciano y su conexión con las Catalánides. Gutiérrez y Peña (1989; p.: 143) indican que el conjunto de esta Cordillera se interpreta como una cadena con un zócalo y una cobertera claramente diferenciados entre sí. El zócalo, de edad hercínica, se articula en bloques. A éste se adapta la cobertera mesozoica, con el desarrollo de superficies de despegue en los materiales plásticos triásicos.

6.3.1.2. Litoestratigrafía regional

Los materiales que componen las anteriores unidades se pueden diferenciar en función de sus características físicas y de su edad relativa. En el caso de la cuenca del Tajo, esta tarea implica tener en cuenta un amplio rango de materiales (sedimentarios, ígneos y metamórficos) generados y/o modificados en diferentes etapas de la historia geológica de la zona. Se pueden definir así dos elementos claves para separar la columna estratigráfica de cada parte de la cuenca del Tajo: el substrato o basamento, por un lado y la cobertera, por el otro. El primer elemento hace mención a los materiales más antiguos y consolidados, sobre los que se asienta la estructura del terreno. La cobertera, en cambio la constituyen materiales más jóvenes, consolidados o no, que cubren total o parcialmente al substrato. Dentro de esta última, es necesario distinguir a los depósitos más recientes, los cuales son los indicadores del estado de evolución del terreno y, por lo tanto, del tipo, y dimensiones de los procesos hidrológicos que se desarrollan en la actualidad.

El Cuadro 6.3 y la Figura 6.2 indican la distribución de los principales tipos litológicos en el área estudiada. Complementariamente; el Cuadro 6.4 y la Figura 6.3 indican la edad relativa del terreno analizado.

Grupo Litológico	Unidades Litológicas
1	Materiales clásticos sueltos dominantes sobre rocas clásticas
2	Conglomerados, areniscas, margas, arcillas, dominantes, sobre calizas y dolomías y yesos.
3	Dominantes calizas, margas, dolomías sobre areniscas y conglomerados
4	Basamento ígneo y metamórfico

Cuadro 6.3: Unidades litológicas generales para el área de estudio

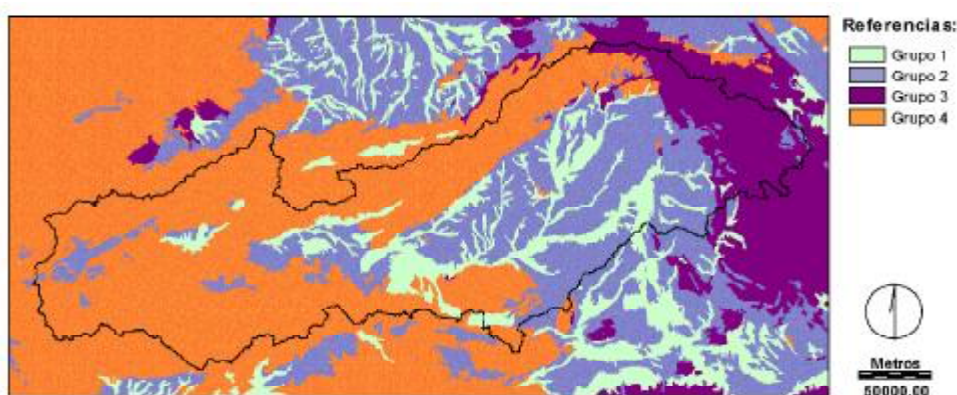


Figura 6.2: Distribución de las unidades litológicas en el área de estudio

En el caso del *Sistema Central, Sierras de Toledo y Extremadura*, al sustrato lo definen materiales pre-paleozoicos y paleozoicos distribuidos irregularmente según zonas. En la sierras de Gredos y Guadarrama predominan granitoides carboníferos sobre los materiales metamórficos, generalmente de alto grado y edad preordovícica. Únicamente en las zonas más orientales de la sierra de Guadarrama cobran importancia estos últimos materiales, con un predominio casi absoluto de los gneises y rocas afines. En Somosierra dominan las series ordovícicas y silúricas de cuarcitas, pizarras y esquistos, aunque también aparecen metamorfitas preordovícicas altamente transformadas. Estos materiales son, a su vez el basamento de las Sierras de Toledo y Extremadura. Junto a materiales paleozoicos, en el Sistema Central aparecen algunas coberteras precuaternarias y cuaternarias. Las primeras se localizan dentro de fosas interiores y depresiones, presentando materiales similares a los de las grandes cuencas sedimentarias de la Meseta. Así, los materiales cretácicos se componen de calizas, arenas y margas, mientras que los paleógenos se componen de conglomerados, arcillas, margas areniscas y yesos.

Finalmente los materiales neógenos se componen de arcillas. Entre los depósitos de edad cuaternaria los más extensos son los fluviales, los coluviales, y los depósitos de glacia. Son mencionados también los depósitos de origen glacial y fluvioglacial, turberas, etc. En el caso de las Sierras de Toledo y Extremadura, se menciona a cierto tipo de depósitos continentales de gran extensión, característicos de la zona: las Rañas, de edad cuaternaria.

Grupo estratigráfico	Unidades estratigráficas
1	Bloque hercínico, Silúrico-Permo-Triásico
2	Jurásico + Triásico superior
3	Cretácico
4	Paleógeno+Cretácico superior
5	Neógeno
6	Plioceno - Cuaternario

Cuadro 6.4: Agrupación de unidades estratigráficas en el área de estudio

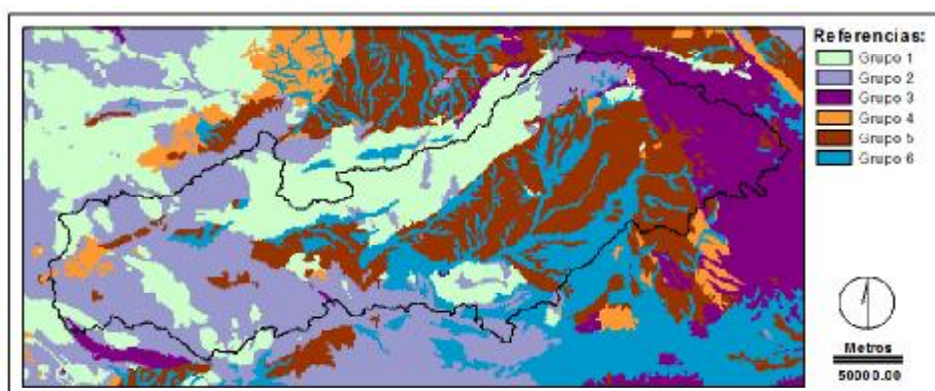


Figura 6.3: Distribución de las unidades estratigráficas en el área de estudio

En el caso de la *Cordillera Ibérica*, se distinguen dos grupos de materiales, directamente relacionados con los dos ciclos tectónicos. Así, asociado al ciclo Hercínico existen potentes series detríticas, con intercalaciones carbonatadas de origen fundamentalmente marino. Sus edades varían entre el Precámbrico superior y el Carbonífero superior (Gutiérrez y Peña; op. cit.; p.: 143). Por otra parte, asociado al Ciclo Alpino, se encuentran materiales de edad permotriásica, dispuestos sobre una superficie de discordancia regional sobre la estructura hercínica. Durante el Mesozoico, la sedimentación dominante en el área de la Cordillera Ibérica fue

carbonatada y de origen marino, excepto los materiales del Triásico inferior y el Cretácico inferior (Gutiérrez y Peña; op. cit.; p.: 143). Finalmente, y a consecuencia del plegamiento alpino, se genera un sistema de fosas tectónicas que serán rellenadas a lo largo del Terciario con materiales continentales, fundamentalmente de abanicos aluviales, y de ambiente de “playa - lake” (Gutiérrez y Peña; 1989; p.: 143). Según los citados autores, en la Cordillera Ibérica, las acumulaciones de más reciente edad son básicamente de dos tipos: los relacionados a las fases frías pleistocenas y los ligados a la actividad fluvial. En el primer caso se trata de depósitos glaciares y fluvio-glaciares que se encuentran en localidades puntuales del territorio, dentro de los terrenos de mayor altura de la Cadena. Los del otro tipo, son más frecuentes de hallar, siendo los depósitos de glacis los más extendidos. Los depósitos de glacis que se mencionan para el Sistema Central se localizan en el interior de las fosas tectónicas y depresiones intermontanas existentes en la Cordillera. Gutiérrez y Peña (op. cit.; p.: 144) reconocen dos niveles estratigráficos que definen los glacis: inferior y superior. El nivel inferior está compuesto por materiales detríticos y arcillas de descalcificación, proveniente de los macizos calizos circundantes; su potencia máxima es de 50 - 60 cm. El nivel superior es básicamente detrítico grosero, con potencias que no superan los 20 cm.; al techo de estos depósitos se desarrollan, generalmente costras calcáreas, que localmente pueden alcanzar potencias importantes.

En la *Depresión del Tajo*, Pérez et al.(1989; p.: 177) indican que se trata de una cuenca terciaria intracratónica formada por la fracturación y hundimiento del zócalo hercínico durante el Cretácico superior. Está rellena por depósitos terciarios de origen continental. Éste es complejo y está sujeto a la variabilidad litológica y deposicional que se identifican en esta región; esto es: ambientes fluviales con episodios de carácter palustre o lacustre, particularmente en el Mioceno medio y superior. Los materiales son fundamentalmente detríticos, aunque existen evaporitas de extensión importante en la Cuenca de Madrid.

6.3.1.3. Suelos

En este apartado se describen en forma resumida las principales características edafológicas de importancia hidrológica en la cuenca del Tajo. La base para una taxonomía de aplicación hidrológica serán las características morfológicas del perfil. De esta forma es posible definir las cualidades hidrológicas del suelo y asociar a éstas con los parámetros de modelación. La base taxonómica particular de este caso fue la separación de los suelos en función del grado de desarrollo que presenten sus perfiles; es decir: en función del tipo y cantidad de horizontes edáficos que éstos presenten. Se definieron así tres categorías principales con las cuales establecer las mayores divisiones entre tipos de suelos (Cuadro 6.5).

Así, lo suelos que no presentan desarrollo en el perfil o éste es mínimo son lo que comparten más características con los materiales parentales. Se relacionan

Categoría	Denominación	Perfil tipo
1	Suelos sin horizontes edáficos definidos	Sin perfil definido
2	Suelos con poco desarrollo de suelos	Perfil A-C o A/C-C
3	Suelos desarrollados	Perfil A-B-C

Cuadro 6.5: Categorías básicas de los suelos

fundamentalmente con depósitos sedimentarios recientes, tales como lo aluviales o coluviales. Desde el punto de vista hidrológico, su característica común y más destacada es la marcada heterogeneidad lateral y vertical de los suelos. Las unidades cartográficas que contengan este tipo de suelo están asociadas a geoformas claramente diferenciables en el terreno, tales como depósitos coluviales o aluviales. Los límites externos de estas unidades, así como las superficies que las subdividen internamente son superficies de discordancia de origen sedimentario o erosivo. En la cuenca del Tajo este tipo de suelos fue identificado normalmente asociado a cursos de agua y las zonas de regadío relacionadas a éstos.

Avanzando en la evolución del perfil de suelos, surge la segunda categoría: los suelos que presentan diferentes horizontes (al menos dos) pero el grado de diferenciación es bajo. Así surgen suelos con perfiles A-C o A/C-C, con un primer horizonte más o menos humificado, con cierto desarrollo de la estructura edáfica. Por debajo se presenta un horizonte directamente relacionado al material parental. Se trata de suelos que, normalmente no presentan gran profundidad, situándose en relieves y posiciones de paisaje geomorfológicamente activos. En términos hidrológicos, estos suelos participan fundamentalmente en la transmisión de flujos a lo largo de las laderas.

Finalmente, los suelos con desarrollo de horizontes en secuencia A-B-C indican el mayor desarrollo de perfil, respecto a los dos casos anteriores. Particularmente, la presencia del horizonte B, las características de su estructura edáfica, y la concentración de arcillas relativa al horizonte superior, indicarán la presencia o no de un nivel que impida la penetración profunda del agua, y/o la presencia de dos secciones claras en el perfil: una superior con buenas condiciones para la transmisión del agua y otra inferior, con una gran capacidad de almacenamiento hídrico. La distribución regional de estas categorías de suelos se exponen en la Figura 6.4.

Dentro de la última categoría de suelos, existen dos casos que deben destacarse, en función de la existencia o no de carbonatos de calcio en el perfil (Cuadro 6.6).

Guerra (1968) señala que la presencia de carbonatos está directamente asociada a la existencia o no de un material parental carbonatado: calizas, margas, etc. En el caso de tratarse de materiales ígneos o metamórficos, los suelos que se desarrollan no contienen carbonatos. La presencia de este compuesto químico implica, en el caso de los suelos la reducción de su conductividad hidráulica y su capacidad de

almacenamiento hídrico, ya sea por su presencia diseminada en la matriz del suelo o por la generación de superficies cementadas o costras calcáreas. En el caso de estas últimas, su presencia y distribución está asociada a la estratigrafía reciente del terreno y, consecuentemente, la evolución del suelo.

Categoría	Perfil tipo
3a	Perfil A-B-C libre de carbonatos
3b	Perfil A-B-C con presencia de carbonatos

Cuadro 6.6: División de los suelos más desarrollados

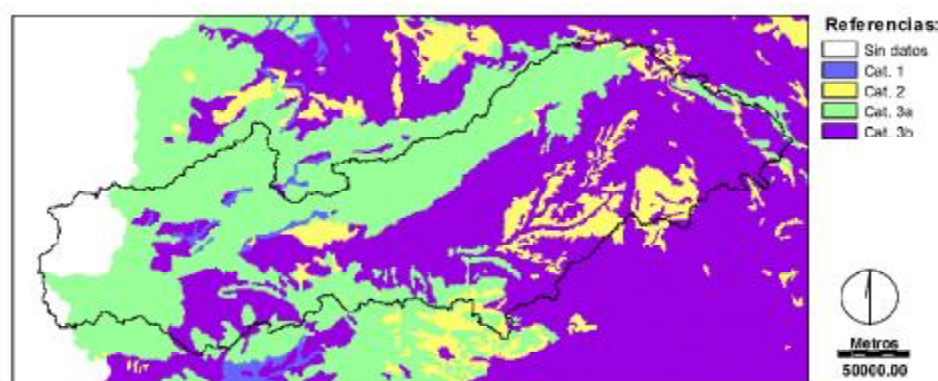


Figura 6.4: Distribución de las principales categorías de suelos, según Guerra (1968)

Finalmente, antes de señalar las características de los suelos en cada región, conviene considerar la división general de la textura observada en el horizonte superficial de los suelos (Cuadro 6.7 y Figura 6.5)

En el territorio ocupado por este conjunto morfológico del *Sistema Central y Montes de Toledo y Extremadura* predominan los suelos con perfil desarrollado, del tipo A-B-C. En este tipo de suelos, el horizonte B es de características cámbicas, de color pardo oscuro a ocre, formado por la desintegración y alteración de los materiales originales, y no presentan carbonatos en el interior del perfil. La asociación particular de suelos en cada zona se distribuye sobre el terreno guardando una fuerte relación con la hipsometría y el tipo de litología dominante (rocas ígneas o metamórficas, principalmente).

Lateralmente estos suelos se relacionan con suelos y materiales coluviales y aluviales y suelos someros de perfil A/C-C. En forma general, abundan las texturas gruesas, y los perfiles poco profundos, generándose así suelos de baja capacidad de almacenamiento y buenas condiciones de drenaje.

En el caso de los suelos coluviales, se trata de suelos típicos de las llanuras aluviales de ríos y arroyos. El paisaje en que son frecuentes es generalmente llano, y corresponde a los niveles más bajos de los valles fluviales. Otras veces, la actividad humana ha transformado en regadío extensas áreas correspondientes a niveles de terrazas más antiguas que incluso alcanzan niveles del Plioceno (Guerra, 1968; p.: 1). Se trata de suelos sin desarrollo de horizontes edáficos, o a lo sumo con un escaso desarrollo de horizontes A/C-C. Ésta es una de las evidencias que pone de manifiesto que los parentales materiales han estado sometidos a la acción de los factores ambientales de transporte y depositación.

Los suelos con perfil A/C-C o A-C se caracterizan, en esta región por presentarse en forma de pequeños parches de terreno, rodeados de suelos de representatividad regional. Su perfil es somero, y frecuentemente afectado por procesos de erosión y remoción de materiales, en terrenos con pendientes pronunciadas.

En la zona de Cáceres-Trujillo, sector del Almonte, se ha señalado la presencia de suelos desarrollados sobre depósitos alóctonos pedregosos. Su perfil puede presentar cierto desarrollo aunque Guerra(1968) señala la alta variabilidad en las características de su perfil, no habiendo una secuencia típica de horizontes que lo represente. Engranán lateralmente con suelos afectados por procesos de hidromorfismo estacional. La textura superficial de estos suelos es de gruesa a media, indicando buenas condiciones para la transmisión del agua. La presencia de rasgos hidromórficos en el perfil será una de las principales limitantes del suelo en profundidad.

En la zona de Madrilejos-Navahermosa-Orgaz (Sierra de Toledo) se observa una asociación local entre los suelos dominantes en la región y suelos con perfiles de tipo A-C o A/C-C, desarrollados sobre materiales consolidados. Estos tipos de suelos presentan perfiles de poca potencia, y un bajo desarrollo de horizontes. Normalmente presentan un horizonte superficial rico en materia orgánica, y con cualidades hidrológicas favorables para el almacenamiento de agua, aunque limitado por su escaso espesor. Poseen carbonato incorporado a la masa del suelo y fragmentos de caliza. Apoyan sobre un material lítico poco alterado, mediante un contacto claro y neto.

En la zona de influencia de la *Cordillera Ibérica* dominan los suelos cuyo perfil típico es del tipo A-B-C, con acumulación de carbonatos en todo su perfil, o al menos en la sección basal del mismo. Se desarrollan cubriendo grandes áreas, tanto sobre materiales consolidados como no consolidados. Este tipo de suelos tiende a ocupar las áreas geomorfológicamente más estables. Las texturas superficiales de estos suelos son de tipo medio, reduciéndose en profundidad en función del contenido de arcilla en el horizonte B. Por otra parte la presencia de carbonato de calcio en el interior del perfil puede provocar una notable disminución de su conductividad hídrica, dependiendo de su grado de consolidación. Lateralmente, los suelos anteriores se relacionan con materiales residuales en zonas con afloramientos de caliza,

que ocupan las partes altas de la ladera y suelos de perfil A-C, situados en las zonas de mayor pendiente, cercanas a la base. En el caso de los materiales residuales, la conductividad hidráulica es reducida, ya que se tratan fundamentalmente de depósitos de descalcificación de materiales calizos. Los suelos que los acompañan ladera abajo pueden presentar buenas cualidades de conducción hídrica, pero al ser de perfil somero no alcanzan grandes capacidades de retención hídrica.

En este territorio se observa a la variedad forestal de este tipo de suelos, entre la Sierra de Cuenca y la de Albarracín, en un sector limitado por la localidad de Cañete al Sur y Molina al Norte. Aquí, la presencia de uno o más estratos de bosque permite el desarrollo de un horizonte superficial rico en humus, mejorando las condiciones de almacenamiento superficial y retención hídrica en el terreno.

En la zona ocupada principalmente por los materiales de cobertera terciarios, la *Depresión del Tajo y la zona de cobertera*, se observa que la asociación regionalmente significativa está compuesta por suelos de perfil A-B-C, profundos y con presencia de carbonato de calcio. Este tipo de suelos se asocia lateralmente con suelos someros de perfil A-C, localizados en las posiciones del paisaje con más pendiente. Los suelos dominantes se caracterizan por su horizonte B cámbico, formado por alteración físico-química moderada del material originario, destacando su color pardo a ocre y su buena estructura y condiciones de aireación. Este tipo de suelos se corresponden directamente con el clima mediterráneo. En algunos casos, pueden presentar descarbonatados los horizontes A y (B), mientras que en otros presentan carbonato de calcio en todo el perfil. La litología se asocia como la causa fundamental de esta diferencia.

Regionalmente, el paisaje típico que se asocia con estos suelos es llano o de suave relieve, interrumpido por la red fluvial que excava los valles. Los suelos se distribuyen según un patrón en el cual los dominantes a escala regional ocupan los sectores más llanos y con buen drenaje. Mientras tanto, los suelos que acompañan a los anteriores ocupan los sectores marginales del paisaje, marcando la gradación suelo-paisaje, desde las zonas más altas, con las mayores pendientes locales tienen los suelos de menor espesor y desarrollo edáfico, hasta las zonas llanas, receptoras del material de transporte, con suelos más desarrollados y profundos.

Del análisis de la información provista por Guerra (1968) y los incluidos en el Mapa de suelos de la Comunidad Europea (1985), se puede concluir que el tipo textural más extendido es el medio a medio-fino, observándose la disminución del tamaño de grano respecto de los suelos situados al Norte, en el Sistema Central. Lo dicho se expone en el Cuadro 6.7 y la Figura 6.5.

Al margen de la profundidad, los factores limitantes de las propiedades hidrológicas de este conjunto de suelos son: las características físicas del horizonte B, y la presencia de carbonatos en el perfil.

En sectores donde los suelos de perfil A-C son localmente significativos se afectan notablemente las cualidades hidrológicas del terreno. Por ejemplo, al Norte del

Clase	Denominación
1	Texturas predominantemente gruesas (arenosas / areno-limosas)
2	Texturas medias a gruesas (Franco - arenosas)
3	Texturas medias (Franca)
4	Texturas finas a medias (Franco - arcillosas/ Arcillosas, etc.)
5	Cuerpos de agua, impermeables

Cuadro 6.7: Clases texturales definidas para el área de trabajo

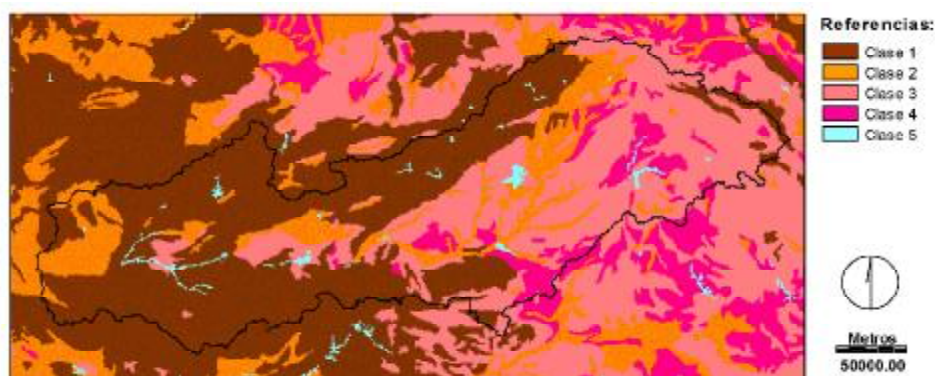


Figura 6.5: Principales clases texturales superficiales en el área de trabajo

Sistema Central, en Salamanca-Vitigudiño-Alba de Thormes, los suelos presentan un perfil A-C, asociado a un sustrato de material consolidado. Asimismo, en el caso de los suelos localizados en la zona de Atienza-Sigüenza, este mismo tipo de suelo se encuentra asociado a margas abigarradas del triás.

En la zona adyacente a la red fluvial principal, los suelos se han desarrollados sobre material no consolidado, con perfiles A-B-C y concentración de carbonato de calcio en su perfil. Dependiendo de lo abrupto de las pendientes, y del material originario, estos suelos engranan con otros de perfil somero A-C en laderas, o los desarrollados sobre materiales coluviales. Un caso destacable de esto se observa en el área de Guadalajara, en la zona de influencia de los ríos Tajuña y Henares. En este caso se encuentran los mayores valores regionales de conductividad hidráulica. Esta cualidad es directamente dependiente de la continuidad lateral de los materiales originales, y de la influencia de depósitos aluviales. En estos últimos, también cobra importancia la presencia o no de un nivel acuífero libre que afecte el perfil, generando problemas de drenaje interno.

La presencia de costras calizas es bastante común en esta región. Entre los casos más destacables a nivel regional se encuentran los suelos localizados en la zona de

Ocaña-Quintanar de la Orden, así como en Alcázar de San Juan, donde aparecen suelos de perfil A-B-C, afectados por la presencia de costras calizas en el horizonte C, y asociados lateralmente con suelos someros.

6.3.1.4. Cubierta del suelo

En líneas generales, la distribución espacial de los diferentes usos del suelo es coherente con la distribución de los suelos y la presencia de un relieve favorable para el fin productivo (Cuadro 6.8 y Figura 6.6).

Categoría	Detalle
1	Urbano, industrial, terrenos afectados por la actividad urbanística
2	Terrenos dedicados a la actividad agropecuaria, extensiva o intensiva
3	Terrenos ocupados principalmente por vegetación natural, monte, bosque, etc.
4	Marjales, Planicies intermareales, etc.
5	Cursos fluviales, estuarios, cuerpos de agua etc.

Cuadro 6.8: Principales categorías del uso del suelo, basado en la leyenda del inventario CORINE

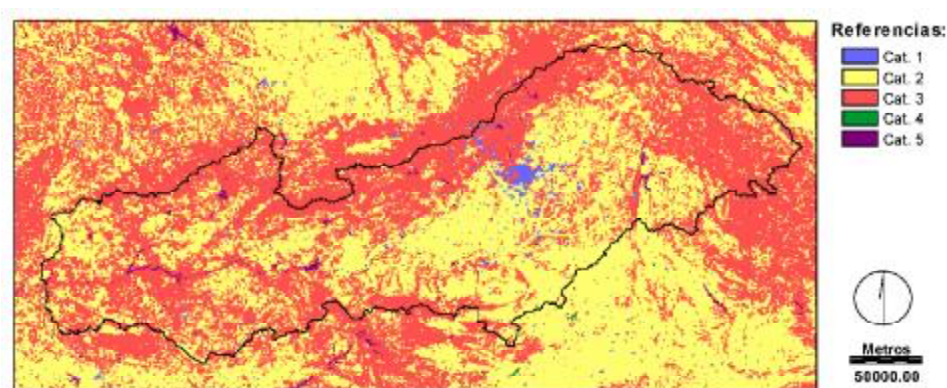


Figura 6.6: Distribución de las principales tipos de uso del suelo en el área de estudio

Los principales usos del suelo que se observan en la cuenca del Tajo son el de vegetación natural, con matorrales y bosque, el de las tierras de labor extensivas, las áreas de viñedos, los cultivos intensivos bajo riego y los pastizales. Analizando la evolución de los usos del suelo en España, en la memoria del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de España (1988), se indica que se nota el incremento del

regadío, la labor intensiva y la disminución de la superficie ocupada por el olivar y el viñedo. Por otra parte, la superficie no labrada experimentó un incremento sensible, entre otras causas por el abandono de tierras dedicadas antiguamente a sistemas agro-silvo-pastoriles. Finalmente, en este trabajo fue destacado el aumento respecto a inventarios anteriores de las áreas urbanizadas, industriales u ocupadas por vías de comunicación.

En la zona correspondiente al Sistema Central y Sierra de Toledo y Extremadura, la cubierta del suelo dominante es el bosque de esclerófilas y el de coníferas (y en menor medida de frondosas). Estas formaciones se encuentran distribuidas en toda la superficie de la unidad, siguiendo un patrón de pequeñas manchas, mas o menos uniformemente distribuidos en el paisaje. Lateralmente, las formaciones boscosas engranan con pequeñas zonas de praderas naturales y matorrales, formaciones vegetales que también se encuentran muy difundidos en toda la unidad estructural. Esta cubierta se puede asociar a pequeños sectores donde la topografía es localmente favorable para el desarrollo de explotaciones intensivas bajo régimen de secano. De la misma forma, a medida que se desciende en altitud, y se entra en contacto con terrenos más llanos, se observa la transición bosque-matorral. Acompañando a las formaciones forestales, se localizan las explotaciones agroforestales, la segunda categoría de explotación agrícola más frecuente en eseta zona. En la alineaciones situadas en entre Trujillo y Talavera de la Reina, sierras de Villurecas - Sierra de Valdecaso, etc. se observa un patrón de distribución similar, aunque dominando los matorrales sobre el bosque.

La zona de la *Depresión del Tajo y zona de Cobertera Sedimentaria* es predominantemente agrícola. Así, marcando el cambio de pendiente regional, al Sur del Sistema central se localizan amplias extensiones de cultivo extensivo, interrumpidos por zonas de regadío desarrolladas sobre la red fluvial principal y terrenos con matorrales. Este patrón es claramente observable sobre los ríos Jarama, Henares, Tajuña, y cauce principal del Tajo entre Aranjuez y Talavera de la Reina. Otras zonas de regadío de gran extensión son las que afectan a los ríos Tiétar y Alagón. Los terrenos de pastizal por una parte se encuentran ocupando terrenos de poca pendiente, rodeados de relieves más abruptos dentro del Sistema Central, o como la continuación lateral de las tierras de cultivo extensivo, en la zonas de Campo Arañuelo, cercanas a Navalmoral de la Mata, o en cercanías de Trujillo, en la parte Sur de la cuenca Inferior del Tajo. Las zona más notablemente ocupadas por viñedo se desarrolla al SO de Aranjuez, en dirección al Campo de Criptana. Estos terrenos se encuentran rodeados por terrenos con un patrón agrícola complejo, propio de los minifundios, que se extiende hacia el Norte, alcanzando a sectores cercanos a Illescas, al Norte del Tajo. Existen zonas ocupadas por matorrales en la zona de Guadalajara, y al Norte de Atienza, observándose la transición al bosque en los límites de esta unidad estructural con el Sistema Central, la sierra de Toledo y la Cordillera Ibérica,

En el caso de la *Cordillera Ibérica*, se observa el predominio claro del bosque de

coníferas, ocupando el terreno según un patrón denso, intercalado por pequeñas islas de bosque de esclerófilas y transición a matorral. Existen, intercalando a lo anterior, pequeñas áreas dominadas por la actividad agrícola, conviviendo con vegetación natural. Los bosques de especies de hoja ancha son, al igual que en el Sistema Central, minoritarios, asociados a posiciones concretas del paisaje. Hacia los bordes de la unidad se observa la transición bosque-matorral y la aparición más frecuente de terrenos de cultivo en secano.

6.3.2. Información utilizada

En este caso, los materiales empleados fueron los datos puntuales, información bibliográfica y cartográfica, referida a la zona de trabajo. La Tabla 6.40 expone los diferentes tipos de información cartográfica original, utilizada en función del tema tratado en el estudio.

Tipo de Información	Mapas	Formato y escala
Estructura geológica	Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares	Papel, escala 1:1.000.000
Unidades Hidrogeológicas	Mapa Hidrogeológico de España	Papel, escala 1:1.000.000
	Mapa Hidrogeológico Nacional	Papel, escala 1:1.000.000
Litología y Estratigrafía	Mapa Geológico de España	Papel, Escalas 1:1.000.000
Topografía	Modelo digital del terreno	Digital raster, píxel de 100*100 m.
Uso del suelo	Inventario CORINE	Digital raster, píxel de 250*250 m.
Tipos de suelos	Mapa de Suelos de España	Papel, escala 1:1000.000
	Mapa de Suelos de la Comunidad Europea	Digital vectorial

Cuadro 6.9: Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos

Existen deficiencias en el rango espacial de cubierta de la información utilizada. Excepto la información de suelos, la información cubre la totalidad de la superficie de la cuenca del Tajo. Por el contrario, el Mapa de Suelos de España (Guerra, 1966) cubre sólo la porción española de la cuenca del Tajo, tal como se puede comprobar en la Figura 6.4. En consecuencia, se diferencian dos regiones claramente expuestas en la Figura 6.7.

Así, el desarrollo del estudio de la tendencia espacial de las variables principales se ve reducido al sector de la cuenca donde existe la total cobertura de información. Los resultados serán posteriormente extrapolados en el sector donde la cobertura es parcial. Más adelante en esta misma sección se detalla este proceso.

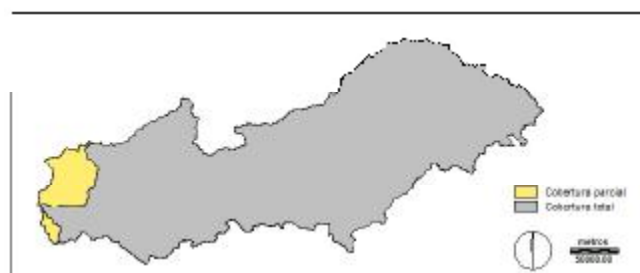


Figura 6.7: Regiones de información

Por otra parte, se contó con información hidrológica (pluviometría, niveles de embalse y aforos) a escala de evento, de tres subunidades de la Cuenca del Tajo: Alberche, Alagón y Henares, respectivamente (Figura 6.8). La selección de las localidades y de la información hidrológicamente coherente se llevó a cabo en una etapa previa a este estudio.

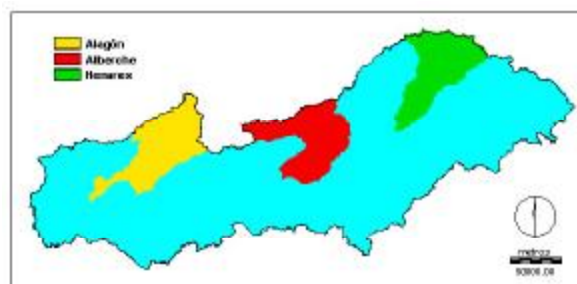


Figura 6.8: Unidades hidrológicas analizadas en este trabajo

6.3.3. Variables empleadas

6.3.3.1. Variables principales

Las variables principales fueron expresadas como variables continuas (Cuadro 6.10).

Los valores de las variables principales fueron deducidos a partir de la información contenida en la leyenda del Mapa de Suelos de España (Guerra, 1968) y del Mapa de Suelos de la CE (1985).

A partir de los resultados obtenidos a través de la aplicación de las funciones de pedotransferencia, se pudo elaborar un mapa de valores modales para cada

Denominación	Escala	Fuente
Conductividad hidráulica del suelo (Ks)	Cuantitativa	Mapa de suelos de España
Conductividad hidráulica del sustrato del suelo (Kp)	Cuantitativa	Mapa de suelos de España
Capacidad de almacenamiento hídrico (Hu)	Cuantitativa	Mapa de suelos de España

Cuadro 6.10: Detalle de las variables principales, y su forma de expresión

una de las variables principales analizadas y evaluar a priori la estructura de su distribución espacial (Figura 6.10).

Los mapas expuestos permiten observar que, a causa de la escala de la información utilizada, los valores modales de Hu , Ks y Kp se distribuyen en el terreno a través de un número no muy grande de unidades cartográficas. Sin embargo, el patrón de distribución destaca las características más importantes de la cuenca, tanto la red de drenaje principal como la presencia de zonas con diferente morfología de relieve, tal como se destacó en la descripción previa de la cuenca, en este capítulo.

Los tres mapas indican la presencia de una tendencia en los valores que es común para las tres variables principales. Esta tendencia evoluciona en sentido Este-Oeste. La misma se manifiesta por el aumento paulatino de los valores de Hu , Ks y Kp , en términos generales, desde las cabeceras orientales hacia la zona de cuenca inferior, cercana a la frontera con Portugal.

Asociado a la evolución de los valores de las variables principales se observa la influencia del relieve y de la red hidrográfica principal. Así, se observa el efecto de la presencia de relieves de importancia en las divisorias Norte y Sur sobre los valores modales.

La red de drenaje juega un papel clave en la distribución de los valores modales de las variables principales. Su desarrollo, aunque con matices, se destaca en los tres mapas señalados en la figura.

Complementariamente a lo anterior, la distribución de los valores modales de las variables principales pueden ser analizada a partir de su distribución de frecuencias de los valores asignados a cada uno de los píxeles en los que se dividió el terreno analizado.

La Figura 6.9 señala los resultados obtenidos. Los mismos indican la concentración de la mayor cantidad de píxeles dentro de unas pocas categorías de valores. Tal es la característica de la distribución de valores modales por medio de unidades cartográficas, en mapas de alto grado de generalización.

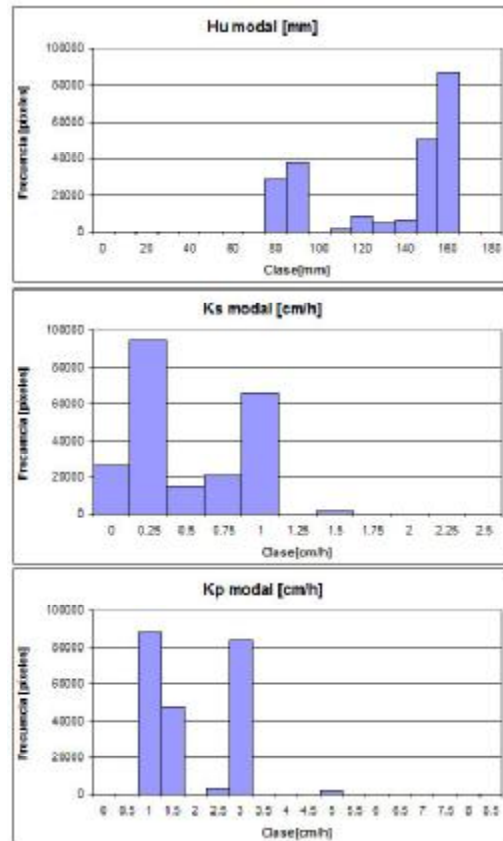


Figura 6.9: Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales

Finalmente, analizando histogramas y mapas de forma conjunta, queda claro que se observa tendencia a la homogeneidad de valores, la cual se incrementa particularmente en la parte baja de la cuenca, en comparación con lo observado en el resto de la misma.

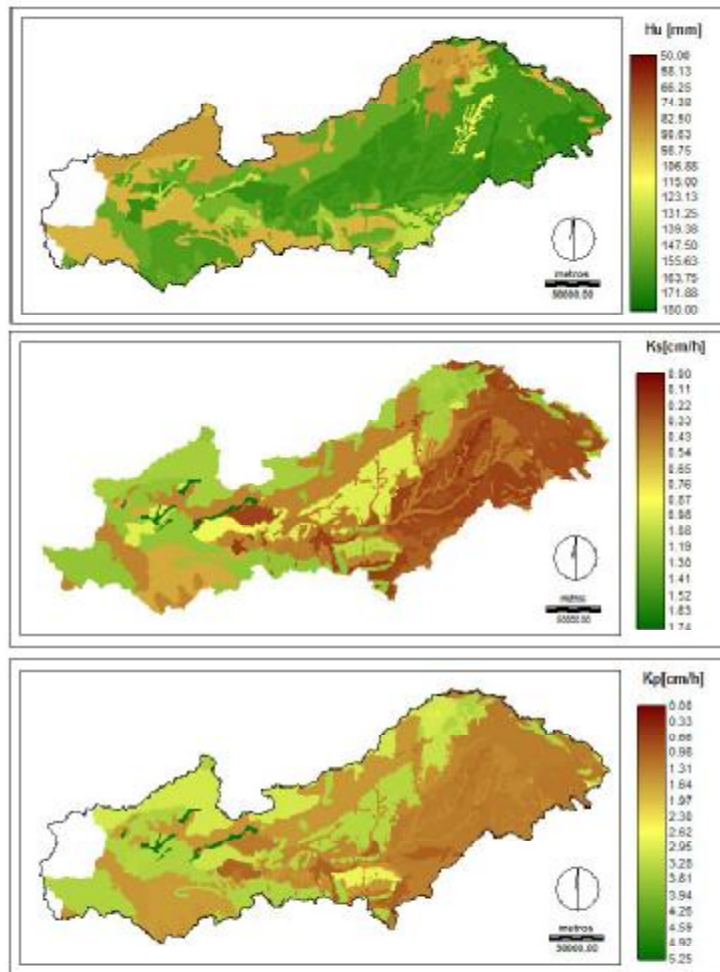


Figura 6.10: Valores modales En la cuenca del Tajo

Los variogramas omnidimensionales expuestos en la Figura 6.11 indican que la información utilizada representa con claridad la existencia de una estructura de distribución espacial definida para los valores modales de las variables principales analizadas. El Cuadro 6.11 señala que el modelo ajustado los tres casos analizados fue el exponencial. En estos casos, a medida que se analizan distancias de separación mayores entre muestras, los valores del variograma se aproximan de forma asintótica a un valor máximo. Esta forma particular es representada por una sencilla función exponencial. Este es un tipo de ajuste que ya ha sido mencionado para el caso de diferentes propiedades del suelo (Webster y Oliver, 1990).

Esta función es:

$$\gamma(h) = c0 + c\{1 - \exp(-h/a)\} \tag{6.2}$$

donde:

$c0$: valor mínimo inicial (“efecto pepita”).

c : factor de escala.

a : factor de forma.

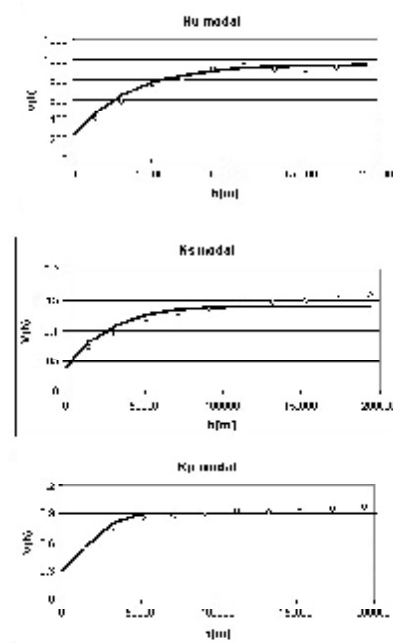


Figura 6.11: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidimensionales

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu modal	Exponencial	200	700	80000
Ks modal	Exponencial	0.03	0.114	70000
Kp modal	Exponencial	0.35	0.65	90000

Cuadro 6.11: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales

De la misma forma que la cuenca en su totalidad, la estructura espacial de los valores modales fue analizada en las tres sub-unidades hidrológicas que posteriormente fueron utilizadas en la etapa de modelación hidrológica (Figuras 6.12, 6.13 y 6.14, respectivamente).

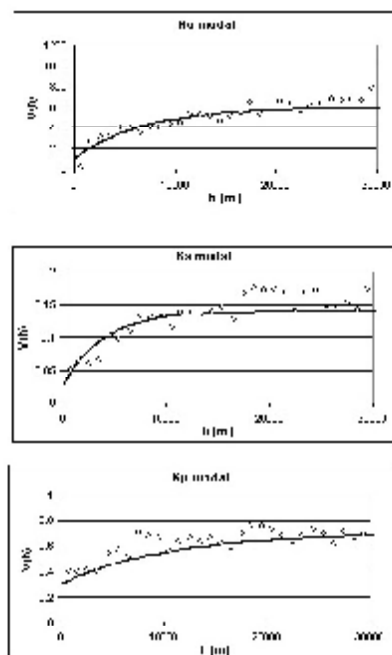


Figura 6.12: Estructura espacial de los parámetros analizados en la sub-unidad Alagón. Variogramas omnidimensionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	100	500	20000
Ks modal	Exponencial	0.03	0.11	12000
Kp modal	Exponencial	0.3	0.4	30000

Cuadro 6.12: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Alagón

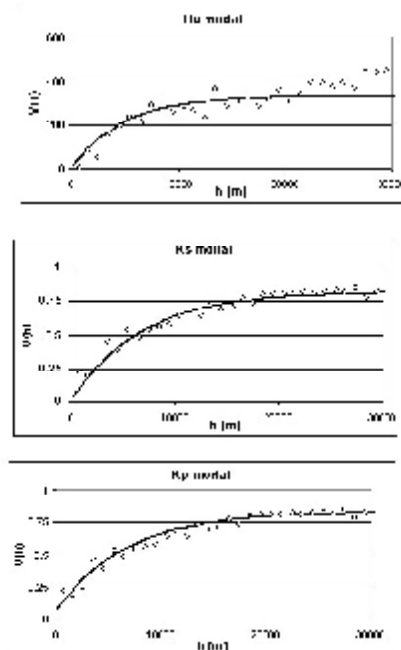


Figura 6.13: Estructura espacial de los parámetros analizados en la cuenca Alberche. Variogramas omnidimensionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	10	325	15000
Ks modal	Exponencial	0.2	0.8	20000
Kp modal	Exponencial	0.4	0.75	20000

Cuadro 6.13: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Alberche

En todos los casos analizados el modelo que mejor ajustó a los variogramas experimentales fue el exponencial (Cuadros 6.12, 6.13 y 6.14, respectivamente). Los parámetros de calibración varían según el caso analizado. Sin embargo el conjunto guarda una coherencia global en cuanto al rango de variabilidad de los factores de forma y escala de los ajustes, diferenciándose a su vez en función de la variable analizada.

Es posible observar a simple vista dos características significativas. La primera es que en cada una de los variogramas experimentales es típico de cada cuenca, pudiéndose observar que su curvatura, en general, es similar en cada cuenca y diferente a los demás casos. En segundo lugar, tal curvatura, dada por el valor de a y c , varía progresivamente a medida que se atraviesa la cuenca según el rumbo Este-Oeste.

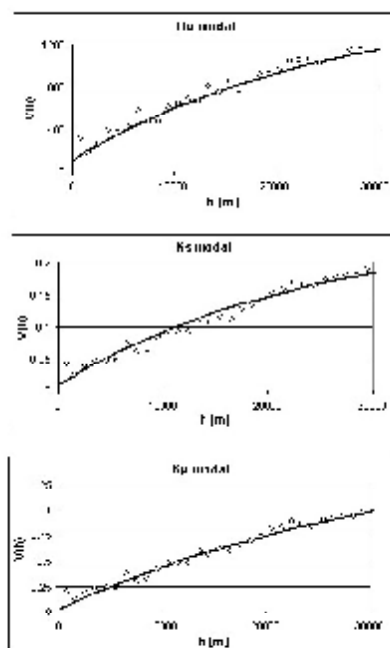


Figura 6.14: Estructura espacial de los parámetros analizados en la sub-unidad Henares. Variogramas omnidimensionales

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu modal	Exponencial	100	1500	75000
Ks modal	Exponencial	0.01	0.25	75000
Kp modal	Exponencial	0.3	1.6	100000

Cuadro 6.14: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales en la sub-unidad Henares

Una vez analizada su distribución espacial, se analizó la distribución de frecuencias de los valores modales, independientemente de su localización.

A partir de lo anterior, las variables principales fueron transformadas para permitir que sus valores se distribuyan más simétricamente alrededor de un valor medio (Cuadro 6.15).

Variable	Transformación
Conductividad hidráulica del suelo	Logaritmo natural
Conductividad hidráulica del sustrato del suelo	Logaritmo natural
Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo	Raíz cuadrada

Cuadro 6.15: Transformaciones aplicadas a las variables principales

6.3.3.2. Variables ambientales

Las variables ambientales fueron procesadas previamente, a fin de que fueran expresadas en escalas continuas normalizadas o como variables indicadoras, respectivamente.

Las variables indicadoras se generaron al aplicar sobre la información cartográfica un criterio de clasificación excluyente, dividiéndolas en dos únicas categorías.

El cuadro 6.16 señala la información utilizada para elaborar cada una de éstas. Cada una de estas variables fue elaborada de forma tal que represente los contrastes más claros y relevantes entre los valores de conductividad hidráulica saturada, dentro del área estudiada (Cuadro 6.17). De esta forma, los elementos que no pertenecen a una clase fueron incluidas, por defecto, en la restante.

Las diferentes categorías fueron determinadas a priori basándose en la información auxiliar, y su validación se realizó comprobando las diferencias en los valores medios de conductividad hidráulica en cada una de ellas. De no considerarse suficiente las diferencias entre valores, el proceso se volvió a repetir hasta lograr el objetivo.

Denominación	Cuantitativa		Var. muda
	(Normalizada)	(Val. originales)	
Conductividad hidráulica superficial del suelo	No	Si	No
	Fuente: Mapa de suelos de CEE		
Capacidad de almacenamiento superficial del suelo	No	Si	No
	Fuente: Mapa de suelos de CEE		
Dominios estructurales	No	No	Si
	Fuente: Mapa Tectónico de Península Ibérica y Baleares		
Unidades hidrogeológicas	No	No	Si
	Fuente: Mapa Hidrogeológico de España		
Unidades estratigráficas	No	No	Si
	Fuente: Mapa Geológico de España		
Densidad de fracturación	No	No	Si
	Fuente: Mapa Geológico de España		
Uso del suelo I	No	No	Si
	Fuente: Inventario CORINE		
Uso del suelo II	No	No	Si
	Fuente: Inventario CORINE		
Red fluvial principal	No	No	Si
	Fuente: MED		
Altimetría	Si	No	No
	Fuente: MED		
Pendiente topográfica	Si	No	No
	Fuente: MED		
Orientación de la pendiente	No	No	Si
	Fuente: MED		
Curvatura del relieve	Si	No	No
	Fuente: MED		
Índice topográfico	Si	No	No
	Fuente: MED		

Cuadro 6.16: Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión. Ref. MED: Modelo de Elevación Digital

Variable	(Dummy = 1)	(Dummy = 0)
Dominios estructurales	Cordillera Ibérica, Cobertera terciaria no deformada	Cordillera Central, Montes de Toledo y Extremadura
	Criterio: Destacar las zonas de mayor y menor movilidad geomórfica y estructural regional	
Unidades hidrogeológicas	Formaciones carbonatadas con permeabilidad secundaria y desarrollo de karst	Formaciones no afectadas por procesos de karst
	Criterio: Destacar las zonas afectadas por procesos de karst	
Estratigrafía	Silúrico - Triásico medio	Bloque hercínico, Triásico superior - Reciente
	Criterio: Destacar la presencia de materiales no clásticos no asociados con el bloque hercínico	
Densidad de fracturación	Unidades cartográficas de litología afectadas claramente por fracturación regional, o adyacentes a zonas de fractura regional.	Unidades cartográficas no afectadas directamente o adyacente a zonas de fracturación regional
	Criterio: Destacar la presencia de materiales fracturados o fisurados, o cercanos a zonas de fracturación regional; independientemente de su naturaleza y grado de consolidación	
Uso del suelo I	Zonas agroforestales, Bosque, pradera natural, páramos, monte de esclerófilas, transición bosque-monte.	Zonas no afectadas ni por monte ni bosque
	Criterio: selección de los usos del suelo asociados a tipos contrastados de terrenos y de cubierta vegetal	
Uso del suelo II	Zonas urbanas, industriales, etc.; suelos cultivados, bajo riego o secano, viña y olivar.	Zonas no afectadas directamente por el uso humano del suelo
	Criterios: Destacar las zonas con mayor o menor impacto directo del hombre sobre el suelo.	
Red de drenaje	Menos de 247 celdas acumuladas	Más de 247 celdas acumuladas
	Criterio: destacar los terrenos que poseen el mayor desarrollo de la red fluvial	
Orientación de las pendientes	Acimut = (270 - 360; 0 - 90)	Zonas llanas y/o con Acimut = (90-270)
	Vertientes con diferente exposición a las precipitaciones y con grados de insolación contrastados	

Cuadro 6.17: Criterios de separación en variables indicadoras

6.3.4. Resultados de la estimación de parámetros

El análisis de la tendencia regional se realizó utilizando un total de 99 UCMS, obteniéndose una ecuación de ajuste diferente para cada variable principal. La Figura 6.15 indica la distribución espacial de los resultados, el Cuadro 6.18, el Cuadro 6.19 y el Cuadro 6.20 detallan las variables utilizadas y los coeficientes de las ecuaciones de ajuste.

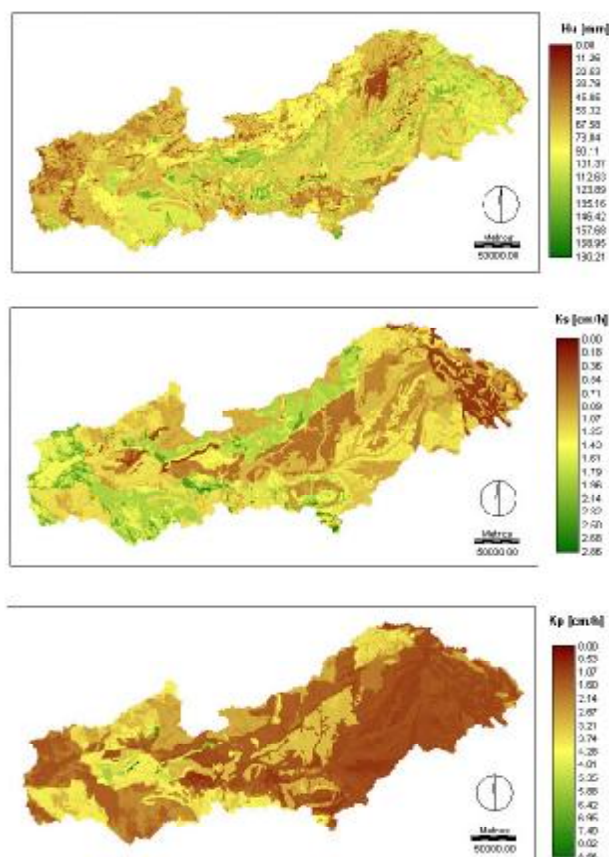


Figura 6.15: Estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico y conductividades hidráulicas en la cuenca del Tajo

Tal como ya se adelantó, los ajustes elaborados fueron los empleados para la elaboración de la estimación distribuida en el sector de la cuenca con total cobertura de información. Los mismos fueron a su vez, utilizando para estimar por extrapolación los valores distribuidos de las variables ambientales en los sectores donde

la cobertura de información era parcial. Dada la manifiesta tendencia observada en los valores modales, observación ya destacada en páginas anteriores, los valores modales medios de las variables principales en este sector necesarios para resolver la ecuación 5.9 (y^e) fueron estimados como la media ponderada de las unidades cartográficas más cercanas.

Los resultados indican que los ajustes obtenidos logran reproducir de forma precisa la variabilidad espacial del terreno, tanto en el caso de las conductividades hidráulicas como en el caso de la capacidad de almacenamiento hídrico.

Estimación de $SQRT(Hu)$	
Variable	β
Constante	1.0
Variables continuas	
Índice topográfico	16.7397
Altimetría	11.7023
Capacidad de almacenamiento en la sección más superficial de suelo	-0.284837
Variables discretas	
Dominio estructural	3.41858
Tectónica	463.26
Uso del suelo II	1.14682
Uso del suelo I	2.37901
Orientación de las laderas	0.395216
Interacción entre variables discretas	
Dominio estructural * Densidad de Fracturación	1.57521
Dominio estructural * Uso del suelo II	-1.14492
Dominio estructural * Uso del suelo I	-3.09165
Unidades hidrogeológicas * Densidad de Fracturación	0.761118
Estratigrafía * Densidad de Fracturación	-1.34255
Estratigrafía * Uso del suelo I	0.620503
Estratigrafía * Orientación de las laderas	-0.488308
Uso del suelo II * Red de drenaje	0.153251

Cuadro 6.18: Detalle del ajuste obtenido para la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo

Observando las variables ambientales necesarias para explicar la distribución espacial de Hu , Ks y Kp , se deduce que existen dos grupos claramente diferenciados: las variables ambientales que explican la distribución de Hu y las que explican la distribución de Ks y Kp .

En el caso de Hu , existen variables ambientales claramente significativas dado por la frecuencia en que participan en el ajuste, en diferentes interacciones. La

topografía, el desarrollo de la red de drenaje, el uso del suelo indicador de actividad humana, la tectónica y la estratigrafía permiten definir con gran precisión la distribución espacial de esta variable principal.

Resulta importante destacar que para explicar la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo se utilizan variables de significado regional, como la estructura tectónica hasta variables continuas, que señalan los pequeños cambios locales, como el índice topográfico.

Estimación de $\ln(Ks)$	
Variable	β
Constante	-0.0397254
Variables continuas	
Curvatura del paisaje	1.99823
Capacidad de almacenamiento en la sección más superficial de suelo	-0.0607353
Variables discretas	
Dominio estructural	0.204102
Estratigrafía	-0.216878
Uso del suelo I	0.21483
Interacción entre variables discretas	
Dominio estructural * Uso del suelo I	-0.206241
Unidades hidrogeológicas * Densidad de Fracturación	-0.0975144
Estratigrafía * Uso del suelo II	0.0697406

Cuadro 6.19: Detalle del ajuste obtenido para la conductividad hidráulica del suelo

Analizando los resultados de la estimación de Ks y Kp , se observa con claridad que existe un conjunto de variables ambientales que explican el patrón espacial de ambas variables principales. La curvatura del paisaje es la primera.

En el caso de la cuenca del Tajo, los valores de Ks y Kp están estrechamente relacionados entre sí, y que los mismos se explican por medio de tres componentes claramente diferenciadas: contexto geológico, uso del suelo y relieve local. Los valores de β en ambos casos son similares. La diferencia más clara entre ambas estimaciones es la inclusión de la interacción entre la estructura tectónica regional y el tipo de unidades hidrogeológicas dominantes, en el caso de la estimación de Kp . Esto es comprensible, ya que los valores de esta variable principal guardan una relación clara con la componente geológico-estructural del terreno.

Finalmente, al observar el valor de los distintos coeficientes de ajuste, se puede comprobar que las variables ambientales relacionadas con la morfología del terreno (índice topográfico, hipsometría, etc.) tienen un peso determinante en la obtención del ajuste. De la misma forma, la estructura tectónica, la estratigrafía y el uso del

suelo son las variables indicadoras que con más frecuencia figuran en los ajustes. En cuanto a las interacciones, la más destacada es la que relaciona a la estructura tectónica y la estratigrafía con el uso del suelo y las características del relieve local, como la orientación de las laderas y el desarrollo de la red de drenaje.

Estimación de $\ln(Kp)$	
Variable	β
Constante	0.0454265
Variables continuas	
Curvatura del paisaje	1.99214
Capacidad de almacenamiento en la sección más superficial de suelo	-0.0731801
Variables discretas	
Dominio estructural	0.166137
Estratigrafía	-0.220281
Uso del suelo I	0.204221
Interacción entre variables discretas	
Dominio estructural * Unidades hidrogeológicas	-0.0400235
Dominio estructural * Uso del suelo I	-0.192135
Unidades hidrogeológicas * Densidad de Fracturación	-0.0774675
Estratigrafía * Uso del suelo II	0.0605349

Cuadro 6.20: Detalle del ajuste obtenido para la conductividad hidráulica del sustrato del suelo

Lo destacado en el caso del ajuste de Hu se extiende para el caso de Ks y Kp . Así, más allá de las particularidades propias de cada caso analizado, el análisis muestra con claridad que *para lograr un ajuste aceptable de las variables principales, es necesario contar con variables tanto de significado regional, como local y con las interacciones entre ambas*. El conjunto de variables debe abarcar tres temas concretos: geología, uso del suelo y relieve local.

La información geológica permite definir el sentido general de los gradientes naturales que afectan a la génesis de suelos, tanto en lo que respecta al relieve de gran escala, como el tipo de materiales aflorantes y la definición del rol del subsuelo en el ciclo hidrológico de la región.

Así, el uso del suelo resulta de utilidad como indicador de las cualidades y características hidrológicas del terreno. Tal definición se basa en la idea que, en términos globales, la actividad humana tiende a afectar en primer lugar aquellas áreas que le son más favorables por sus condiciones de suelos, relieve, hidrología, etc, dejado en un segundo lugar aquellas que no cumplen con estos requisitos.

Por último, el relieve local permite mejorar el ajuste aportando la información necesaria para adaptar los gradientes generales deducidos con las variables mencionadas anteriormente a las condiciones del terreno para una escala de mayor detalle.

6.3.5. Análisis de la precisión en las estimaciones

En primer lugar, el Cuadro 6.21 señala el valor del coeficiente de determinación para las tres variables principales. En todos los casos, se comprueba que el ajuste logra explicar de forma altamente precisa la variabilidad espacial de las tres variables principales analizadas

Variable principal	R^2
Capacidad de almacenamiento hídrico	99.18 %
Conductividad hidráulica del suelo	98.32 %
Conductividad hidráulica del sustrato	98.45 %

Cuadro 6.21: Precisión de los ajustes realizados

La evolución de los valores de R^2 a medida que se agregaron las diferentes variables ambientales a la estimación puede observarse en los cuadros 6.22, 6.23 y 6.24 y en la Figura 6.16. En éstos se expone el orden en que han sido ingresadas cada una de las variables ambientales al ajuste de las variables principales, junto con el valor del coeficiente de determinación y el error cuadrático medio (ECM) que se genera por este ingreso.

En el caso de Hu el ingreso de las primeras nueve variables ambientales provoca un rápido ascenso del valor de R^2 , y el descenso del ECM. Tales variables son, en cada caso, representantes tanto de la geología regional como de la topografía local.

La primer variable en ser admitida en el ajuste es una variable indicadora. Las variables indicadoras cuyos temas se refieren al entorno geológico, son las primeras en ser asimiladas en el ajuste. El uso del suelo es un tema que ingresa en el ajuste como variable indicadora en el cuarto y en el noveno orden. Además, está presente en diferentes interacciones desde las primeras etapas del ajuste. En el conjunto de las variables continuas, se destaca la altimetría, que ingresa en el sexto lugar en el ajuste.

La interacción que mayor efecto provoca sobre el ajuste de Hu es la que relaciona a la estructura tectónica con las zonas de terreno afectadas por la actividad urbanizadora. Ésta destaca por una parte los terrenos sedimentarios de menor gradiente y con rellenos sedimentarios más afectados por la actividad humana de las zonas estructuralmente más destacadas, con desarrollo de elevaciones (sierras, montes ,etc.) y afectadas en menor grado por la actividad humana.

En ambos casos, resulta claro deducir que los suelos que se encuentren serán diferentes, al menos en lo que respecta a su almacenamiento hídrico.

Variable	Orden	R^2	ECM
Índice topográfico	1	64.66	7.87E+07
Dominio estructural	2	80.96	4.33E+07
Dominio estructural vs Uso del suelo II	3	83.49	3.79E+07
Uso del suelo I	4	87.82	2.83E+07
Tectónica	5	89.27	2.52E+07
Altimetría	6	93.11	1.64E+07
Dominio estructural vs Tectónica	7	96.10	9.26E+06
Unidades hidrogeológicas vs Tectónica	8	96.71	7.88E+06
Uso del suelo II	9	97.35	6.42E+06
Dominio estructural vs Uso del suelo II	10	98.28	4.21E+06
Estratigrafía vs Tectónica	11	98.6	3.48E+06
Estratigrafía vs Uso del suelo I	12	98.93	2.70E+06
SQRT(Hu) según Mapa de CE	13	98.98	2.58E+06
Estratigrafía vs Orientación del terreno	14	99.02	2.51E+06
Orientación del terreno	15	99.17	2.16E+06
Uso del suelo II vs Red de drenaje	16	99.18	2.15E+06

Cuadro 6.22: Evolución del ajuste de SQRT(Hu)

En el caso de Ks , la evolución del R^2 es también elevado a partir de las primeras variables incorporadas al ajuste. Éstas son fundamentalmente, la curvatura topográfica, la estratigrafía y el uso del suelo.

A diferencia del caso anterior, la primer variable en ser ingresada en el ajuste de Ks es continua: la curvatura del terreno. A partir de ésta son ingresadas variables relacionadas al entorno geológico y, en menor medida el uso del suelo. En el conjunto de variables relacionadas a temas geológicas, es la estratigrafía la que provoca un mayor aumento del R^2 .

Igual que en el caso de Hu , la interacción más importante es la que relaciona la tectónica y uso del suelo. Otra interacción importante es la que relaciona la presencia de fracturación en los materiales geológicos y el desarrollo de unidades hidrogeológicas. En este caso, la relación destaca la características del terreno afectado por acuíferos sedimentarios respecto a los acuíferos de menor extensión y afectados por una estructura tectónica de fracturación y materiales consolidados. Tales relaciones destacan las diferencias que necesariamente existirán en el desarrollo de los suelos, lo cual se refleja en sus características y cualidades hidrológicas.

Variable	Orden	R^2	ECM
Curvatura topográfica	1	75.8	832377
Estratigrafía	2	87.98	418278
Uso del suelo I	3	90.82	317206
Dominio estructural vs Uso del suelo I	4	95.07	175070
Dominio estructural	5	96.6	122162
Estratigrafía vs Uso del suelo II	6	97.56	88639.6
Unidades hidrogeológicas vs Tectónica	7	97.9	75415.5
SQRT(Hu) según Mapa de CE	8	98.32	62314.8

Cuadro 6.23: Evolución del ajuste de $\ln(K_s)$

Variable	Orden	R^2	ECM
Curvatura topográfica	1	75.83	832377
Estratigrafía	2	87.99	411409
Uso del suelo I	3	90.84	317206
Dominio estructural vs Uso del suelo I	4	95.20	168011
Unidades hidrogeológicas vs Tectónica	5	96.87	110505
Estratigrafía vs Uso del suelo II	6	97.39	93194.2
Dominio estructural	7	97.73	81907.9
SQRT(Hu) según Mapa de CE	8	98.19	66274.2
Unidades hidrogeológicas vs Tectónica	9	98.45	57347.6

Cuadro 6.24: Evolución del ajuste de $\ln(K_p)$

Finalmente, en el ajuste de K_p se repiten las mismas características observadas en los casos anteriores: tectónica, uso del suelo y las características locales del relieve.

Como ya se destacó, las variables son prácticamente las mismas que fueron utilizadas en el ajuste de K_s . El orden en que éstas son ingresadas en el ajuste es el mismo en el caso de las cuatro primeras variables. A partir de allí se observa un ligero cambio en el orden de entrada.

En esta variable principal, la fracturación dentro de la definición de interacciones toma particular importancia en el rápido crecimiento de R^2 .

La evolución de los valores de R^2 , junto con el ECM son expuestos en la Figura 6.16 en relación a la cada una de las etapas en las cuales se ingresaron las variables en el ajuste. Se pudo comprobar que el aumento en el grado de explicación de los ajustes aumento rápidamente en las primeras etapas, tomando una clara disminución en la tasa de cambio a partir del 75% de R^2 . A pesar de esta disminución en el crecimiento, el ECM continúa disminuyendo en forma rápida. Esta medición del error disminuye drásticamente su evolución recién a partir de la octava etapa en el caso de la estimación de Hu , y de la cuarta o quinta etapa en el caso de las conductividades hidráulicas.

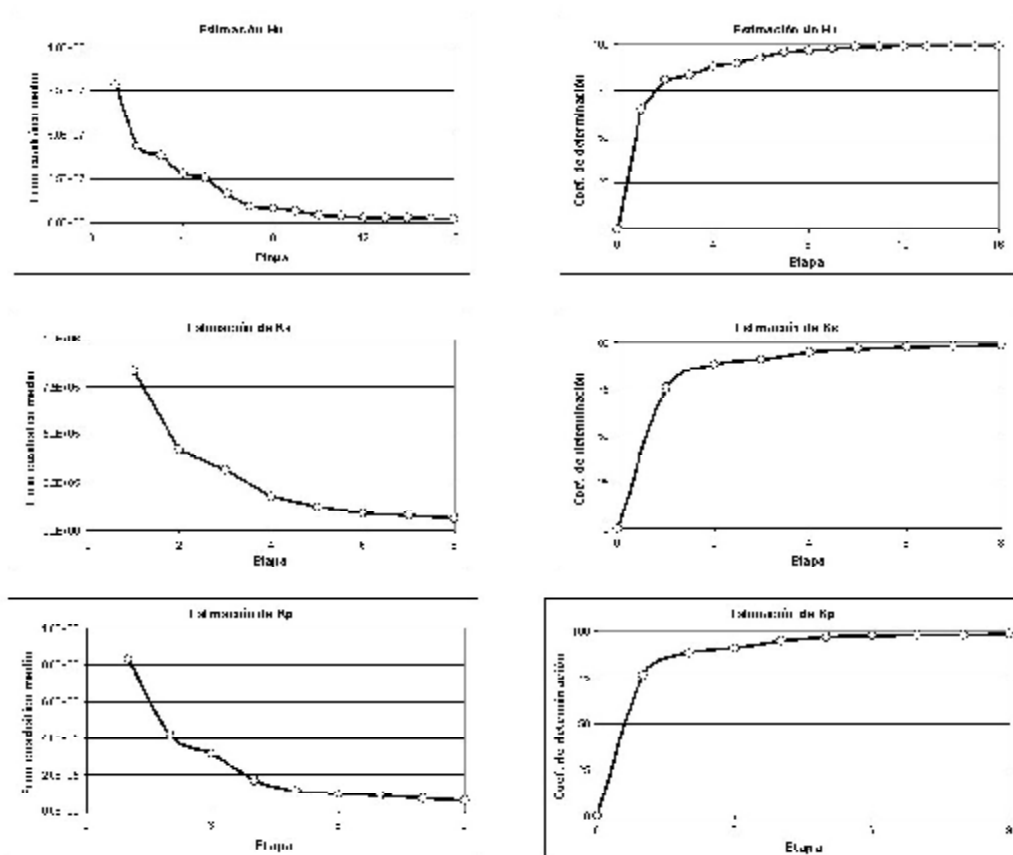


Figura 6.16: Evolución de los ajustes según R^2

La distribución de los residuales se expone en la Figura 6.17. En la parte izquierda del mismo está el valor de los residuales en relación al valor predicho de la variable principal analizada. Ésta es una forma comúnmente utilizada en la literatura técnica para el análisis de ajustes. En la parte derecha, cada uno de los residuales obtenidos en los 99 valores utilizados para los ajustes de las variables principales se graficaron en función del peso utilizado para el ajuste de cada uno de los valores analizados.

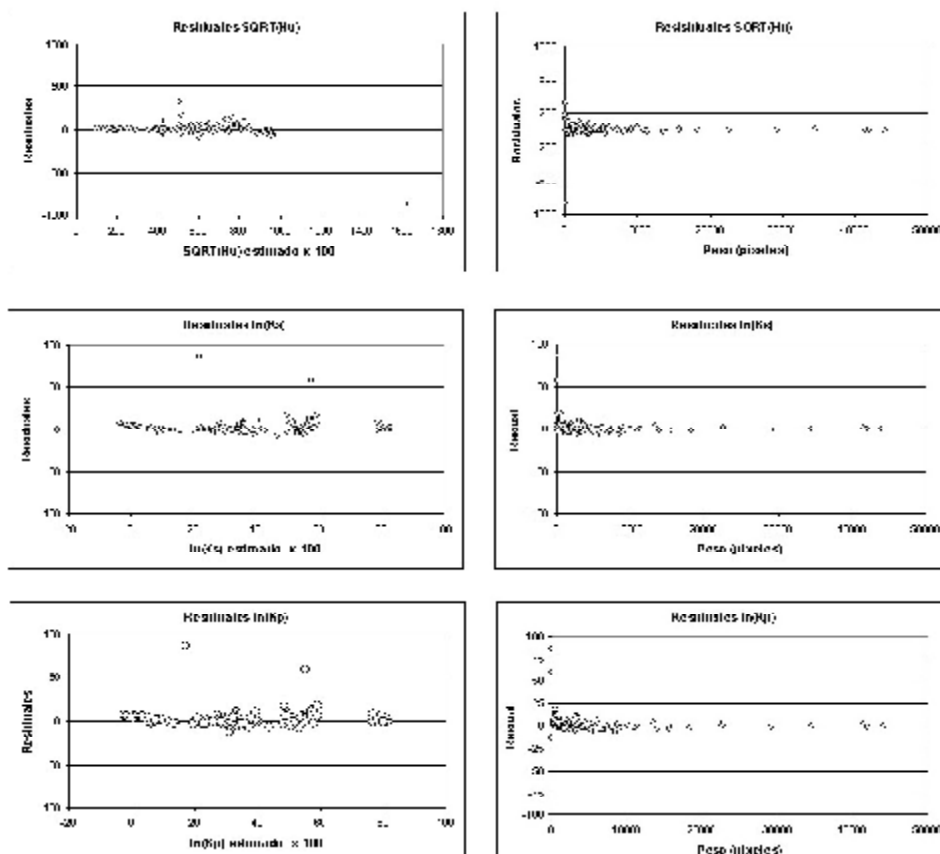


Figura 6.17: Residuales

En el análisis tradicional de residuales puede observarse con claridad que, a excepción de unos pocos casos, la gran mayoría de los valores utilizados en los ajustes generaron residuales reducidos, en todo el rango de la variable estimada, alrededor del cero para el eje x . Se concluyó, pues, que el grado de ajuste fue completamente satisfactorio.

Complementariamente a lo anterior, al comparar el valor de los residuales en relación con el valor del factor de ponderación utilizado se puede comprobar que a medida que el valor del factor de ponderación aumenta, se observa una drástica reducción en el valor de los residuales. Tal observación permite afirmar que los valores residuales mayores se generan en aquellos casos excepcionales y aislados, representados por factores de ponderación muy pequeños. En otras palabras, se puede afirmar que los residuales que se generen no representan a los casos de mayor importancia de los que fueron utilizados en cada ajuste. Tal observación permite comprobar que el proceso de ponderación se realizó correctamente.

Una evidencia clara de los efectos de la distribución celda a celda de los valores de las variables principales puede observarse en la Figura 6.18. En la misma, por comparación a lo expuesto en la Figura 6.9 se puede comprobar que los resultados del proceso de estimación propuesto generan histogramas en los cuales la distribución de frecuencias es también claramente más armónica. Esto se destaca con claridad del caso donde los valores modales son distribuidos mediante unidades cartográficas.

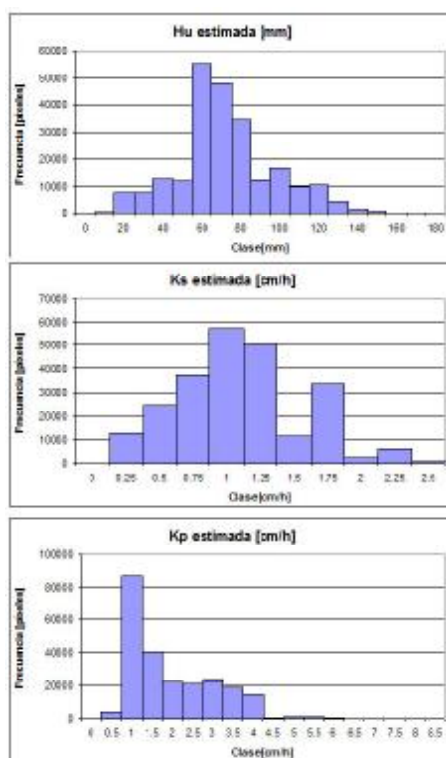


Figura 6.18: Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales

La Figura 6.19 expone los resultados de los variogramas experimentales para la totalidad de la cuenca del Tajo. En éstos se comprueba, en primer lugar, la continuidad espacial de los valores obtenidos por el método de estimación desarrollado en esta Tesis. Comparando lo resultados del Cuadro 6.25 con los del Cuadro 6.11 se puede comprobar que los parámetros de ajuste en uno y otro caso son similares. Lo dicho se traduce en que la forma de los modelos ajustados los variogramas experimentales guardan una fuerte similitud entre sí.

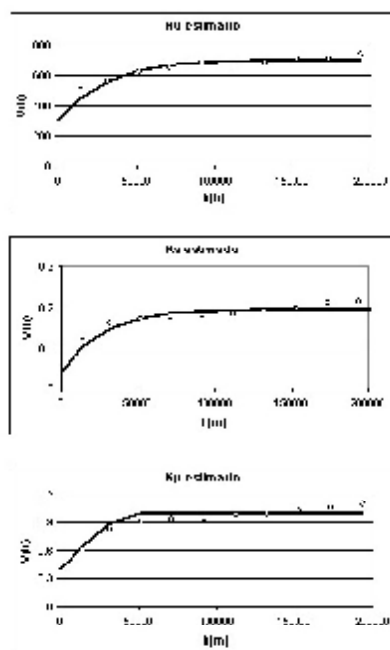


Figura 6.19: Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Tajo. Variogramas omnidimensionales

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu estimado	Exponencial	300	400	80000
Ks estimado	Exponencial	0.05	0.14	70000
Kp estimado	Exponencial	0.35	0.65	90000

Cuadro 6.25: Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Tajo

En el caso de la estimación de Hu , Ks y Kp en diferentes subunidades hidrológicas de la cuenca del Tajo (figuras 6.20, 6.21 y 6.22, se observan resultados similares los observados en el caso anterior.

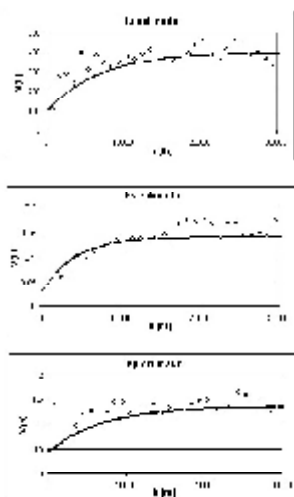


Figura 6.20: Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alagón. Variogramas omnidimensionales

Tal como se había observado previamente en el caso de los valores modales, los variogramas experimentales realizados sobre las estimaciones de las variables principales señalan que cada sub-unidad hidrológica conserva su propia estructura de distribución espacial, guardando coherencia con lo observado a nivel global. La comparación de los cuadros 6.26, 6.27 y 6.28 con los correspondientes a los valores modales (cuadros 6.12, 6.13 y 6.14, respectivamente) es reveladora.

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu estimado	Exponencial	100	300	20000
Ks estimado	Exponencial	0.03	0.11	12000
Kp estimado	Exponencial	0.45	0.9	20000

Cuadro 6.26: Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alagón

Comparando los resultados, para la cuenca del Alagón, las mayores diferencias entre los parámetro de modelación se observan en el caso de la estimación de Kp , tanto en el valor de $C0$ (0.3 y 0.45, respectivamente), como en el del factor de escala

(0.4 y 0.9 respectivamente) y en el valor del factor de forma varía entre 30000 y 20000, según el tipo de información analizada. Otra diferencia se puede reportar en el caso de la estimación de Hu , donde difieren fundamentalmente en el factor de escala (500 y 300 en cada caso)

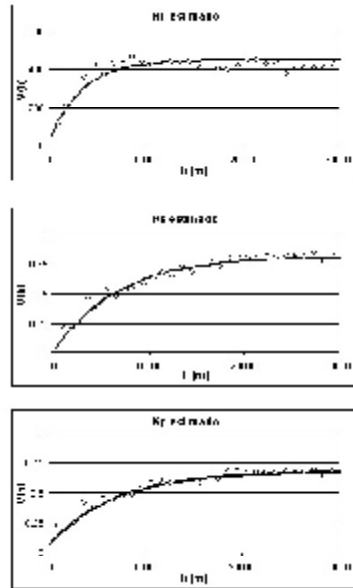


Figura 6.21: Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Alberche. Variogramas omnidimensionales

En el caso de la cuenca de Alberche, las diferencias más notables se encuentran en el caso de la estimación de Hu , donde el coeficiente $c0$ varía entre 10 y 50, el coeficiente de escala varía entre 325 y 400 y el coeficiente de forma entre 15000 y 10000, según el caso analizado.

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu estimado	Exponencial	50	400	10000
Ks estimado	Exponencial	0.02	0.8	20000
Kp estimado	Exponencial	0.08	0.6	20000

Cuadro 6.27: Ajuste de los variogramas de los valores de estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Alberche

Finalmente, en el caso del ajuste en la sub-unidad correspondiente a la cuenca del Henares, las mayores diferencias que se encuentran respecto a los variogramas ajustados a partir de la información modal se encuentran en los casos de las estimaciones de Hu y Ks . En el primer caso los valores de $c0$ varían entre 100 y 200, el coeficiente de escala varía entre 1500 y 550 y el coeficiente de forma varía entre 7500 y 20000. En el caso de Ks estimado, el coeficiente de escala varía entre 0.25 y 0.06 y el coeficiente de forma varía entre 75000 y 15000.

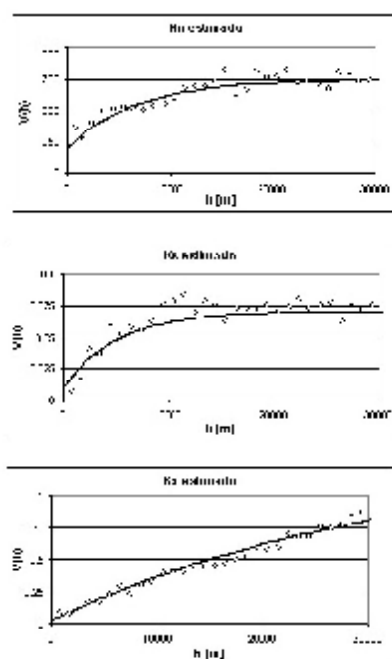


Figura 6.22: Estructura espacial de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en el total de la cuenca del Henares. Variogramas omnidimensionales

El ultimo caso mencionado es, sin duda la mayor diferencia observada en todos los casos analizados. Se puede observar que, gráficamente, tales diferencias se traducen

que en la información modal parece no alcanzarse un valor de meseta antes de los 28000 *m.*, mientras que la estimación en esta cuenca en particular propone que la meseta se encuentra aproximadamente a la mitad de la distancia, entre los 15 y los 20000 *m.* En otras palabras, la estimación sub-estima algo la distancia a partir de la cual la correlación espacial es despreciable.

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu estimado	Exponencial	200	550	20000
Ks estimado	Exponencial	0.01	0.06	15000
Kp estimado	Exponencial	0.03	1.3	100000

Cuadro 6.28: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de Hu , Ks y Kp en la cuenca del Henares

Cabe destacar que es una característica común de los resultados la presencia del efecto pepita, el cual es menos evidente en el caso de la estimación de la cuenca del Alberche. Este efecto ya se observa en los variogramas basados en los valores modales, especialmente en la cuenca del Alagón.

Para finalizar, se puede concluir con claridad que el procedimiento propuesto en esta tesis permite obtener, en el caso de la cuenca del Tajo, resultados fiables.

Es necesario destacar que los resultados obtenidos son dependientes de la calidad de la información utilizada. Así, en este caso, partiendo de información de suelos elaborada con un alto grado de generalización. Lo dicho significa que la escala en la cual fueron definidas las unidades cartográficas de suelos parecen influir en los resultados de la estimación. Así, en este caso el procedimiento propuesta en esta tesis generará resultados cuya correlación espacial posee altos alcances, tal como se observó en los variogramas experimentales.

Finalmente, los resultados obtenidos reproducen la información original con precisión y permiten estimar la variabilidad interna de las unidades cartográficas de suelos de forma tal que su estructura espacial coincida con la estructura general de la información de la cual procede.

6.3.6. Calibración y validación del modelo TETIS en la cuenca del Tajo

En el presente punto se expondrán los resultados obtenidos durante el proceso de calibración del modelo Tetis en la cuenca del Tajo, y su correspondiente validación.

6.3.6.1. Información de trabajo

Para el proceso de calibración se contó con dos eventos registrados en febrero y mayo de 2001, respectivamente. Se trató, en ambos casos, de eventos de crecida de más de un día de duración, sin información nivométrica asociada. El paso temporal de la información fue de quince minutos por intervalo. El Cuadro 6.29 señala las principales características de la información utilizada.

Evento	Inicio	Fin	Cuencas analizadas
01050000	05/01/2001 00:00 h.	06/01/2001 23:45	Alagón y Henares
03030000	03/03/2001 00:00 h.	05/03/2001 23:45	Alagón y Alberche

Cuadro 6.29: Características generales de los eventos analizados

El Evento 01050000 fue importante por dos motivos. En primer lugar por ser el utilizado en la calibración del modelo. En segundo lugar porque permitió analizar la variación espacial de los factores de corrección de los parámetros del modelo, sobre la base de analizar diferentes unidades hidrológicas. Por otra parte, el evento permitió adquirir experiencia en lo que respecta a la influencia de la cantidad y la calidad de la información en el rendimiento del modelo, y a las limitaciones que se encuentran cuando la misma es escasa.

De la misma forma que en el caso del evento anterior, en el caso del Evento 03030000 se procedió a revisar la información y a descartar aquellos puntos de medición que presentaran errores o inconsistencias graves en su contenidos.

6.3.6.2. Calibración y validación

Utilizando la información del evento 01050000, se procedió a calibrar el modelo Tetis, en diferentes unidades hidrológicas incluidas dentro de cada una de las cuencas tratadas (Figura 6.23). El objetivo de este análisis fue el de analizar el comportamiento del modelo, bajo diferentes situaciones hidrológicas y diferentes tipos de terreno: cuencas de cabecera, áreas afectadas por presas, etc. Así, se obtuvieron diferentes conjuntos de valores para los factores correctores del modelo, en función de los resultados obtenidos en varios puntos del sector Centro-Norte de la cuenca (cuencas de Alagón, y Henares). Los resultados se exponen en el Cuadro 6.30 y en las figuras 6.24 y 6.25.

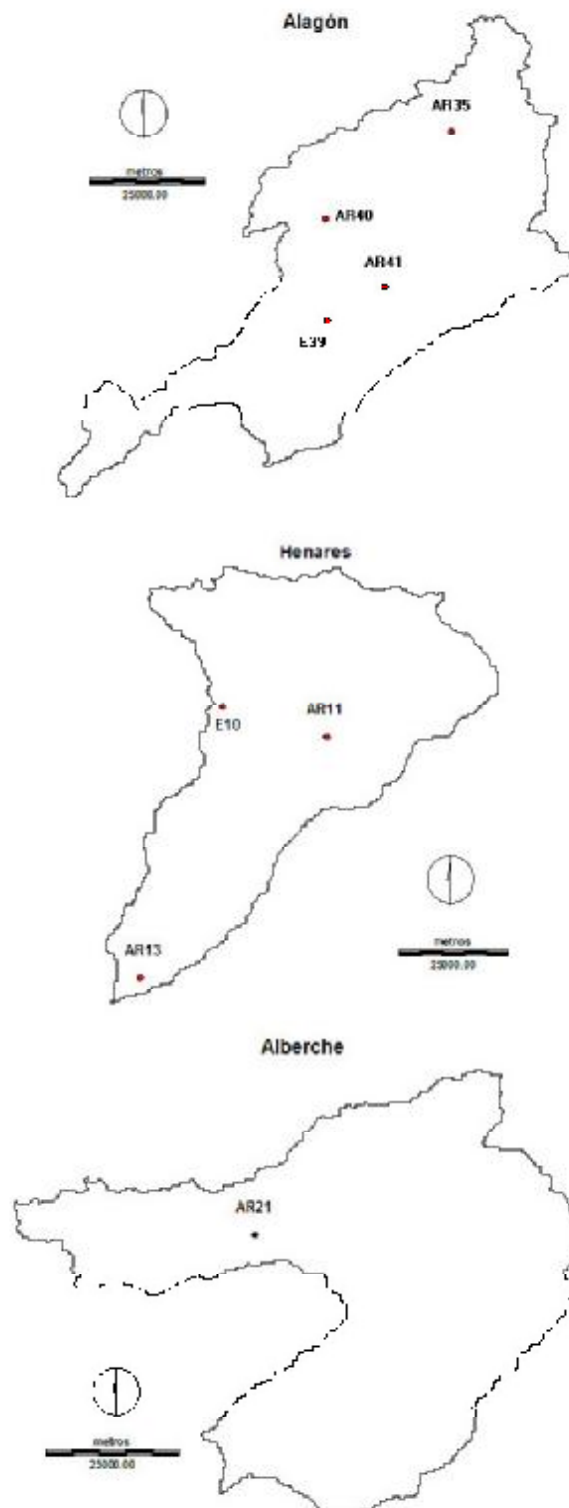


Figura 6.23: Puntos de aforo utilizados en la calibración y validación del modelo

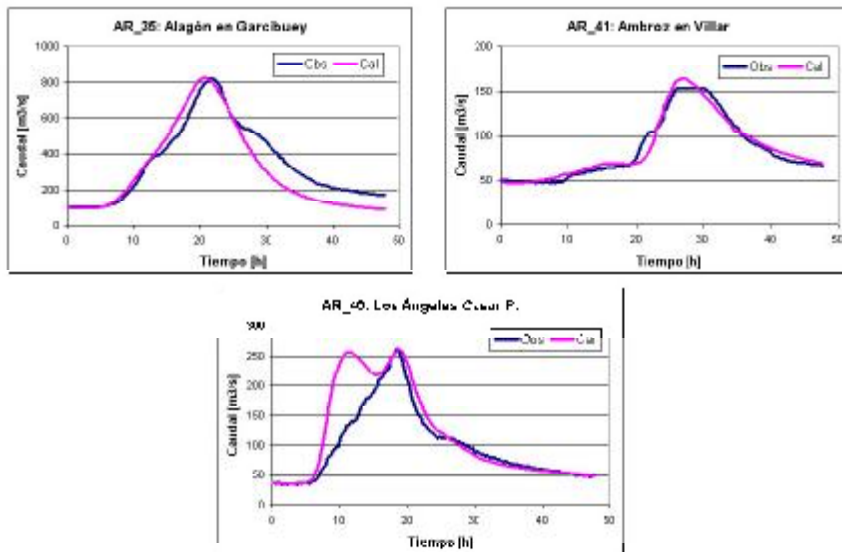


Figura 6.24: Calibración de Tetis. Cuenca de Alagón en cabeceras (Garcibuey y Ambroz) y cuenca media (Los Ángeles).

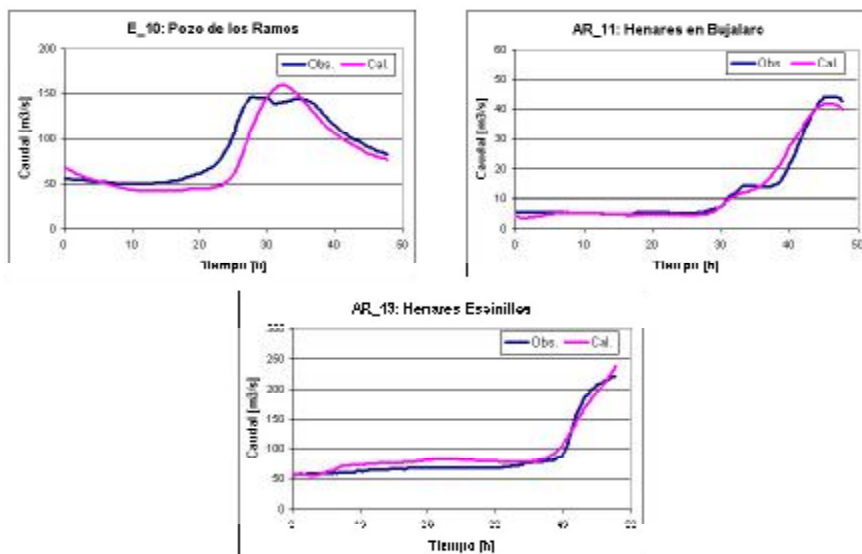


Figura 6.25: Calibración del Tetis. Cuenca del Henares en cabeceras (Pozo de los Ramos), en la cuenca media (Bujalaro) y cuenca inferior (Espinillos)

Aforo	Cuenca	R_N^2
AR35 Alagón en Garcibuey	Alagón	0.878
AR40 Los Ángeles Casar	Alagón	0.732
AR41 Ambroz en Villar	Alagón	0.965
E10 Pozo de los Ramos	Henares	0.809
AR11 Henares en Bujalaro	Henares	0.976
AR13 Henares Espinillos	Henares	0.940

Cuadro 6.30: Ajuste del modelo TETIS en las cuencas de Alagón y Henares

Los resultados expuestos anteriormente señalan un buen ajuste general del modelo en diferentes puntos de las dos cuencas analizadas. Las mayores divergencias entre los valores observados y modelados se deben a evidentes errores o fallos en la información, como los observados en la Figura 6.24.

Una vez que se contó con diferentes valores para los factores de corrección se procedió a su análisis conjunto. El mismo consistió en comparar los diferentes valores de cada uno de los factores y relacionarlos con la naturaleza del evento y las características y cualidades del terreno. Un elemento particularmente importante a tener en cuenta es la dispersión de los valores de los factores de corrección. Su relevancia es, desde el punto de vista de la modelación, tanto o más importante que el valor estricto numérico del factor. Lógicamente, lo dicho es válido siempre que los valores numéricos se encuentren dentro de un margen considerado como “razonable” por los expertos que utilicen el modelo.

El Cuadro 6.31 señala los resultados finales de las calibraciones obtenidas en la cuenca del Tajo.

Parámetro	AR35	AR40	AR41	AR22	AR11	E10	E13
Almacenamiento capilar	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Evaporación	0	0	0	0	0	0	0
Infiltración	0.12	0.20	0.26	0.18	0.20	0.22	0.35
Escorrentía directa	0.38	0.10	0.05	0.10	0.11	0.06	0.03
Percolación	0.90	0.90	0.90	0.80	0.90	0.90	0.90
Flujo subsuperficial	450	200	200	550	400	400	400
Perdidas subterráneas	0	0	0	0	0	0	0
Flujo base	400	280	150	200	80	190.5	80
Velocidad de onda	0.3	1.3	0.50	1.2	0.50	0.8	0.5

Cuadro 6.31: Valores de los factores de calibración obtenido en la calibración del modelo utilizando la información del evento 01050000

Se puede apreciar que los factores correctores de los parámetros del suelo (almacenamiento capilar, Infiltración y percolación, respectivamente) varían entre 1.00 y 0.12. En el caso del almacenamiento capilar, este factor afecta al valor del almacenamiento hídrico del suelo. Puede observarse que la variación entre el valor estimado y el calibrado es mínima. Tanto en el caso de la infiltración como el de la percolación, los factores afectan a valores de conductividad hidráulica, los cuales normalmente se desarrollan en una escala logarítmica de base 10. Teniendo en cuenta los valores obtenidos por calibración, se comprueba que la variación entre los valores estimados y calibrados también es muy baja.

Por otra parte, en todos los casos se puede observar que los valores obtenidos por calibración oscilan dentro de un rango bien definido, lo cual indica la coherencia en el comportamiento del modelo y en las estimaciones previas de los parámetros, en diferentes puntos del terreno.

En función de los resultados obtenidos, el Cuadro 6.32 señala los valores que fueron propuestos para ser utilizados en el proceso de validación.

Parámetro	Máx.	Mín.	Propuesto
Almacenamiento capilar	1.00	0.90	1.00
Evaporación	0	0	0
Infiltración	0.26	0.12	0.20
Escorrentía directa	0.38	0.03	0.15
Percolación	0.90	0.90	0.90
Flujo subsuperficial	550	200	200
Perdidas subterráneas	0	0	0
Flujo base	420	70.5	200
Velocidad de onda	1.3	0.3	1.0

Cuadro 6.32: Valores extremos y propuestos para los factores de calibración, a utilizar en la validación del modelo

Los valores de los factores de corrección de los parámetros del modelo se encontraron en todos los casos dentro de rangos razonables y coherentes entre sí y entre diferentes unidades hidrológicas. Esto habla a favor de la estimación previa de los parámetros, tanto en lo que respecta a su valor individual puntual, como al patrón de distribución de los mismos sobre el terreno. Este hecho, a su vez, permitió seleccionar sin mayores dudas un conjunto de valores, los cuales fueron los utilizados en la validación posterior.

Concluido el análisis de los factores correctores, se procedió a seleccionar un conjunto de valores entre las diferentes soluciones obtenidas. El mismo fue utilizado para la validación del modelo empleando la información del evento 03030000.

Los resultados obtenidos en la validación, en la cual se utilizaron simultáneamente toda la información del evento, permitió comprobar la bondad de los valores adoptados para el modelo (Cuadro 6.33 y Figura 6.26). Tanto en el caso de la cuenca del Alagón como la del Alberche, los eventos validados presentaban caudales de valor considerable, y, en el caso del Alagón, también se pudo validar mediante la evolución de los niveles del embalse de Gabriel y Galán.

Lo dicho permite afirmar, finalmente, que los objetivos propuestos para la calibración y la validación fueron satisfechos completamente.

Aforo	Cuenca	R_N^2
AR21 Alberche en Navaluenga	Alberche	0.877
E36 Gabriel y Galán	Alagón	0.999
AR35 Alagón en Garcibuey	Alagón	0.638

Cuadro 6.33: Validación del modelo TETIS en las cuencas de Alagón y Alberche

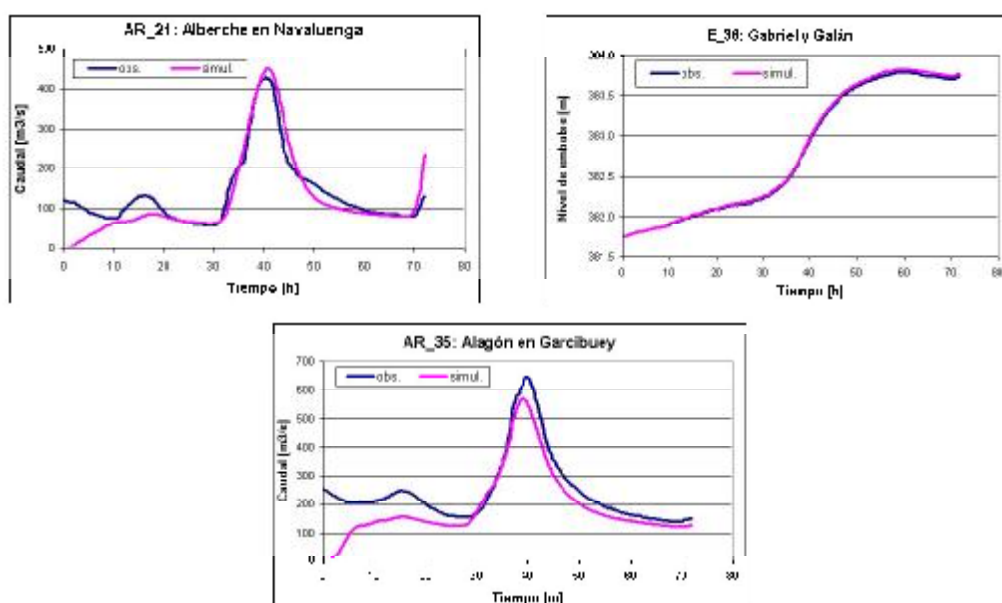


Figura 6.26: Validación en Tetis. Cabeceras y cuenca media del Alagón (Garcibuey y Gabriel y Galán) y cuenca superior del Alberche (Navaluenga)

Para finalizar con el análisis de este caso, se puede afirmar que la estimación de la distribución espacial de las variables principales es, al menos en esta cuenca,

correcta. Estos resultados confirman así la validez del procedimiento propuesto para la estimación de las variables principales utilizadas en la modelación.

Tanto la calibración como la validación posterior permitieron aprender respecto al funcionamiento hidrológico de la cuenca a partir de los resultados del modelo, y comprobar la calidad de la información utilizada, así como los efectos causados por su escasez o ausencia

Los resultados indican que no sólo se logra obtener una alta precisión en la estimación sino que la distribución espacial coincide con la indicada en la información inicial. Ambos hechos permiten que la modelación hidrológica distribuida haya sido exitosa, al menos en esta cuenca, y a la escala a la que se realizó el análisis.

6.4. Caso 2: País Vasco

6.4.1. Descripción del área de trabajo

La zona de trabajo abarca la totalidad de la comunidad autónoma del País Vasco y sectores de las comunidades autónomas de Navarra, Castilla-León y Cantabria. El área aproximada de este territorio es de 8.892 Km^2 . Las coordenadas que limitan el área se recogen en el Cuadro 6.34.

Extremo geográfico	$X(UTM) [m]$	$Y(UTM) [m]$
Mínimo	453000	4695000
Máximo	614000	4812000

Cuadro 6.34: Extensión geográfica del área de estudio. Coordenadas UTM en el Huso 30

Tratándose de una de un sector sumamente extenso, es necesario comenzar la exposición de la geología de la región, partiendo de una visión general de la misma. A partir de estas observaciones generales se irá profundizando progresivamente, analizando así la distribución de los suelos y de la cubierta del terreno.

6.4.1.1. Estructura regional

Según Ugarte (1994) la región de estudio se encuentra dentro de un sector más amplio denominado por él como el conjunto fisiográfico-geológico de los Montes vasco-cantábricos. Este dominio integra desde el punto de vista geoestructural varias unidades que hacen de enlace de continuidad entre el dominio pirenaico y el dominio cantábrico (Julivert; 1980). Según el mismo autor, los límites de este conjunto son al Este la línea de discontinuidad de Elizondo-Estella, que separa al Macizo de Cinco Villas del resto de los Pirineos Occidentales. En el sur su límite estaría dado por la franja de estructuras cabalgantes, vergentes hacia el Sur de la Sierra de Cantabria y los Montes Obanenses. Hacia el Oeste, su límite estaría dado por la aparición del macizo paleozoico asturiano y su zona de influencia.

Recorriendo el territorio de Norte a Sur, se pueden apreciar la sucesión de diferentes manifestaciones tectónicas, ordenadas con rumbo general ONO-ESE, a excepción de los macizos situados en el extremo Oriental del mismo. Esta disposición se manifiesta en tanto en la morfología general del terreno como en la distribución de los suelos y vegetación, afectando en consecuencia a la cubierta del suelo en mayor o menor medida.

Basándose en la información de diferentes autores, Ugarte (1994) describe una serie de rasgos estructurales que dan forma al territorio analizado en este estudio. Los mismos son mencionados a continuación.

Partiendo del extremo nor-oriental del territorio analizado, se destaca el Macizo de las Cinco Villas, compuesto por los afloramientos del paleozoico: granitos y una franja metamórfica. La fracturación es de edad tardihercínica y su configuración está asociada a la orogénesis alpina.

Comenzando con las estructuras de rumbo ONO-ESE, en la parte Norte del territorio se encuentra el monoclinial litoral. El cual se extiende desde el río Bidasoa hasta la localidad de Zumaia, en Guipúzcoa. Este rasgo estructural ocupa el espacio litoral conformando un relieve de cuesta cuyo dorso forma el acantilado costero. Afecta a la desembocadura de los ríos Bidasoa, Oiartzún, Urumea, Oria y Urola.

Hacia el Sur, paralelo al anterior se desarrolla el Anticlinorio Norte de Vizcaya, desde el Macizo de las Cinco Villas al Este hasta el Cabo Matxinxako en el Oeste. Se asocian al mismo la abundancia de relieves estructurales, sinclinales y anticlinales, presencia de depresiones cerradas en los interfluvios y campos de lapiaz y dolinas en zonas altas.

Hacia el sur, se encuentra el Sinclinorio de Vizcaya, el cual comienza en el surco que separa a los macizos de Cinco villas y el de Aldudes, en el Este, y el sinclinorio de Vizcaya, propiamente dicho, hacia el oeste. Se manifiesta con formas pesadas, redondeadas en los interfluvios, que contrastan vivamente con los valles estrechos y encajados del sector. En la zona costera afecta entre otras a las desembocaduras del Nervión-Ibaizábal, y Ría del Butrón.

Hacia el Sur se destaca el Arco antilclinorio externo. Se trata del rasgo estructural más extendido, yendo desde el Macizo de Aldudes al Este, hasta el Anticlinorio Sur de Vizcaya y Bilbao en el Oeste. Se incluye aquí la sierra de Aralar, que sirve de límite a las vertientes N y S de las principales cuencas hidrográficas. Se destacan aquí formas kársticas muy desarrolladas.

Hacia el Sur se desarrollan las plataformas y depresiones de Álava-Navarra. Se trata de una unidad de pliegues amplios, donde los sinclinales de gran anchura de eje son los rasgos más importantes. Se resumen en dos conjuntos de cuencas sinclinales separados por una serie de pliegues anticlinales o sinclinales bien marcados. También aquí las formas kársticas están bien desarrolladas.

En función de lo dicho anteriormente, Ugarte indica que este territorio se puede dividir en tres sectores de características morfológicas y estructurales comunes, asociados a la dinámica hidrológica regional:

- 1) Sector Vasco-Cantábrico (también conocido como “Montes Vascos”), relacionado con el Arco pirenaico-vasco. Se incluyen aquí las cuencas hidrográficas de vertiente vasco-cantábricas, desde el Bidasoa hasta el Barbadún.
- 2) Sector Santanderino (Montañas de Cantabria), relacionado con la estructura del dominio peri-asturiana, en donde se localizan las cuencas hidrográficas de

la vertiente cantábrica santanderina desde el Águera hasta la Ría de Torreleva. Estas cuencas son similares a las vasco-cantábricas en lo que se refiere a sus características hidrográficas.

- 3) Sector correspondiente a las cuencas hidrográficas del Ebro, relacionadas con el Dominio Navarro-Alavés-Cantábrico, desde el Zadorra y Cabecera del Ega, hasta el Omecillo, en el extremo SO de Álava. Su nivel de base es el río Ebro y presentan un perfil longitudinal mucho más atenuado que el del sector anterior ($< 1\%$), con una morfología de conjunto de cuenca en la que predominan los relieves estructurales y los valles amplios.

El primer y segundo sector pueden agruparse dando así a la Unidad Cantábrica, por tener, según Ugarte (op. cit.; p.: 231), aspectos morfológicos perfectamente homologables. Así, esta unidad presenta diferentes características a destacar:

Relieves de cabecera con elevaciones entre los 1500 y 1700 *m.s.n.m.*

- i) Estructuras morfológicas de reducida extensión areal (menores que 500 km^2), con neta discontinuidad del relieve, además de su proximidad litoral.
- ii) Gran importancia morfoestructural de las calizas, las cuales constituyen relieves dominantes en cabeceras e interfluvios, con circulación kárstica en las zonas altas.
- iii) Los perfiles longitudinales son de tipo torrencial, con fuerte ruptura de pendiente entre en el sector de cabecera y el resto. La red de drenaje es en general perpendicular a la estructura.
- iv) En este sector, las cuencas son de reducida extensión, con la excepción del Nervión-Ibaizábal, y su perfil longitudinal es de tipo torrencial (2 a 3% de pendiente general). Los valles son de fuerte incisión en "v", con interfluvios muy marcados.
- v) La morfología costera y litoral presenta acantilados rocosos más o menos abruptos, con numerosas entrantes de extensión diversa, tales como estuarios, bahías y rías, correspondientes al sector mixto (fluvial-mareal) de las cuencas bajas de los sistemas de drenaje.

La unidad que engloba a los territorios drenados por el río Ebro posee una morfología que puede ser definida de la siguiente forma:

- a) Relieves de cabecera idénticos a los cantábricos, pero ocupando la vertiente sur, con un nivel de base situado en el cauce del Ebro, lo que hace que el perfil longitudinal del sistema de drenaje no tenga las características torrenciales propias de los cantábricos.

- b) La estructura del sistema de drenaje localizadas en la zona Navarra-Alavesa son discordantes a la estructuras tectónicas (a excepción del Zadorra en cabeceras, Inglares y Ega), como por ejemplo el Bayas.
- c) Fuerte incidencia de los relieves kársticos, sobre todo en el sector Navarro-Alavés.
- d) Buena parte de este conjunto está conformado por relieves estructurales: sinclinales y monoclinales.
- e) La morfología de los valles presenta un perfil abierto de terrazas y travertinos en las laderas y un fondo de valle mucho más amplio que en el caso cantábrico. Estos parámetros presentan una gradación desde el Este al Oeste.

6.4.1.2. Dominios Hidrogeológicos

Como consecuencia de la morfología y estructura tectónica, en el territorio estudiado se desarrollan un conjunto de dominios hidrogeológicos coherentes con la disposición de los materiales en el terreno (Figura 6.27 y Cuadro 6.35).

Unidad	Nombre
1	Paleozoico y granitoides
2	Anticlinorio Sur
3	Sierra de Cantabria
4	Cuenca del Ebro
5	Cuaternario
6	Sinclinal de Oiz
7	Complejo volcánico
8	Cadena costera
9	Sinclinal de Urbasa-Treviño
10	Plataforma alavesa
11	Anticlinorio Norte
12	Cretácico Superior

Cuadro 6.35: Dominios hidrogeológicos

La definición original de las unidades hidrogeológicas utilizadas por en este trabajo corresponde al de dominio hidrogeológico desarrollado por el EVE (1999) para la comunidad autónoma del País Vasco. En este trabajo se señala una extensión de las mismas hacia los territorios de Navarra y Castilla y León que están incluidos en el estudio. La misma no tiene otro fin que el de catalogar y definir límites, siempre discutibles, en vistas fundamentalmente al objetivo de este trabajo que es el de la parametrización de las propiedades hidrológicas del terreno.

Un dominio hidrogeológico, según EVE (1999; p.: 139) se define como “el área geográfica que incluye un conjunto de acuíferos, independientes o interrelacionados, y que constituye una unidad práctica de investigación y gestión del recurso”. Se debe destacar aquí la clara existencia de heterogeneidad interna en cada unidad hidrológica y el carácter necesariamente operacional de la delimitación, la cual puede verse afectada también por los límites políticos además de los naturales.

Una vez expresadas las aclaraciones anteriores, es posible describir de forma sintética cada unidad hidrológica.



Figura 6.27: Distribución de los Dominios Hidrogeológicos

El *Dominio Hidrogeológico Paleozoico y Granitoides* ocupa la parte oriental del territorio analizado, desde el río Bidasoa hasta el límite con los valles de Leizaran y Berastegui y afectando a la parte media de los ríos Leitzaran y Urumea, la parte alta del río Oiartzun y al Bidasoa. Geológicamente está compuesto por materiales paleozoicos, a diferencia del resto de los dominios del territorio. Ocupa un área con gran pluviometría con módulos superiores a los 2000 mm/año. Este dominio se desarrolla sobre materiales de zócalo paleozoico los cuales se comportan como un bloque alóctono, superponiéndose a los materiales mesozoicos del conjunto.

En términos generales, los materiales que componen este dominio han sido catalogados como impermeables. Sin embargo debe tenerse en cuenta el efecto de la fracturación y la meteorización en el comportamiento hidrológico del terreno. Así, la circulación del agua subterránea se restringe aquí a los primeros metros de material alterado y fracturado, así como las frecuentes acumulaciones coluviales presentes. A consecuencia de lo anterior, este dominio presenta en la actualidad un aprovechamiento importante de los recursos superficiales, siendo más escasos los subterráneos.

El *Dominio Hidrogeológico Anticlinorio Norte* ocupa una franja de terreno en la zona más septentrional del territorio analizado. Limita al Norte con el Mar Cantábrico, salvo su mitad oriental. Al sur limita con el flysch del Cretácico superior. Se trata de terrenos con relieve abrupto. En este dominio se ubican los cursos bajos del Butroe, Oka, Lea, Deba, Urola, Oria, Urumea, Oiartzun y Bidasoa. Las precipitaciones anuales varían entre los 1100 y los 2000 *mm*, aumentando de Oeste a Este. Este dominio incluye a un conjunto de materiales con edades comprendidas entre el Permotriás y el Cenomaniense medio, además de los depósitos cuaternarios ligados, fundamentalmente, a los cursos fluviales.

Los materiales de este dominio poseen una variada composición litológica y están afectados, en diferente forma, por procesos de fracturación, meteorización y karstificación. Como consecuencia de esto, los mismos han sido clasificados con permeabilidades que abarcan toda la escala de valores desde muy altas hasta muy bajas). Los numerosos puntos de agua, en general de pequeño caudal, que existen en este dominio son captados para uso urbano e industrial, en su mayoría.

El *Dominio Hidrogeológico Anticlinorio Sur* se corresponde con una banda que atraviesa el territorio con rumbo NO-SE. En el País Vasco, afecta desde el valle del Karrantza en Vizcaya hasta la Sierra de Aralar, en Guipúzcoa. Incluidos en este dominio se encuentran los el valle del Karrantza, las Encartaciones, Aiala, y el Bajo Nervión, la cuenca del Ibaizabal, el valle del Arratia, la cuenca alta de los ríos Deba, Urola y Oria. La orografía es abrupta, haciéndose más suave al Sur-Oeste. Las precipitaciones más altas se dan en la zona montañosa, alcanzando valores de 1800 a 2000 *mm* en años medios. Los valores más bajos son de 1200 a 1300 *mm* en las proximidades de la ría de Bilbao. Los límites de este dominio son geológicos. Hacia el Norte el límite lo dan los materiales de edad Cenomaniense superior. Hacia el sur los últimos materiales de este dominio corresponden al Cenomaniense inferior.

Los acuíferos asociados a los materiales calcáreos presentes en el sector corresponden al tipo kárstico, en sentido estricto, con permeabilidad alta originada por fracturación y karstificación y respuesta rápida a las precipitaciones.

El *Dominio Hidrogeológico Cretácico Superior* comprende al conjunto de materiales en general flyschoides o margosos que aparecen en los flancos del Sinclinal de Vizcaya y /o bordeando la Cadena Costera guipuzcoana. En ambos casos se trata de materiales cuya permeabilidad es globalmente baja y que actúan generalmente como confinantes. Hidrográficamente, este conjunto pertenece íntegramente a la Cuenca Norte. Debido a su amplia distribución geográfica son numerosos los ríos y arroyos que lo atraviesan o recorren en parte (Gobelas, Butroe, Asua, Nervión Ibaizabal, Oka, Lea, Artibai, Deba, Uriola, Oria, Urumea, Oiartzun, Bidasoa). Su relieve se compone de una sucesión de valles de pendientes moderadas que bordean a otros relieves más importantes emplazados en los dominios vecinos.

Los materiales que componen este dominio fueron asignados como de permeabilidad baja y muy baja. Sin embargo en algunos puntos en particular éstos ofrecen

valores de permeabilidad más alta. En términos generales, los afloramientos de este dominio ocupan áreas con precipitación desigual, variando entre 1000 y 1700 mm/año de promedio.

El funcionamiento global del dominio, en términos hidrogeológicos, es de confinante o sello relativo de las unidades hidrogeológicas con las que contacta. No incluye, por tanto, ninguna unidad o sector hidrogeológico remarcable.

El Dominio Hidrogeológico Complejo Volcánico se define sobre la base de los productos magmáticos generados durante el Cretácico superior se ubican en la base de los materiales margosos del Sinclinorio de Vizcaya, generando una banda discontinua en el terreno. Se trata de productos esencialmente efusivos, que se disponen según coladas lávicas y/o volcanoclásticas interestratificadas con sedimentos marinos flyschoides. De forma local afloran cuerpos intrusivos. La propia sedimentología de los materiales, así como las estructuras a las que están asociadas ocasiona que los afloramientos de rocas volcánicas se dividan en varios bloques claramente desconectados en superficie.

Dominio Hidrogeológico Sinclinal de Oiz se engloba dentro de este dominio la franja de materiales terciarios que ocupan el núcleo del Sinclinorio de Vizcaya. La naturaleza competente de algunos materiales aflorantes origina relieves de entidad, como el monte Oiz. Con una orientación NO-SE representa la divisoria entre las cuencas de los ríos Oka, Butroe, Lea y Artibai al Norte, y Gobelás Asua e Ibaizabal al Sur, ocupando en general las cuencas altas. Los materiales que afloran en el área ocupada por el dominio son clásticos, asignándoles una permeabilidad alta. La precipitación media anual varía entre 1100 mm/año en la zona costera y más de 1600 mm/año en la zona del monte Oiz.

El Dominio Hidrogeológico Cadena Costera constituye el extremo Norte del territorio de Guipúzcoa. Se trata de la franja costera, la cual se conforma básicamente por materiales terciarios. Se extiende entre las desembocaduras de los ríos Urola y Bidasoa. Se comprueba un fuerte aumento de la precipitación desde el Este a Oeste. Así los módulos anuales van desde 1350 mm/año en Zarautz a 1750 mm/año en las cotas superiores de Jaizkabel. Hidrográficamente, cerca del 70% del área definida drena directamente al mar o a la zona de desembocadura de distintos ríos. El 30% restante se distribuye entre las cuencas de los ríos Bidasoa, Oiartzun, Urumea, Oria, Makazeta y Urola.

La cadena costera está compuesta fundamentalmente por materiales terciarios, dispuestos en una estructura monoclinada sensiblemente paralela a la costa y buzante al Norte. La asignación de permeabilidades realizada arroja una permeabilidad media a baja, con algunos términos arenosos de permeabilidad alta.

Dominio Hidrogeológico de la Sierra de Cantabria se encuentra localizado al Sur de la provincia de Álava, entre la comarca de la Rioja Alavesa y el Dominio Hidrogeológico Urbasa-Treviño. Este dominio presenta características geográficas y

estructurales que la definen y distinguen del entorno. Se observa una continua concatenación de montes y valles que soportan internamente una red de drenaje moderadamente desarrollada, estructurada en diferentes subcuencas hidrográficas, todas tributarias del río Ebro. Las cuencas del Ega e Inglares son las más importantes. El límite Norte coincide con el cambio de edad de los materiales desde el Campaniense al Maastrichtiense. El límite sur coincide con la Sierra de Cantabria.

La estructura geológica del Sur de Álava es el resultado de una tectónica de cobertura alpina que se caracteriza por mostrar anticlinales y sinclinales suaves, y por estar atravesada por varios diapiros salinos. Toda la región se halla despegada y desplazada hacia el Sur, cabalgando a los materiales de la depresión terciaria del Ebro. El sector correspondiente a este dominio presenta una seriación completa desde el Keuper hasta el Terciario. Los materiales aflorantes son rocas terrígenas y carbonatadas mesozoicas y potentes series post orogénicas dispuestas según una amplia discordancia progresiva. También aparecen diapiros salinos. Los materiales de mayor permeabilidad son las formaciones calizo-dolomíticas, materiales carbonatados del triásico y los conglomerados, pies de monte y depósitos cuaternarios.

El límite del *Dominio Hidrogeológico Plataforma Alavesa* es fundamentalmente estratigráfico. Se trata de una banda de dirección aproximada Este-Oeste cuyo límite Norte corresponde al tránsito Cretácico inferior-superior y el Sur del Cretácico superior al Terciario del Sinclinal Urbasa-Treviño. Por sus características morfológicas es base para el asentamiento de un importante porcentaje de la población alavesa. La actividad más extendida es la agricultura.

Salvo el extremo NO, cabecera de los ríos Nervión y Herrerías, el resto del área pertenece a la cuenca del Ebro, principalmente a los tributarios Bayas y Zadorra. La estructura del dominio es, en general, una serie monoclinas de materiales del Cretácico superior, con suaves buzamientos hacia el Sur, interrumpida por los diapiros de Orduña y Murguía. Los materiales aflorantes van desde arcillas, yesos y ofitas del Jurásico, materiales detríticos, calcáreo mesozoicos y materiales clásticos de edad cuaternaria, especialmente aluviales. Las permeabilidades son altas en el caso de los materiales calcáreos, asociados al desarrollo de acuíferos kársticos de variada tipología. Los materiales cuaternarios también son de alta permeabilidad. El resto han sido catalogados como de permeabilidad media o baja.

El Dominio Hidrogeológico Sinclinal Urbasa-Treviño constituye la prolongación de la Navarra Sierra de Urbasa, el condado de Treviño en su parte central e integrándose al valle de Valdegobia en su extremo occidental. Esta sucesión genera un relieve general poco abrupto, con una zona relativamente deprimida en el centro. Hidrográficamente, toda el área queda incluida en la cuenca del Ebro, con los cursos principales atravesando la alineación en sentido Norte-Sur. Destacan el Omecillo, Bayas, Zadorra, Ayuda, Izkiz y Berrón.

Los materiales que componen este dominio van desde arcillas, yesos y ofitas triásicas, carniolas jurásicas, una serie carbonatado-detrítica cretácica y materiales

clásticos terciarios. Las permeabilidades más altas se asocian con los materiales calcáreos. Los términos detríticos son de permeabilidad media, junto con las ofitas. El resto son considerados como de permeabilidad baja.

El *Dominio Hidrogeológico Cuaternario* se asocia a los depósitos cuaternarios. Los mismos están constituidos por materiales detríticos, generalmente no consolidados, de granulometría variable. Sus características son diversas, función del ambiente morfogénico que los ha generado: fluvial, lacustre, litoral, laderas, etc. En el ámbito del terreno analizado los materiales cuaternarios presentan una extensión reducida. Adquieren su máximo desarrollo en la Llanada alavesa, depresión del Ebro Sinclinal de Urbasa-Treviño y en los pies de relieves importantes. Por otro lado, los cursos medios y bajos de la vertiente cantábrica presentan depósitos cuaternarios, a veces de espesor importante, en estrechas bandas paralelas a los cauces. La permeabilidad de los depósitos cuaternarios es muy variable. EVE (op. cit) considera que los depósitos glaciares, de terrazas, abanicos aluviales, coluviales antiguos, aluviales, coluviales, playas y antropogénicos son de alta permeabilidad. Los depósitos de origen lacustre son de media permeabilidad y el resto de baja.

Los depósitos cuaternarios dan lugar a acuíferos detríticos de porosidad intergranular y elevada anisotropía. Su régimen va desde libre a confinado. Suelen estar conectados hidráulicamente a los ríos, con relación influencia/afluencia variables.

Finalmente, el *Dominio Hidrogeológico Cuenca del Ebro* se sitúa en el extremo sur del territorio analizado, abarcando la comarca denominada como Rioja Alavesa. Su límite Norte lo constituye la Sierra de Cantabria y el Sur el Ebro. La actividad más importante gira alrededor de la vitivinicultura. Se trata de una gran fosa rellena por sedimentos del Mioceno con más de 4000 m de espesor. Los mismos son materiales clásticos de grano grueso, materiales arcillosos y margosos o alternancias de ambos tipos. Los primeros son considerados como de alta permeabilidad. El término litológico más extendido presenta baja permeabilidad.

6.4.1.3. Litología y litoestratigrafía regional

Los materiales que componen las anteriores unidades se pueden diferenciar en función de sus características físicas, tanto desde el punto de vista estratigráfico como a partir de sus características hidrológicas.

En el primer caso, se puede comprobar que la litología que compone la mayor parte del territorio analizado es de edad cretácica, como lo señala la Figura 6.28, acorde con su origen e historia geológica. El comportamiento hidrológico de los materiales es un elemento fundamental en este trabajo. Esta tarea implica tener en cuenta un amplio rango de materiales (sedimentarios, ígneos y metamórficos) generados y/o modificados en diferentes etapas de la historia geológica de la zona. Así, una primera catalogación de los principales tipos litológicos de la región es la propuesta por EVE (1999). En ésta, sobre la base de la experiencia y del conocimiento de

campo, se ha agrupado a todos los tipos litológicos existentes en la región en cinco categorías, en función de su permeabilidad. Cabe aclarar que EVE entiende como permeabilidad a la propiedad del terreno que permite el tránsito de agua al interior del mismo, hacia el subsuelo. De esta forma se distinguieron cinco categorías de permeabilidad, que se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Permeabilidades altas y muy altas: asignadas a aquellos términos litológicos normalmente constitutivos de acuíferos.
- b) Permeabilidades muy bajas: asignadas a los materiales que actúan de sellos a la infiltración, tales como limonitas, argilitas, etc.
- c) Permeabilidades medias y bajas, asignadas a los materiales constituidos sobre la base de alternancias o de litologías intermedias (areniscas y lutitas, calizas margosas, etc.)



Figura 6.28: Distribución del Cretácico en el terreno analizado

La definición de cada categoría implicó también tener en cuenta un rango del coeficiente de infiltración de la lluvia útil, lo cual implica a su vez la estimación de este último parámetro de forma separada y *a priori*. A pesar de todo, los autores indican con claridad que se tratan de valores de referencia sujetos a matizaciones y modificaciones futuras. Así, EVE (1999; p.: 4) indica los correspondientes rangos de permeabilidad y coeficientes de infiltración (Cuadro 6.36). Si bien se trata de una generalización, basada en información puntual a toda una formación geológica, el mapa resultante cumple con el objetivo de expresar de forma cartográfica el conocimiento que se posee del terreno y de base a futuras modificaciones y especificaciones.

Por otra parte, EVE (1999) indica que los resultados de la aplicación de un criterio como el descrito pueden producir casos especiales factibles de ser matizados,

Categoría	Permeabilidad	Rangos de Infiltración
Clase 1	Muy baja	0-5 %
Clase 2	Baja	5-20 %
Clase 3	Media	20-60 %
Clase 4	Alta	60-80 %
Clase 5	Muy alta	80-100 %

Cuadro 6.36: Clases de permeabilidad en el país Vasco

como el caso de formaciones con superficies de afloramientos inferiores a las mínimas cartografiadas. Esta clasificación fue originalmente diseñada para el ámbito estricto del País Vasco. Debido a la necesidad de categorizar los terrenos adyacentes al mismo (por ejemplo el condado de Treviño, o ciertos sectores de Navarra y Castilla-León) la categorización fue extendida, reinterpretando la información litológica existente según los criterios expuestos por EVE y teniendo en cuenta las similitudes ambientales entre los casos estudiados. El resultado se puede observar en la Figura 6.29.

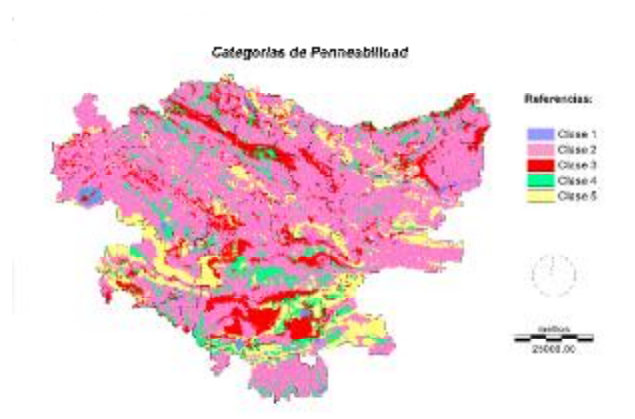


Figura 6.29: Categorías de conductividad según EVE (1999)

6.4.1.4. Suelos

En este apartado se describen en forma resumida las principales características edafológicas de importancia hidrológica en el área de estudio.

El fundamento para la existencia de una taxonomía de *aplicación hidrológica* es aquella que se base sobre las características morfológicas del perfil. De esta forma

es posible definir las cualidades hidrológicas del suelo y asociar a éstas con los parámetros de modelación. La base taxonómica particular de este caso fue la separación de los suelos en función del grado de desarrollo que presenten sus perfiles; es decir: en función del tipo y cantidad de horizontes edáficos que éstos presenten. Se definieron así tres categorías principales con las cuales establecer las mayores divisiones entre tipos de suelos (Cuadro 6.37).

Así, los suelos que no presentan desarrollo en el perfil o éste es mínimo son lo que más características comparten con los materiales parentales. Éstos se relacionan fundamentalmente con depósitos sedimentarios recientes, tales como depósitos aluviales o coluviales. Desde el punto de vista hidrológico, su característica común y más destacada es la marcada heterogeneidad lateral y vertical de los suelos. Las unidades cartográficas que contengan a este tipo de suelo están asociadas a geoformas claramente diferenciables en el terreno, tales como depósitos coluviales o aluviales. Los límites externos de estas unidades, así como las superficies que las subdividen internamente son superficies de discordancia de origen sedimentario o erosivo. Este tipo de suelos fue identificado normalmente asociado a cursos de agua y las zonas de regadío relacionados a éstos.

Categoría	Denominación	Perfil Tipo
1	Suelos sin horizontes definidos	Sin perfil definido
2	Suelos con poco desarrollo edáfico	Usualmente con perfiles tipo A-C o A/C-C
3	Suelos desarrollados	Usualmente con perfiles tipo A-B-C

Cuadro 6.37: Categorías básicas de los suelos

Avanzando en la evolución del perfil de suelos, surge la segunda categoría: los suelos que presentan diferentes horizontes (al menos dos) pero el grado de diferenciación es bajo. Así surgen suelos con perfiles A-C o A/C-C, con un primer horizonte más o menos humificado, con cierto desarrollo de la estructura edáfica. Por debajo se presenta un horizonte directamente relacionado al material parental. Se trata de suelos que, normalmente no presentan gran profundidad, situándose en relieves y posiciones de paisaje geomorfológicamente activos. En términos hidrológicos, estos suelos participan fundamentalmente en la transmisión de flujos a lo largo de las laderas.

Finalmente, los suelos con desarrollo de horizontes en secuencia A-B-C indican el mayor desarrollo de perfil, respecto a los dos casos anteriores. Particularmente, la presencia del horizonte B, las características de su estructura edáfica, y la concentración de arcillas relativa al horizonte superior, indicarán la presencia o no de un nivel que impida la penetración profunda del agua, y/o la presencia de dos secciones claras en el perfil: una superior con buenas condiciones para la transmisión

del agua y otra inferior, con una gran capacidad de almacenamiento hídrico. La distribución regional de estas categorías de suelos se exponen en la Figura 6.30.

Categoría	Perfil tipo
Gleyzación	Perfil A/B/C afectado por procesos de anegamiento parcial
Presencia de carbonatos	Perfil A/B/C con presencia de carbonatos
Rendsinas	Rendsinas y suelos asociados

Cuadro 6.38: División de los suelos más desarrollados



Figura 6.30: Distribución de las principales categorías de suelos

Dentro de esta tercer categoría de suelos, existen dos casos que deben destacarse, en función de la presencia o no de carbonatos de calcio en el perfil, y de condiciones de anegamiento parcial del perfil afectando al menos a los primeros 50 *cm.* del mismo (ambos en la Figura 6.31). Dichas condiciones, conocidas como “condiciones gleycas” o de “procesos de gleyzación” se deben fundamentalmente a la oscilación periódica de niveles acuíferos. Finalmente, cabe destacar que, dada la importancia que tienen los procesos kársticos en la región, la presencia o ausencia de suelos del orden de las Rendsinas resulta de particular importancia a la hora de la estimación del comportamiento hidrológico del terreno (Figura 6.32).

Usualmente, la presencia de carbonatos está directamente asociada a la presencia de un material parental carbonatado: calizas, margas, etc. En el caso de tratarse de materiales ígneos o metamórficos, los suelos que se desarrollan no contienen carbonatos. La presencia de este compuesto químico implica, en el caso de los suelos la reducción de su conductividad hidráulica y su capacidad de almacenamiento

hídrico, ya sea por su presencia diseminada en la matriz del suelo o por la generación de superficies cementadas o costras calcáreas. En el caso de estas últimas, su presencia y distribución está asociada a la estratigrafía reciente del terreno y, consecuentemente, la evolución del suelo.

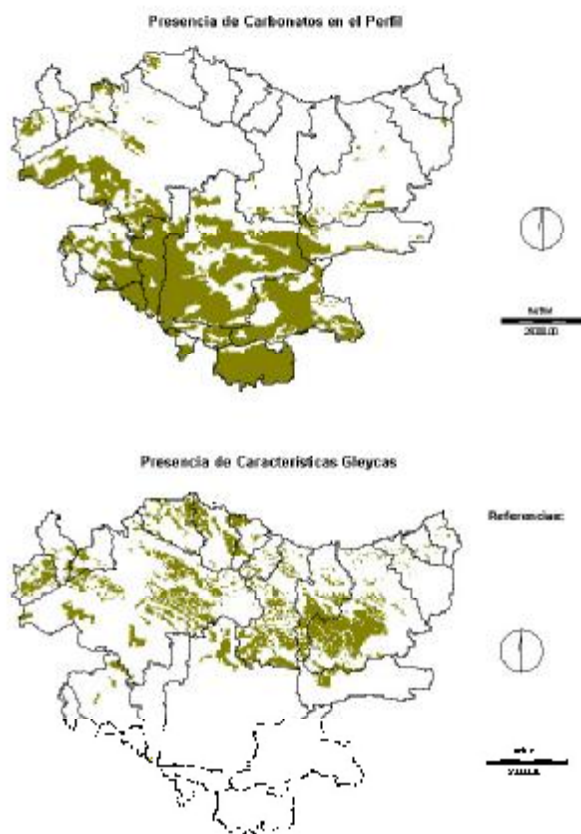


Figura 6.31: Presencia de concentración de carbonatos en el perfil, y de características indicadoras de procesos de gleyzación en la zona de estudio

Queda claro que la concentración de carbonatos en el interior del perfil de suelos es un problema especialmente presente en el sector Sur del área analizada, fundamentalmente en la provincia de Álava y una fracción del sector occidental de la provincia de Vizcaya. Por el contrario, los problemas de gleyzación son dominantes en el sector Norte del territorio, fundamentalmente en las provincias de Guipúzcoa y Vizcaya.

Finalmente, las Rendsinas se distribuyen en todo el territorio analizado, siendo más destacadas en la zona Sur, en la Provincia de Álava. Su distribución espacial coinci-

de con la presencia de importantes afloramientos calizos en la región. Su presencia se asocia a procesos de karstificación extendidos que afectan al comportamiento hidrológico local.



Figura 6.32: Distribución de la presencia de Rendsinas y de sus suelos asociados

Analizando la información disponible desde el punto de vista edafológico, en el sector Norte (Guipúzcoa y Vizcaya, en general) existe una menor cantidad de suelos “dominantes”, conocidos en edafología como “zonales”, es decir: los suelos que están en equilibrio con el paisaje y con el clima actual.

Los suelos zonales descritos en el sector Norte guardan una serie de características y cualidades en común: un buen desarrollo evolutivo del perfil, en el cual se destaca la presencia de horizontes B cámbicos o argílicos. Pertenecen a los órdenes de los Cambisoles y de los Luvisoles.

En cambio, en el Sur (Álava) la zonalidad de los suelos es algo menos clara. Sin embargo los Cambisoles y Luvisoles cumplen aquí el mismo rol que en el sector Norte. Se agregan a los anteriores las Rendsinas, suelos que originalmente no son zonales en sentido estricto, pero que en este caso, dada su extensión cartográfica y su grado de representatividad de las condiciones del terreno (entre ellas las hidrológicas) permite considerarlos como tal. El contraste entre estos tres órdenes es claro, tanto en lo que respecta a su perfil edáfico, como a las condiciones hidrológicas que representan; en síntesis: existe una mayor diferencia de caracteres y génesis entre éstos.

Por otra parte no debe olvidarse la diferencia de las escalas de la información utilizada. Tal diferencia puede exagerar las características observadas en la provincia de Álava respecto a las provincias de más al Norte. Sin embargo, es de destacar la coherencia de la distribución, lo cual reafirma el carácter regional de ambos procesos.

A continuación se expone una síntesis de la distribución de los órdenes de suelos más importantes en la región estudiada.

En primer lugar, en la provincia de *Guipúzcoa* el relieve general de la región es complejo, con laderas convexas y estrechos fondos aluviales. La dinámica activa los procesos de deslizamiento de laderas y la acumulación de materiales en las depresiones. Los valles presentan exceso de humedad y altos contenidos de materia orgánica, mientras que en las laderas la variedad edáfica está directamente controlada por la su dinámica erosiva. En términos generales, los suelos la región se encuentra dominada por suelos evolucionados, asociados entre sí. Así, los Cambisoles y Luvisoles son los suelos más frecuentes en la región. Los suelos con problemas de gleyzación se localizan fundamentalmente en las partes bajas de la mitad central y Norte de Guipúzcoa. No se encuentran problemas de gleyzación en la zona occidental de Guipúzcoa, limitando con Navarra.

Los cauces de los principales cursos de agua se caracterizan por la presencia de suelos poco evolucionados, desarrollados partir de materiales fluviales recientes (Fluvisoles).

Las Rendsinas aparecen asociadas a zonas afectadas por procesos kársticos, relacionados lateralmente a Luvisoles. Finalmente, una estrecha banda costera es ocupada por suelos Ranker, asociados a grandes pendientes topográficas.

Tal como se mencionó al inicio de esta sección, la información edafológica con que se contó fue de origen diverso. Así, para poder elaborar los valores modales de *Navarra*, se hizo una correlación general entre los tipos de suelos clasificados según el Soil Taxonomy y los suelos clasificados según FAO. De allí provienen los valores de Navarra. De esta forma, los suelos de Navarra fueron clasificados con la misma taxonomía que los de Guipúzcoa, Navarra y Castilla-León. Se logró así una correlación directa entre los perfiles de suelo de los diferentes territorios analizados, tendiendo en cuenta, claro, las limitaciones propias de la taxonomía empleada. Si bien la interpretación pueda resultar simplista y hasta arriesgada, cabe recordar que la asignación de valores modales no es enteramente relevante por el valor en sí mismo sino por la estimación de la variabilidad regional de los parámetros de medición.

A pesar de los problemas de información ya mencionados, se ha podido deducir que los suelos de esta región son, en esencia similares a los adyacentes del lado de Guipúzcoa y Álava, aunque desarrollados bajo condiciones de clima edáfico más restrictivas. Los suelos dominantes son los Cambisoles, ocupando gran parte del territorio, mientras que las zonas más escarpadas las ocupan los Rankers. Los Luvisoles son suelos menores asociados a los Cambisoles, en especial en la zona del las cuencas del Urumea. Finalmente, los Fluvisoles destacan asociados a cauces de agua tales como el del Ega.

En *Álava* es posible distinguir la alternancia, acorde con el relieve de Rankers, Cambisoles y Rendzinas. Los Rankers se localizan mayoritariamente alineados a

las Sierras Septentrionales, hacia el límite con Guipúzcoa y Vizcaya. Se asocian especialmente con afloramientos silíceos, con pendientes topográficas pronunciadas. A medida que se avanza de Norte a Sur, el paisaje se suaviza, dominando los Cambisoles, intercalados por unidades cartográficas pertenecientes a las Rendzinas. Hacia el centro de Álava, coincidente con el afloramiento de litologías calizas afectadas por procesos de karst, las Rendzinas son el tipo de suelo dominante. En el área correspondiente a la Rioja alavesa dominan los Cambisoles. Tal como se definieron en el mapa de Suelos de Álava, ocupan áreas extensas de materiales calizos con pendientes moderadas a fuertes. Comúnmente se asocian a Litosoles, Cambisoles o Luvisoles.

En zonas llanas con gran pluviosidad, como en el Puerto de Opakua o la Sierra de Urbasa, el horizonte A puede alcanzar un gran espesor y un elevado contenido de materia orgánica. Hacia el Sur, los Cambisoles vuelven a tener importancia, relegando a las Rendzinas a pequeñas unidades cartográficas, destacando su carácter zonal. Ordenes de suelos como Acrisoles, Luvisoles, Podsoles, Litosoles, Podsoluvisoles y Vertisoles ocupan zonas reducidas del paisaje, y su expresión cartográfica es mínima en comparación con los mencionados anteriormente.

Los sectores de la comunidad de *Castilla-León* son fundamentalmente cuatro, dispuestos según el rumbo NO-SE. En el sector más al SE (Condado de Treviño), dominan los Cambisoles, asociados fundamentalmente a Gleysoles, que ocupan la zonas más bajas del terreno. Siguiendo el rumbo antes mencionado, hacia el NO, se observa cómo los Litosoles toman importancia, asociados a afloramientos calizos. Finalmente, en el grupo situado en el extremo SO del conjunto se observa nuevamente la asociación entre Cambisoles, Gleysoles y Luvisoles, en ese orden de importancia. A la escala a la cual fue elaborado el Mapa de suelos de Castilla-León, no se destaca la presencia de Rendzinas.

6.4.1.5. Cubierta del suelo

Esta característica del terreno responde en función de las características propias de la cubierta (competencia, ciclo fenológico, etc.) pero su presencia o ausencia y distribución espacial son una manifestación del ambiente en el cual se desarrollan. Dentro de una determinada región climática, la cubierta vegetal, ya sea natural o cultural, responde a las limitaciones supuestas por los suelos y la morfología, la cual es función de la estructura geológica y la litología. De la misma forma, los asentamientos y el tipo de labores culturales realizadas por los hombres se adapta a las condiciones del medio. En otras palabras: la cubierta del suelo es una manifestación espacial de la interacción entre el clima y el terreno con una mayor o menor influencia humana.

En líneas generales, la distribución espacial de los diferentes usos del suelo es coherente con la distribución de los suelos y la presencia de un relieve favorable para el fin productivo (Cuadro 6.39 y Figura 6.33).

Categoría	Detalle
1	Bosques, matorrales y herbazales
2	Plantaciones forestales
3	Cultivos agrícolas
4	Urbano o sin vegetación
5	Ría y embalses

Cuadro 6.39: Principales tipos del uso del suelo



Figura 6.33: Distribución de las principales tipos de uso del suelo en el área de estudio

La Figura 6.33 explica con claridad la distribución de los principales tipos de cubiertas del suelo. En orden descendente, se ubica las cubiertas naturales (bosques, matorrales y herbazales), las plantaciones forestales, los cultivos agrícolas, las zonas urbanas y los terrenos afectados por la ría de Bilbao y los embalses.

Las zonas llanas del sector Sur, territorio alavés, son más abiertas. El uso del suelo en las zonas llanas contrasta con el observado en la rioja alavesa, donde la actividad vitivinícola es dominante. Finalmente, otra forma de cubierta del suelo es la representante de la actividad de pastoreo.

Por otra parte, se puede observar que la distribución de los terrenos forestales y los cultivos agrícolas está bien diferenciada, siendo los primeros dominantes en el sector Norte, y los segundo dominantes en el Sur. La diferencia en el tipo de materiales y su disposición en el espacio (estructura) condicionan la morfología del terreno, haciéndolo más o menos apto para una labor cultural extensiva, intensiva o forestal, por ejemplo. Esto se muestra en plena coincidencia con lo expresado anteriormente en los apartados de estructura tectónica y dominios hidrogeológicos.

Los fenómenos kársticos se expresan con claridad en el paisaje, ya que generan un ambiente particular en cuanto a la distribución de humedad y heterogeneidad del terreno.

El patrón de distribución de la cubierta del suelo, si bien localmente complejo, sigue el patrón general del terreno. Así puede comprobarse que se conserva el rumbo NO-SE, dada por la estructura regional.

6.4.2. Información utilizada

Como en el caso anterior, los materiales fueron los datos puntuales, información bibliográfica y cartográfica, referida a la zona de trabajo. El Cuadro 6.40 expone los diferentes tipos de información cartográfica original, utilizada en función del tema tratado en el estudio.

Tipo de Información	Mapas	Formato y escala
Estructura geológica	Información de EVE,	Digital, Vectorial
Unidades Hidrogeológicas	Información de EVE	Digital, Vectorial
Litología y Estratigrafía	Información de EVE	Digital, Vectorial
	Mapa de permeabilidades del País Vasco	Digital, Vectorial
Topografía	Modelo digital del terreno	Digital raster, píxel de 500*500 m.
Uso del suelo	Información de EVE	Digital, Vectorial
Tipos de suelos	Información de EVE	Digital, Vectorial
	Mapa de Suelos de la Comunidad Europea	Digital vectorial
	Mapa de Suelos de Álava	Digital, vectorial
	Mapa de suelos de Castilla y León	Digital, vectorial

Cuadro 6.40: Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos

Dada la pixel distribución de la información (por regiones autonómicas), resulta importante destacar algunos detalles respecto de su segmentación y de las diferentes escalas de las fuentes de información

6.4.2.1. Segmentación y origen de la información

Así como la información no provino de la misma fuente, la cobertura de la misma tampoco fue completa en cada caso. fue necesario coordinar diferentes fuentes para lograr consolidar la información en la totalidad del territorio analizado.

La Figura 6.34 y el Cuadro 6.41 señalan la distribución e importancia de las diferentes regiones integradas en este estudio.

Región	Provincia	Comunidad Autónoma
Región 1	Guipúzcoa + Vizcaya	País Vasco
Región 2	Álava	País Vasco
Región 3	Burgos	Castilla y León
Región 4	Navarra	Navarra
Región 5	Santander	Cantabria

Cuadro 6.41: Regiones de información integradas en el estudio



Figura 6.34: Distribución de las regiones de información

Se han involucrado a cuatro autonomías diferentes, cada una de las cuales son sus propios criterios de análisis y taxonomía en lo referente a los elementos del paisaje, a excepción de la descripción litológica, homologada a través del IGME. Puede apreciarse que las más importantes, por su extensión cartográfica son sin duda Guipúzcoa, Vizcaya y Álava.

6.4.2.2. Formato y escala de la información utilizada

Como ya se adelantó, la información provino de diferentes fuentes. Si bien el formato con que se trabajó originalmente era digital vectorial, las fuentes de esa información estaban originalmente en formato papel, a una escala determinada. Dentro de esta problemática existe un caso de particular interés, necesario de ser

destacado por su influencia en los resultados finales de la estimación. Se trata de la diferencia en la escala original de mapeo de suelos. Mientras que en Guipúzcoa y Vizcaya es de 1:25.000, en Álava es 1:200.000. En el caso de Navarra se desconoce, pero se supone cercana al 1:100.000. Finalmente, En Castilla y León, la escala original de la información es de 1:500.000.

Como pudo apreciarse en el Cuadro 6.40, la diferencia de escala de mapeo se traduce en que el tamaño medio de las unidades cartográficas en diferentes sectores del terreno estudiado sea radicalmente diferente. Por otra parte, dada la diferencia de escalas entre los mapas (1:25.000 vs. 1:200.00), las unidades cartográficas varían claramente en lo que respecta a su tamaño. Ésta es otra causa evidente de variabilidad entre celdas y entre sectores (Norte y Sur).

Desde un punto de vista práctico, cabe recordar que una de las finalidades para lo cual son utilizadas las unidades cartográficas es para representar el valor modal del conjunto de suelos (unidades taxonómicas) que ellas incluyen. En consecuencia, una unidad cartográfica delineada a 1:25.000, cubrirá una pequeña variación edáfica del terreno (incluirá pocas unidades taxonómicas, generalmente poco diferentes entre sí, mientras que una unidad cartográfica delineada a escala 1:200.000 cubrirá una variación mayor de suelos (varias unidades taxonómicas, generalmente más diferentes entre sí). En consecuencia, en el caso de un mapa 1:200.000, las diferencias en el valor modal de un determinado parámetro hidrológico (como por ejemplo la conductividad hidráulica saturada) será necesariamente mayor respecto a la unidad cartográfica vecina que en el caso de un mapa escala 1:25.000. Como ejemplo vale el análisis de un modelo digital del terreno (una superficie más o menos continua en el espacio) analizándolo según diferentes tamaños de píxel. A medida que el tamaño de píxel aumenta, aumenta la variación entre el valor de cota topográfica en cada píxel.

6.4.2.3. Grado de integración

El hecho de existir diferentes fuentes de información no solo presenta el problema de la escala antes mencionada sino también el referido a la taxonomía y forma de clasificación de los temas analizados. En este trabajo el problema mencionado afectó a la información de la cubierta de suelo y a la información edafológica.

En el caso de la cubierta de suelo se contó con una clasificación homogénea para todo el país Vasco, otra para los territorios correspondientes a Castilla y León y otra para Navarra.

Debido a su simplicidad y extensión territorial se adoptó la primera de las mencionadas. Así, fue necesario interpretar y correlacionar los diferentes términos taxonómicos en Castilla y León y Navarra para homologarlos a los del País Vasco.

Por otra parte, se contó con información hidrológica (pluviometría, niveles de embalse y aforos) a escala de evento, de tres subunidades del sistema analizado:

Ibaizábal, Oria y Zadorra, respectivamente. La selección de las localidades y de la información hidrológicamente coherente se llevó a cabo en una etapa previa a este estudio (Figura 6.35).

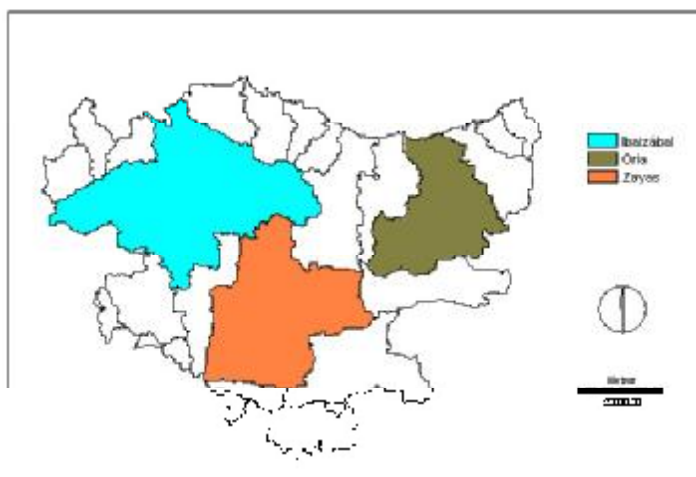


Figura 6.35: Unidades hidrológicas analizadas en este trabajo

6.4.3. Variables empleadas

6.4.3.1. Variables principales

Al igual que en el caso anterior, las variables principales fueron expresadas como variables continuas (Cuadro 6.42).

Denominación	Escala	Fuente
Conductividad hidráulica del suelo	Cuantitativa	Mapas de suelos
Conductividad hidráulica del substrato del suelo	Cuantitativa	Mapas de suelos
Capacidad de almacenamiento hídrico	Cuantitativa	Mapas de suelos

Cuadro 6.42: Detalle de las variables principales, y su forma de expresión

Los valores de las variables principales fueron deducidos a partir de la información contenida en la leyenda los mapas de suelos de la región analizada, y del Mapa de Suelos de la CE (1985).

A partir de los resultados obtenidos a través de la aplicación de las funciones de pedotransferencia, se pudo elaborar un mapa de valores modales para cada una de las variables principales analizadas y evaluar a priori la estructura de su distribución espacial.

En este caso, como en el anterior, se analizaron los diferentes perfiles de suelos desde los puntos de vista hidrológico y morfológico. Posteriormente, como ya se aclaró, los valores modales fueron asignados a las diferentes unidades cartográficas que ocupan la región analizada. En este caso, el total de unidades cartográficas obtenidas es de 9835, un número muy superior al utilizado en el caso de la cuenca del Tajo.

Además de la cantidad de unidades cartográficas, el tamaño de las mismas es otro detalle de gran importancia en el análisis de la continuidad espacial de las variables principales. El Cuadro 6.43 señala la extensión media y su variabilidad, del área de las unidades cartográficas en cada región analizada. La variabilidad se indica por medio de un intervalo alrededor del valor medio (Romero y Zúñica, 1993). El mencionado cuadro y la Figura 6.36 señalan con claridad la notable diferencia de tamaño de las unidades cartográficas utilizadas, según la fuente de la cual provienen. Así, los mapas de suelos de Guipúzcoa y Vizcaya son en lo que respecta a la escala más detallados, mientras que los de Álava son los menos detallados. Lo dicho complementa lo expresado en secciones anteriores de este mismo informe, en lo referido a la heterogeneidad de la información utilizada. Existe, pues, una clara diferencia en la calidad de la información en lo que respecta a su variabilidad espacial.

Área media de las unidades cartográficas				
Región	<i>N</i>	Media	L.I.	L.S.
Álava	407	4.79	4.355	5.277
Guipúzcoa y Vizcaya	28772	0.05	0.048	0.049
Navarra	179	0.91	0.791	1.057
Castilla-León	187	0.64	0.554	0.736

Cuadro 6.43: Valores medios de la superficie de las unidades cartográficas de suelos en las diferentes regiones analizadas. *N*: Número de datos. L.I.: Límite inferior del intervalo de variación, L.S.: Límite Superior del intervalo de variación.

El tamaño de las unidades cartográficas en Álava, Navarra y Castilla y León se aproximan al tamaño de las unidades cartográficas utilizadas en el caso de la cuenca del Tajo. En cambio, las unidades cartográficas delineadas en Guipúzcoa y Vizcaya son claramente diferentes a las antes citadas.

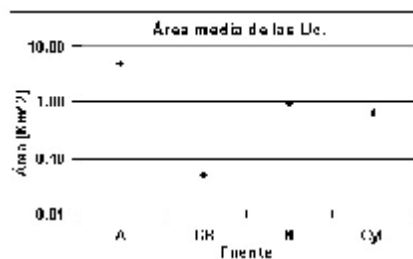


Figura 6.36: Tamaño medio de las unidades cartográficas analizadas (A= Álava; GB= Guipúzcoa-Vizcaya, N= Navarra; CyL= Castilla y León)

Una de las consecuencias más claras de este problema es la necesidad concreta de distribuir espacialmente los valores de Hu , Ks y Kp en los territorios de Álava, Navarra y Castilla y León con mucho mayor detalle que el tamaño de sus unidades cartográficas. En menor grado lo es también necesario en las provincias de Guipúzcoa y Vizcaya.

De los 9835 valores modales asignados, se expone una síntesis en forma espacial en la Figura 6.37.

Se puede apreciar con claridad en dichas figuras que, dadas las diferencias de escalas a la cual fue definida la información edafológica en diferentes sectores del terreno, es necesario distribuir los valores modales para ser utilizados en la modelación hidrológica. Así, al observar cada uno de los mapas se puede comprobar que en aquellos sectores donde la información es más gruesa, los valores modales se destacan con claridad, tanto si se trata de valores altos como bajos. Al tratarse de unidades cartográficas de gran tamaño, con una reducida cantidad se logra cubrir grandes superficies.

Por otra parte, la cantidad de unidades taxonómicas incluidas en cada unidad cartográfica no cambió en función del tamaño de la misma. Sumado a las características propias del terreno, la relación tamaño vs. número de unidades taxonómicas influye decisivamente sobre la variabilidad observada entre los sectores Norte y Sur. La información en los sectores de Álava, Navarra y Castilla y León señala grandes “saltos” entre unidades cartográficas vecinas, mientras que en el sector Norte la variabilidad es más “suave”.

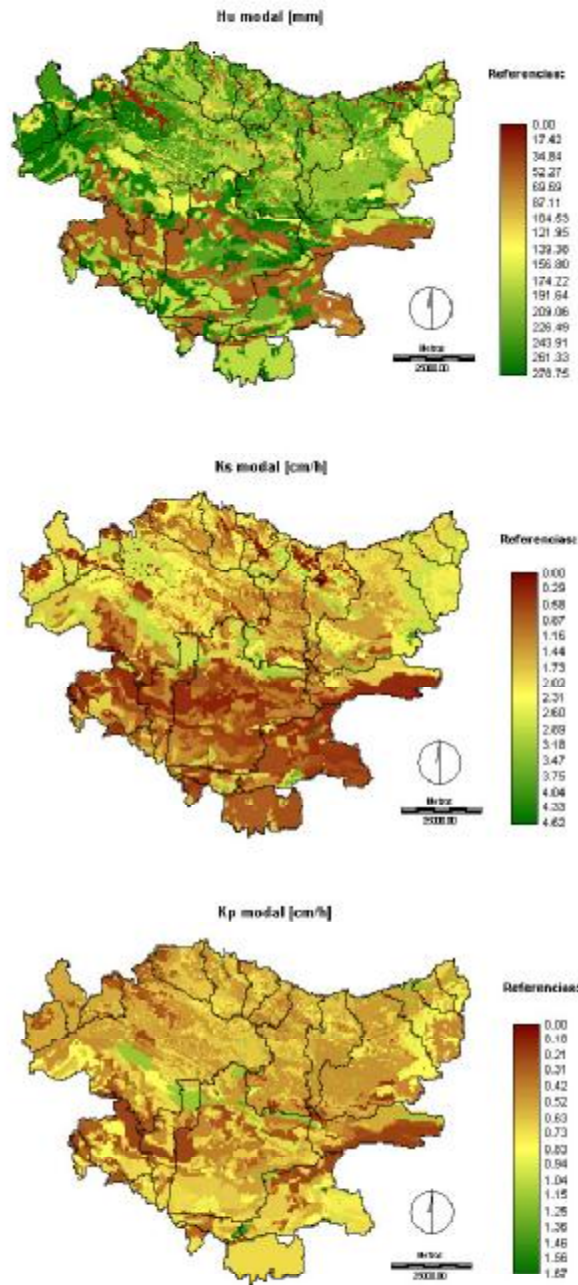


Figura 6.37: Mapa de valores modales

La distribución de los valores modales de las variables principales pueden ser analizada a partir de su distribución de frecuencias de los valores asignados a cada uno de los píxeles en los que se dividió el terreno analizado. La Figura 6.38 señala los resultados obtenidos. Los mismos indican, igual que en el caso de la cuenca del Tajo, la concentración de la mayor cantidad de píxeles dentro de unas pocas categorías de valores.

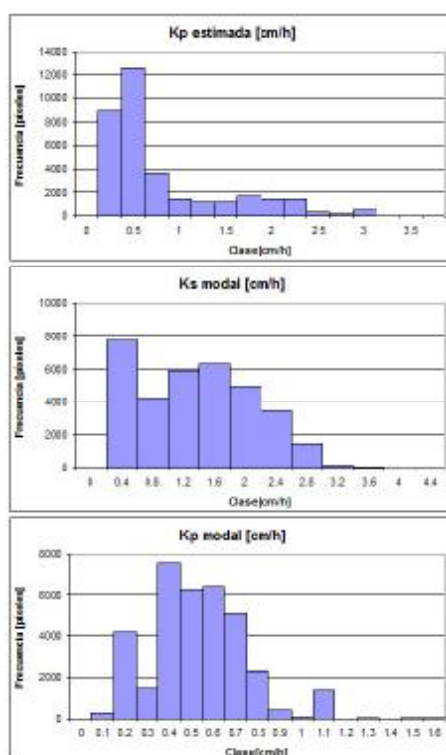


Figura 6.38: Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales

Tal como en el caso anterior, analizando histogramas y mapas de forma conjunta, queda claro que se observa tendencia a la concentración de los valores modales en pocas clases, como consecuencia de la utilización de unidades cartográficas. Sin embargo, en este caso, la mezcla de unidades de muy diferente tamaño produce un mayor grado de dispersión, en términos relativos al caso de la cuenca del Tajo.

La continuidad espacial de los valores modales de las variables principales se exponen sobre la base de los variogramas experimentales y los modelos ajustados a los mismos. Éstos se exponen a continuación.

Analizando la totalidad de la región analizada, (Figura 6.39 y Cuadro 6.44) se puede observar que la correlación espacial se reduce hasta desaparecer a partir de los 40 o 50 *km.* de distancia entre observaciones. Por otra parte, el grado de incertidumbre en las distancias cortas es alto. Lo dicho se diferencia claramente de lo observado en el caso de la cuenca del Tajo, donde la distancia a la cual se produce la pérdida de correlación espacial no es menor a los 70 *km.*, y el valor del “efecto pepita” es mucho menor.

Los variogramas indican que la variación entre valores modales es más fuerte, aún entre unidades cartográficas adyacentes.

Para explicar lo dicho, se debe tener en cuenta el grado de fragmentación de la información, además de las características ambientales de la zona. En este caso, la cantidad de unidades cartográficas presentes en el área de trabajo, es considerablemente mayor que en el caso anterior.

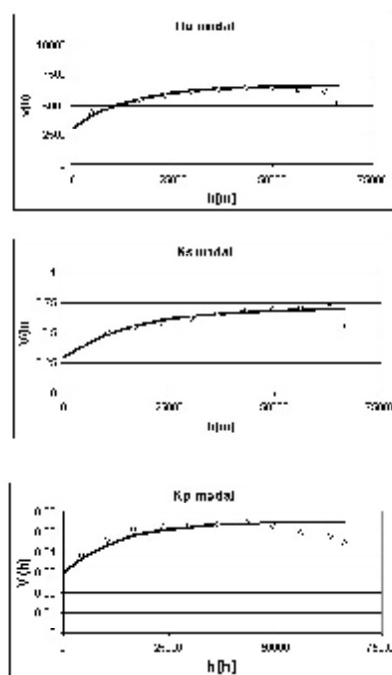


Figura 6.39: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	3100	3500	40000
Ks modal	Exponencial	0.3	0.4	50000
Kp modal	Exponencial	0.03	0.025	40000

Cuadro 6.44: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales

La distribución espacial de las variables principales se puede observar al analizar las regiones Norte (Guipúzcoa y Vizcaya) y la sur (Álava, Navarra y castilla y León). Las Figuras 6.40, y 6.41, y los Cuadros 6.45 y 6.46, exponen los resultados.

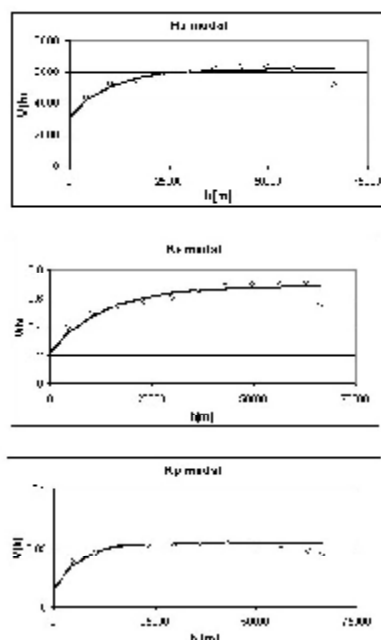


Figura 6.40: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Región Norte. Variogramas omnidireccionales

La tendencia general observada en el análisis generales continúa en éste. Por otra parte es posible observar algunas diferencias entre regiones sobre la base de la continuidad espacial. Así, tanto los valores modales de Hu como Ks presentan una mayor continuidad en la región norte que en la Sur. Sin embargo, los valores de Kp señalan un comportamiento inverso al anterior.

Los variogramas permiten indicar que las variables originales asociadas a los perfiles de suelos son más continua en la región norte que en la sur. Sin embargo, la variable asociada al substrato de los suelos es más continua en la región Sur.

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	3200	3000	30000
Ks modal	Exponencial	0.23	0.45	40000
Kp modal	Exponencial	0.015	0.04	20000

Cuadro 6.45: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Región Norte

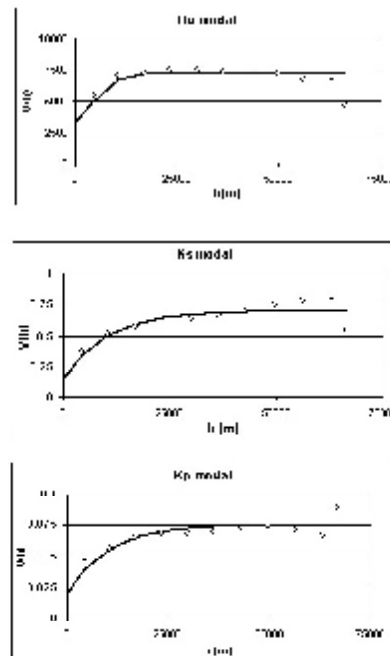


Figura 6.41: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Región Sur. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
H_u modal	Exponencial	3200	4000	15000
K_s modal	Exponencial	0.15	0.55	30000
K_p modal	Exponencial	0.02	0.055	30000

Cuadro 6.46: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Región Sur

Las Figuras 6.42, 6.43 y 6.44 y los cuadros 6.47, 6.48 y 6.49 señalan los resultados obtenidos en el análisis de tres cuencas importantes de la región analizada.

La distribución espacial de las variables principales entre cuencas importantes de la región analizada, se puede comprobar algunas diferencias de interés.

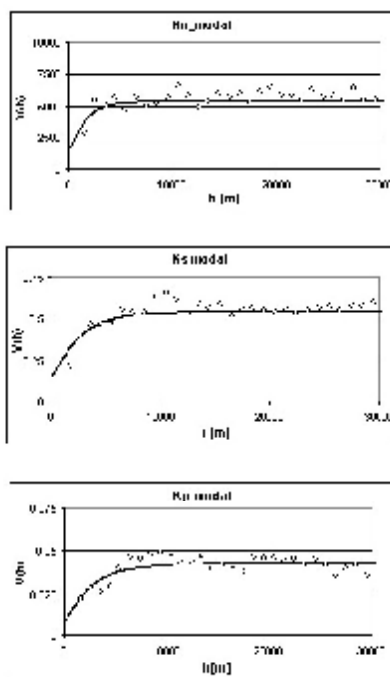


Figura 6.42: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Ibaizábal. Variogramas omnidireccionales

Los variogramas experimentales indican diferencias en la continuidad espacial entre cuencas. La correlación espacial es menor en el caso de las cuencas del Oria y el Ibaizábal (localizadas en la Región Norte), respecto a la cuenca del Zadorra (Región Sur).

En el caso de los valores de C_0 y c , tales diferencias no son en ningún caso exageradas, ya que los son similares entre sí. Sin embargo en el caso de los valores de a , las diferencia oscilan entre un 60 y un 200 %, según el caso analizado.

Las anteriores observaciones coinciden con la notable diferencia en el tamaño de las unidades cartográficas, y, por lo tanto en la distribución espacial de los valores modales.

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	1500	4000	5000
Ks modal	Exponencial	0.15	0.4	8000
Kp modal	Exponencial	0.008	0.035	8000

Cuadro 6.47: Ajuste de los variogramas omnidireccionales de los valores modales de las variables principales. Ibaizábal.

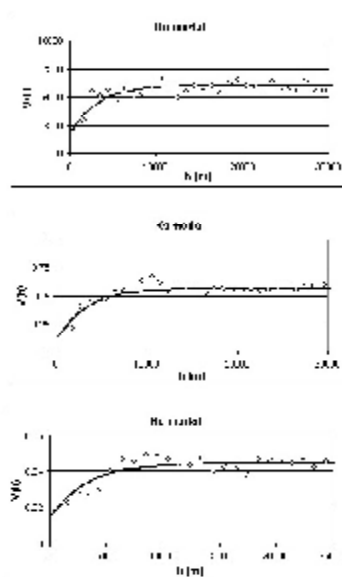


Figura 6.43: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Oria. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
H_u modal	Exponencial	1800	4300	10000
K_s modal	Exponencial	0.12	0.45	10000
K_p modal	Exponencial	0.015	0.03	10000

Cuadro 6.48: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Oria

Dentro de las diferencias entre cuencas, se debe agregar que los valores de los coeficientes del ajuste del variograma en la cuenca del Zadorra son similares a los observados para el caso de la Región Sur.

Sin embargo, lo observado en la cuenca del Zadorra no se observa en los casos de las cuencas del Ibaizábal ni en la del Oria, donde las diferencias con los coeficientes de ajuste de la región Norte son particularmente claras si se centra la atención en el caso del coeficiente a .

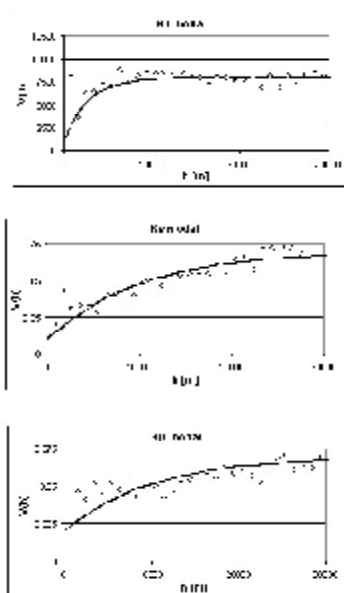


Figura 6.44: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Cuenca del Zadorra. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	1000	7000	8000
Ks modal	Exponencial	0.1	0.6	30000
Kp modal	Exponencial	0.02	0.05	30000

Cuadro 6.49: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales. Zadorra

De la misma forma que en el caso anterior, los valores de las variables principales fueron transformados a fin de lograr que las mismas presenten una distribución de frecuencias simétrica o aproximadamente simétrica respecto a su valor medio. El Cuadro 6.50 señala cada una de las transformaciones realizadas.

Variable	Transformación
Conductividad hidráulica del suelo	logaritmo natural
Conductividad hidráulica del substrato del suelo	logaritmo natural
Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo	raíz cuadrada

Cuadro 6.50: Transformaciones aplicadas a las variables principales

6.4.3.2. Variables ambientales

Las variables ambientales finalmente utilizadas en las regresiones se recogen en el Cuadro 6.51 adjunto.

Las variables ambientales del tipo de las indicadores se generaron al aplicar sobre la información cartográfica un criterio de clasificación excluyente, dividiéndolas en dos únicas categorías. Cada una de éstas fue elaborada de forma tal que represente los contrastes más claros y relevantes entre los valores de conductividad hidráulica saturada y capacidad de almacenamiento hídrico dentro del área estudiada (cuadros 6.52, 6.53 y 6.54). De esta forma, los elementos que no pertenecen a una clase fueron incluidas, por defecto, en la restante.

Las diferentes categorías fueron determinadas a priori basándose en la información auxiliar, y su validación se realizó comprobando las diferencias en los valores medios de conductividad hidráulica en cada una de ellas. De no considerarse suficiente las diferencias entre valores, el proceso se volvió a repetir hasta lograr el objetivo.

Denominación	Cuantitativa (Normalizada)	Cuantitativa (Val. originales)	Var. muda
Conductividad hidráulica superficial del suelo	No	Si	No
	Fuente: Mapa de suelos de CEE		
Cuencas sedimentarias	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Dominios estructurales	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Unidades hidrogeológicas	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Unidades estratigráficas	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Unidades litológicas	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Permeabilidad del terreno	Si	No	Si
	Fuente: EVE		
Uso del suelo I	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Uso del Suelo II	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Red fluvial principal	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Altimetría	Si	No	No
	Fuente: EVE		
Pendiente topográfica	Si	No	No
	Fuente: EVE		
Orientación de la pendiente	No	No	Si
	Fuente: EVE		
Curvatura de la pendiente	Si	No	No
	Fuente: EVE		
Índice topográfico	Si	No	No
	Fuente: EVE		
Fuentes de información	No	No	Si
	Fuente: Varias		

Cuadro 6.51: Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión

Variable	Var. muda = 1	Var. muda = 0
Cuencas sedimentarias	Cuenca del Ebro	Resto de cuencas
	Zonas con dinámicas sedimentarias y morfológicas diferentes	
Dominios estructurales	Sinclinal de Urbasa-Treviño y Sierra de Cantabria	Resto del territorio
	Zonas afectadas por el sinclinal a partir de Urbasa hacia el sur, excepto Rioja alavesa	
Unidades hidrogeológicas	Plataforma alavesa, Sinclinal de Urbasa-Treviño, sierra de Cantabria y cuenca del Ebro	Resto del territorio
	Unidades hidrogeológicas no asociadas a Guipúzcoa ni a Vizcaya	
Unidades estratigráficas	Cretácico	Otras
	Materiales asociados al intervalo cronoestratigráfico dominante en el territorio	
Unidades litológicas	Materiales calcáreos	Otras
	Materiales fracturados o fisurados, total o parcialmente afectados por procesos de karst y/o alteración por disolución	
Permeabilidad del terreno	Alta y muy alta	Infiltración < 60 %
	Materiales y terrenos asociados con altos valores de infiltración	

Cuadro 6.52: Criterios de separación de variables mudas. Geología y estructura geológica

Variable	Var. muda = 1	Var. muda = 0
Uso del suelo I	Bosque, pradera natural, pastizales, transición bosque-monte	Zonas no ocupadas ni por monte ni bosque ni praderas o pastizales
	Usos del suelo asociados a tipos contrastados de terrenos y de cubierta vegetal	
Uso del suelo II	zonas urbanas, industriales, etc., suelos cultivados o con forestación industrial	Zonas afectadas directamente por el uso humano del suelo
	Zonas con mayor o menor impacto directo del hombre sobre el suelo	

Cuadro 6.53: Criterios de separación de variables mudas. Uso de suelo

Variable	Var. muda = 1	Var. muda = 0
Altimetría	Alturas entre 600 y 1500 msnm.	Alturas entre 0 y 600 msnm.
	Distinción de las zonas elevadas respecto a las deprimidas	
Red fluvial principal	Celdas del MED asociadas al cauce principal	Celdas del MED no asociadas al cauce principal
	Terrenos con mayor desarrollo de la red fluvial	
Orientación de la pendiente	Celdas orientadas entre los 45-225 grados acimutales	Celdas orientadas entre los 225-360 grados acimutales, y zonas llanas
	Vertientes con diferente exposición a las precipitaciones y con grados de insolación contrastados	
Pendiente topográfica	Pendiente < 30%	Pendiente > 3%
	Zonas con pendientes contrastadas	
Índice topográfico	$\ln(It) < 2,0$	Otros
	Distinción de las zonas de cabeceras respecto a las de cauce principal o de mayor orden	
Curvatura de relieve	Curvatura < 0	Curvatura ≥ 0
	Distinción de las zonas cóncavas respecto de las convexas o llanas	
Fuentes de información	Regiones de Álava, Castilla-león y Navarra	Regiones de Guipúzcoa y Vizcaya
	Zonas con información original edafológica a escala gruesa, respecto a zonas con información edafológica e mayor detalle	

Cuadro 6.54: Criterios de separación de variables mudas. Topografía, relieve y red fluvial

Analizando los tres cuadros anteriores, se puede comprobar que las variables ambientales seleccionadas en este caso son similares a las empleadas en el análisis de la cuenca del Tajo. La mayor diferencia con el caso anterior reside en que en este análisis se agrega una variable indicadora (“Fuentes de información”, en el cuadro 6.51), con la cual sea posible tener en cuenta la evidente diferencia de valores según el origen de la misma.

6.4.4. Resultados de la estimación de los parámetros

6.4.4.1. Ajuste de las regresiones

Como ya se explicó, las unidades de muestreo son necesarias para la estimación de los coeficientes de la regresión del modelo de variabilidad. Estas unidades de muestreo se han obtenido por intersección de las unidades cartográficas de suelos y de las variables ambientales discretas. De todas ellas, se han utilizado las de mayor tamaño (más de 9 celdas), siendo un total de 356 unidades.

El análisis de la tendencia regional se realizó utilizando las mencionadas unidades de muestreo, obteniéndose una ecuación de ajuste lineal para cada variable principal que permitirá su estimación posterior a nivel de celda.

Los resultados se pueden observar en la Figura 6.45. En ésta, se puede comprobar que el procedimiento aplicado ha permitido reproducir de forma aceptable la variabilidad espacial del terreno, tanto en el caso de las conductividades hidráulicas como en el caso de la capacidad de almacenamiento hídrico.

La distribución espacial de las variables analizadas señala una particular correlación con la estructura tectónica de la región, observándose una clara alineación según el rumbo NO-SE, en el sector Norte, variando progresivamente a E-O en el sector Sur.

Los valores estimados de Hu muestran correspondencia con las diferencias entre los diferentes grandes tipos de suelos analizados. Así, puede observarse que en la mayoría de sectores donde los suelos descritos eran del tipo menos desarrollados, los valores de la capacidad de almacenamiento hídrico estimados eran pequeños, en comparación con los correspondientes a otros sectores del terreno analizado.

El tipo de suelos y el grado de desarrollo de los perfiles también se muestra particularmente relacionado con la distribución espacial de la conductividad hidráulica saturada del suelo. Sumado a esto, los resultados generados por el proceso de estimación propuesto permite destacar que la presencia de concentraciones de carbonato cálcico en el perfil de suelos es una característica de gran importancia en la forma en que se distribuyen los valores de Ks en el terreno. De la misma forma, la influencia ejercida por la presencia de características indicadoras de gleyzación quedan claramente expuestas en los resultados obtenidos, en el sector Norte.

En el caso de la conductividad hidráulica del substrato del suelo, los valores obtenidos por medio de la estimación permiten destacar que, además de la presencia de carbonatos y de características gleycas, la presencia de Rendinas resulta de importancia a la hora de describir su distribución espacial.

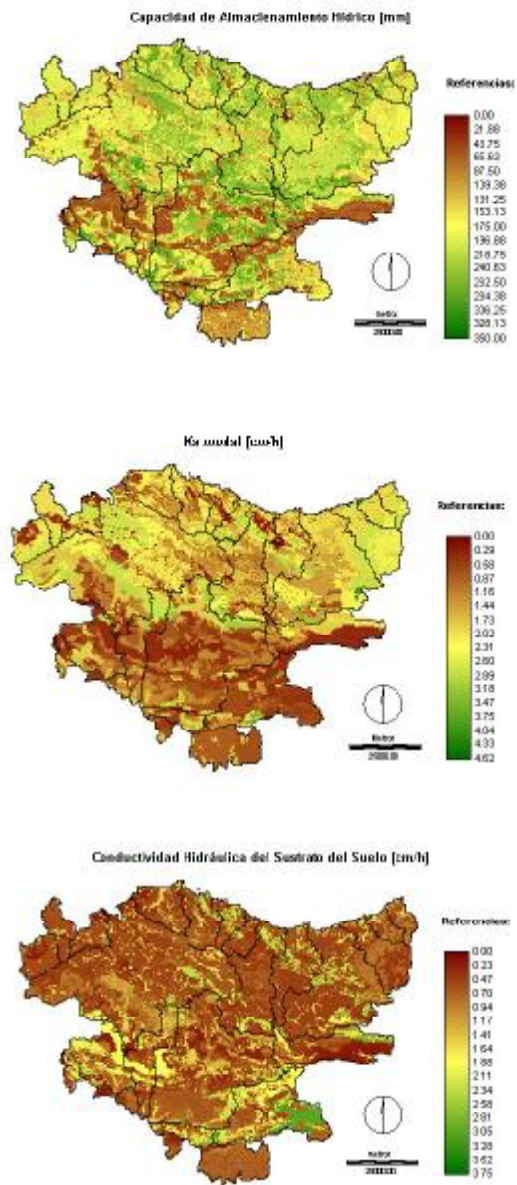


Figura 6.45: Valores estimados

Las variables ambientales y los coeficientes empleados en los ajustes de las variables principales se exponen en los cuadros 6.55, 6.56 y 6.57.

De los resultados obtenidos, es posible afirmar que, en términos generales, puede comprobarse una vez más que existen variables ambientales las cuales individualmente o combinadas con otras, forman parte de al menos dos de los tres ajustes realizados. En el presente caso, la cantidad de variables es claramente superior a la empleada en el caso de la cuenca del Tajo. Una de las razones más claras para explicar este hecho, se encuentra en las diferencias ya destacadas en la definición espacial de las unidades cartográficas de suelos. A pesar de la necesidad de contar con mayor cantidad de variables ambientales, la estimación de la tendencia ha producido resultados aceptables, tal como se pudo comprobar en la figura anterior.

Las variables representantes de entorno geológico (litología, estructura, unidades hidrogeológicas, etc.), el uso del suelo y las variables representantes de la variación local de las variables principales permiten obtener los ajustes señalados. Así, son importantes variables como la curvatura del paisaje, el valor de la capacidad de almacenamiento hídrico deducido del Mapa de Suelos de la CE o la presencia de bosques y/o matorrales. La interacción del uso del suelo con el tipo estructura tectónica, o entre la presencia de terrenos karstificados y la evidencia de fracturación regional, son elementos del terreno que participan en la explicación de la variación espacial en las tres variables principales.

Al observar el valor de los distintos coeficientes de ajuste, se puede comprobar que las variables ambientales relacionadas con la morfología del terreno (índice topográfico, hipsometría, etc.) tienen un peso determinante en la obtención del ajuste. De la misma forma, la estructura tectónica, la estratigrafía y el uso del suelo son las variables indicadoras que aisladamente favorecen al ajuste. En cuanto a las interacciones, la más destacada es la que relaciona a la estructura tectónica con el uso del suelo.

En el caso concreto de la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, la explicación de la variación espacial se debe a tres tipos de variables. En primer lugar son fundamentales las variables de significado regional, directamente ligado al patrón generado por el entorno geológico, como es la litología o la distribución de las grandes unidades hidrogeológicas. Por otra parte, el uso del suelo se destaca con claridad en la estimación de esta variable. Finalmente, La explicación local de la distribución de esta variable principal se debe a la topografía del terreno. Las interacciones entre variables indicadoras se generan a partir de la combinación de variables ambientales ligadas al entorno geológico. Las mismas se relacionan entre sí, y también con las variables representativas de la morfología del terreno, como la pendiente topográfica o la orientación del terreno, y con el uso del suelo. Resulta importante destacar que la diferencia entre fuentes de información es claramente importante en la estimación.

Estimación de $SQRT(Hu) * 1000$	
Variable	β
Constante	10114.3
Variables continuas	
MED * 1000	9.311121
Variables discretas	
Cuencas sedimentarias	1191.83
Unidades hidrogeológicas	2023.31
Litología	16.43
Permeabilidad según EVE	-1054.64
Uso del suelo I	4405.28
Uso del suelo II	2946.04
Interacción entre variables discretas	
Tectónica * Estratigrafía	-2508.36
Tectónica * Litología	1249.38
Tectónica * Estratigrafía	1672.75
Tectónica * Hipsometría	-2508.36
Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	4734.23
Unidades hidrogeológicas * Litología	-2492.8
Unidades hidrogeológicas * Permeabilidad según EVE	-4090.48
Unidades hidrogeológicas * Uso I	-1265.53
Unidades hidrogeológicas * Uso II	-1736.23
Unidades hidrogeológicas * Hipsometría	-1057.74
Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	-1291.94
Unidades hidrogeológicas * pendiente del terreno	812.82
Estratigrafía * Litología	-1696.01
Estratigrafía * Uso II	1305.15
Estratigrafía * tipo de información	-1427.94
Litología * permeabilidad según EVE	839.70
Litología * Uso I	-924.35
Litología * Uso II	-883.22
Permeabilidad según EVE * Uso I	-1382.86
Permeabilidad según EVE * Pendiente del terreno	1423.52
Permeabilidad según EVE * tipo de información	3414.39
Uso (i) * Uso II	-3545.39
Uso (i) * Tipo de información	-2408.67
Orientación del terreno * Tipo de información	904.58

Cuadro 6.55: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo

La estimación de la conductividad hidráulica saturada del suelo comparte características en común con la estimación anterior, lo cual es, en primera instancia, es aceptable dado que ambas variables pertenecen al mismo medio físico: el perfil del suelo. Sin embargo existen algunas diferencias importantes. Por una parte, el uso del suelo pierde capacidad de explicación, mientras que las variables representativas de la variación local del relieve aumentan claramente su importancia. La tendencia general de los valores de conductividad representados en el Mapa de Suelos de la CE. son importantes en este caso.

En el caso de las interacciones, al igual que en el estudio de Hu , las variables representativas de la configuración global del terreno, son claramente importantes, tanto por sus relaciones entre sí como por su relación con el relieve del terreno y el uso del suelo. Vuelve a destacarse la variable indicadora referida a las diferentes fuentes de información utilizadas en este estudio.

En la estimación de la distribución de la conductividad hidráulica del sustrato, se observan similitudes con la elaborada para Hu . Las mismas se encuentran en la importancia de las variables del entorno geológico sobre las variaciones locales del relieve. Otra coincidencia no sólo con la estimación de Hu sino también con la de Ks es la importancia que posee la diferenciación de las fuentes de información. En el otro sentido, una de las diferencias más claras se encuentra en la menor importancia en la explicación que posee el uso del suelo.

En la estimación de Kp , como en el caso de Ks y Hu , la estimación global de la distribución de la permeabilidad elaborada por el EVE resulta importante en el ajuste. Dado su carácter global, basado en la observación a campo y la experiencia previa del EVE, esta variable pudo ser aplicada en la explicación de variables principales como ésta, y permite establecer relaciones mutuas entre ellas.

Las tres variables analizadas representan diferentes cualidades del terreno en dos ambientes relacionados entre sí: suelo y sustrato de suelo. Así, a parte de las variables e interacciones que están presentes en los tres casos, el proceso de estimación propuesto en esta tesis produce resultados que permiten destacar las diferencias entre variables. En el caso de Hu el uso del suelo es una variable ambiental que destaca con claridad las características del terreno que permiten diferenciar a los suelos sobre la base de su capacidad de almacenamiento hídrico. En el caso de Ks , el relieve local posee un rol fundamental, por generar las condiciones locales de drenaje, con las cuales es posible describir la conductividad hidráulica del suelo. Finalmente, en el caso de Ks , la configuración geológica del terreno cumple un rol lógicamente fundamental para describir adecuadamente su distribución espacial.

Una mención aparte, merece el tener en cuenta la fuente de información, en un caso como éste, donde la heterogeneidad es la característica distintiva del caso.

Estimación de $\ln(Ks) * 1000$	
Variable	β
Constante	-159.21
Variables continuas	
Curvatura del paisaje	-9.36926
Conductividad superficial del suelo según FAO * 1000	9.73265
MED * 1000	-19.8108
Pendiente del terreno * 1000	5.88205
Variables discretas	
Estratigrafía	-212.862
Permeabilidad según EVE	-270.783
Uso del suelo II	67.838
Interacción entre variables discretas	
Tectónica * Estratigrafía	427.19
Tectónica * Uso del suelo I	-286.356
Tectónica * Hipsometría	307.87
Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	226.03
Unidades hidrogeológicas * Litología	-136.459
Unidades hidrogeológicas * Uso II	-182.81
Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	-220.18
Unidades hidrogeológicas * Pendiente del terreno	226.51
Estratigrafía * Litología	-366.36
Estratigrafía * Hipsometría	339.28
Estratigrafía * permeabilidad según EVE	-167.84
Litología * Uso I	-71.33
Litología * Red hidrográfica	71.42
Permeabilidad según EVE * Uso I	-224.94
Permeabilidad según EVE * hipsometría	235.928
Permeabilidad según EVE * tipo de información	105.12
Uso I * Hipsometría	201.82
Hipsometría * Pendiente del terreno	199.20
Orientación del terreno * Pendiente del terreno	172.31
Orientación del terreno * tipo de información	138.15
Pendiente del terreno * Tipo del terreno	-263.88

Cuadro 6.56: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de conductividad hidráulica saturada del suelo

Estimación de $\ln(Kp) * 1000$	
Variable	β
Constante	287.37
Variables continuas	
MED * 1000	-3.80709
Variables discretas	
Cuencas sedimentarias	581.67
Tectónica	463.26
Unidades hidrogeológicas	-473.67
Estratigrafía	-272.178
Permeabilidad según EVE	-148.86
Interacción entre variables discretas	
Tectónica * Estratigrafía	-732.85
Tectónica * permeabilidad según EVE	528.29
Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	425.16
Unidades hidrogeológicas * Permeabilidad según EVE	-489.29
Unidades hidrogeológicas * Uso I	322.82
Unidades hidrogeológicas * Uso II	-175.96
Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	-162.23
Estratigrafía * Litología	63.01
Estratigrafía * Permeabilidad según EVE	267.42
Estratigrafía * Hipsometría	267.42
Estratigrafía * Pendiente del terreno	-188.72
Estratigrafía * Tipo de información	-178.82
Litología * Uso I	-135.08
Litología * Hipsometría	-124.53
Litología * Hipsometría	-124.53
Litología * Pendiente del terreno	227.56
Litología * Tipo de información	-178.82
Uso I * Índice topográfico	40.413
Uso II * Tipo de información	-194.65
Hipsometría tipo de información	101.16
Orientación del terreno * Tipo de información	120.27

Cuadro 6.57: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de conductividad hidráulica saturada del substrato suelo

6.4.5. Análisis de la precisión en las estimaciones

En primer lugar, el Cuadro 6.58 señala el valor del coeficiente de determinación par las tres variables principales.

Los resultados expuestos indican que la precisión de los ajustes obtenidos es ligeramente inferior a los del caso de la cuenca del tajo. Sin embargo, en todos los casos se logra explicar más del 80 % de la variabilidad analizada.

Variable principal	R^2
Capacidad de almacenamiento hídrico	87.14 %
Conductividad hidráulica del suelo	92.60 %
Conductividad hidráulica del sustrato	81.46 %

Cuadro 6.58: Precisión de los ajustes realizados

La evolución de los valores de R^2 a medida que se agregaron las diferentes variables ambientales a la estimación puede observarse en los cuadros 6.59, 6.60 y 6.61 y en el Cuadro 6.46

Los gráficos de la Figura 6.46 indican que, la evolución del ajuste fue más progresiva que la observada en el caso de la cuenca del Tajo. Tal observación es especialmente clara en el caso del ajuste de KP , en la cual a partir del 45 %, la explicación avanza con particular lentitud a medida que se agregan variables ambientales al ajuste.

El ajuste de Hu presenta una mejor evolución que el antes mencionado. Sin embargo, la mejor evolución de R^2 y MSE se observa en el juste de Ks , donde recién a partir de algo más del 75 % de la explicación de la variación, se produce la disminución de la velocidad de evolución en el ajuste.

Analizando los cuadros 6.59, 6.60 y 6.61, se pueden extraer conclusiones de interés para el análisis.

En primer lugar, las variables ambientales que ya habían sido destacadas en el análisis general del ajuste de las variables principales, son claramente importantes, también, en la evolución de dichos ajustes. Así, En caso de Hu las variables que representan al uso del suelo fueron, de forma aislada o en interacciones con otras, de las primeras en ser incluidas en el ajuste. Esta variable indicadora continúa siendo de importancia prácticamente en todo el proceso de ajuste.

De la misma forma que la antes mencionada, las variables que representan al entorno geológico del territorio fueron variables sumamente importantes en la evolución del ajuste. Además, se destaca la variable que representa a las fuentes de información.

En el caso de Ks , resulta claro comprobar que los valores de conductividad hidráulica provenientes el mapa de suelos del la C.E. son una base fundamental para

establecer una tendencia en la distribución espacial. Por otra parte, el relieve el uso del suelo es incorporado solamente a partir de la etapa en la cual el ajuste supera el 80 % de explicación de la variabilidad observada. El origen de la información es aquí también una de las primeras variables ambientales a ser incorporadas en el ajuste.

Finalmente, en el caso del ajuste de Kp , el origen de la información es una variable necesaria para el ajuste a partir que el valor supera el 66 % de explicación de la variabilidad. El entorno geológico y el relieve son variables necesarias para que el valor de R^2 supere el 70 %.

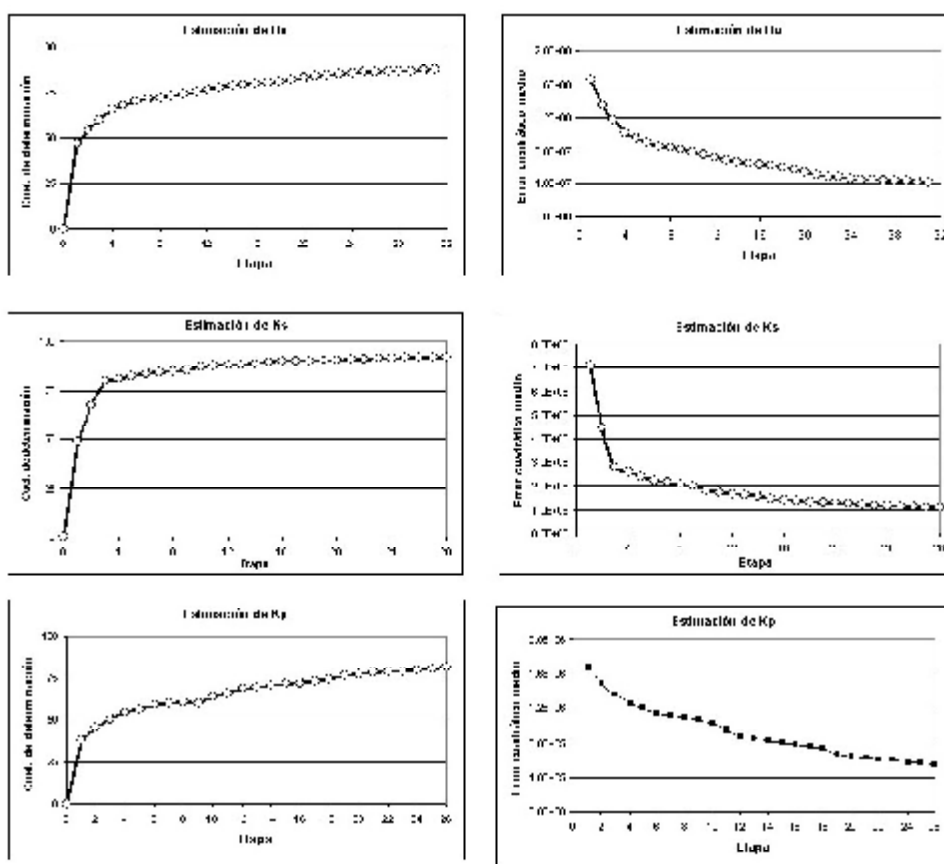


Figura 6.46: Evolución del los ajustes según R^2 y el MCE

Orden	Nombre	R2	MSE
1	Unidades hidrogeológicas * Hipsometría	46.97	1.65E+08
2	Litología * Uso I	54.31	1.35E+08
3	Uso1 * Tipo de información	60.16	1.18E+08
4	Permeabilidad según EVE	65.90	1.01E+08
5	Uso del suelo I	67.87	9.58E+07
6	Estratigrafía * Uso II	70.09	8.97E+07
7	Litología * Uso II	71.55	8.56E+07
8	Tectónica * Estratigrafía	72.15	8.40E+07
9	Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	73.04	8.15E+07
10	Unidades hidrogeológicas * Permeabilidad (EVE)	74.04	7.87E+07
11	Permeabilidad (EVE) * Tipo de información	75.18	7.55E+07
12	Litología * Permeabilidad (EVE)	76.35	7.19E+07
13	Unidades hidrogeológicas * Litología	77.46	6.88E+07
14	Tectónica * Estratigrafía	78.36	6.62E+07
15	Estratigrafía * Tipo de información	79.04	6.43E+07
16	Tectónica * Litología	79.55	6.30E+07
17	Uso I * Uso II	80.11	6.14E+07
18	Uso del suelo II	80.77	5.95E+07
19	Unidades hidrogeológicas * Uso II	81.58	5.72E+07
20	Unidades hidrogeológicas	82.73	5.38E+07
21	Permeabilidad (EVE) * Uso I	83.83	5.05E+07
22	Unidades hidrogeológicas * Pendiente del terreno	84.29	4.82E+07
23	Estratigrafía * Litología	84.74	4.80E+07
24	Litología	85.36	4.62E+07
25	Permeabilidad (EVE) * Pendiente del terreno	85.67	4.53E+07
26	Unidades hidrogeológicas * Uso I	85.9	4.47E+07
27	Modelo de elevación del terreno	86.08	4.43E+07
28	Tectónica * Hipsometría	86.26	4.38E+07
29	Cuencas sedimentarias	86.46	4.33E+07
30	Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	86.65	4.29E+07
31	Orientación del terreno * Tipo de información	87.14	4.14E+07

Cuadro 6.59: Evolución del ajuste de Hu

Orden	Nombre	R2	MSE
1	Conductividad hidráulica del suelo según FAO	48.69	7.10E+06
2	Estratigrafía * Litología	67.97	4.44E+06
3	Pendiente del terreno * Tipo de información	80.00	2.79E+06
4	Litología * Permeabilidad (EVE)	81.39	2.60E+06
5	Tectónica * Estratigrafía	82.83	2.41E+06
6	Unidades hidrogeológicas * Uso II	83.92	2.26E+06
7	Unidades hidrogeológicas * Pendiente del terreno	84.65	2.17E+06
8	Permeabilidad (EVE) * Uso I	85.25	2.09E+06
9	Estratigrafía * Hipsometría	85.73	2.02E+06
10	Modelo de elevación del terreno	87.34	1.80E+06
11	Pendiente del terreno	87.89	1.72E+06
12	Tectónica * Hipsometría	88.31	1.67E+06
13	Estratigrafía	88.64	1.63E+06
14	Permeabilidad (EVE) * Hipsometría	89.11	1.56E+06
15	Permeabilidad según EVE	89.76	1.48E+06
16	Curvatura del paisaje	90.25	1.41E+06
17	Uso II	90.48	1.38E+06
18	Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	90.66	1.36E+06
19	Uso I * Hipsometría	91.00	1.31E+06
20	Unidades hidrogeológicas * Litología	91.21	1.28E+06
21	Tectónica * Uso I	91.4	1.26E+06
22	Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	91.57	1.24E+06
23	Orientación del terreno * Tipo de información	91.98	1.18E+06
24	Litología * Red hidrográfica	92.13	1.16E+06
25	Litología * Uso I	92.25	1.15E+06
26	Orientación del terreno * Pendiente del terreno	92.37	1.14E+06
27	Hipsometría * Pendiente del terreno	92.50	1.12E+06
28	Permeabilidad (EVE) * Tipo de información	92.60	1.11E+06

Cuadro 6.60: Evolución del ajuste de Ks

Orden	Nombre	R2	MSE
1	Litología * Hipsometría	38.27	1.68E+06
2	Unidades hidrogeológicas * Permeabilidad (EVE)	45.72	1.48E+06
3	Litología * Uso I	50.29	1.36E+06
4	Tectónica * Permeabilidad (EVE)	54.27	1.25E+06
5	Permeabilidad según EVE	56.33	1.20E+06
6	Cuencas sedimentarias	58.62	1.14E+06
7	Estratigrafía * Hipsometría	59.8	1.11E+06
8	Estratigrafía	60.66	1.09E+06
9	Modelo de elevación del terreno	60.05	1.05E+06
10	Estratigrafía * Permeabilidad (EVE)	63.7	1.01E+06
11	Tectónica * Estratigrafía	65.85	9.54E+05
12	Estratigrafía * Tipo de información	68.64	878878
13	Litología * Tipo de información	69.64	853462
14	Uso II * Tipo de información	70.81	822906
15	Tectónica	71.68	800761
16	Uso I * Índice topográfico	72.44	781444
17	Estratigrafía * Litología	73.26	760643
18	Unidades hidrogeológicas	74.21	735548
19	Unidades hidrogeológicas * Estratigrafía	76.4	6.75E+05
20	Hipsometría * Tipo de información	77.27	652209
21	Unidades hidrogeológicas * Uso I	78.11	6.30E+05
22	Unidades hidrogeológicas * Uso II	78.8	6.12E+05
23	Unidades hidrogeológicas * Orientación del terreno	79.1	6.05E+05
24	Orientación del terreno * Tipo de información	80.16	576318
25	Litología * Pendiente del terreno	80.34	5.73E+05
26	Estratigrafía * Pendiente del terreno	81.46	5.42E+05

Cuadro 6.61: Evolución del ajuste de Kp

Los residuales generados en los ajustes a la información son expuestos en la Figura 6.47. En ésta se pueden observar dos características clave. Por una parte, la distribución de los residuales es relativamente uniforme a lo largo del rango de valores observados, en las tres variables principales analizadas. Por otra parte, se puede comprobar, al igual que en el caso de la cuenca del Tajo, que a medida que aumenta el valor de ponderación del valor muestral analizado, los valores de los residuales se reducen.

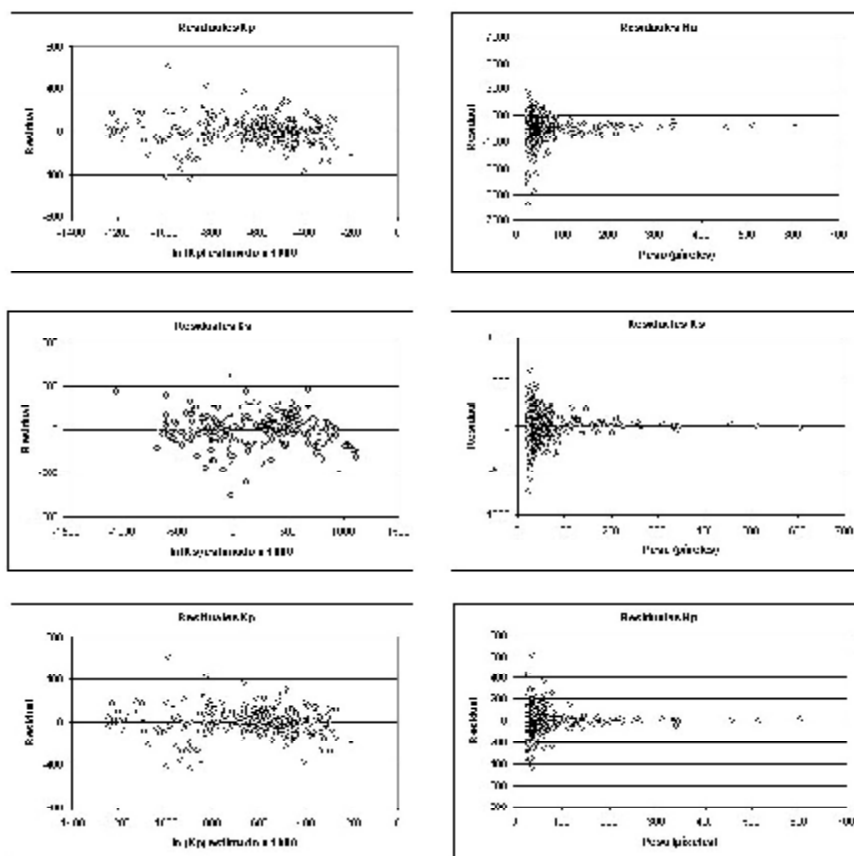


Figura 6.47: Residuales

Al igual que en el caso anterior, se analizó la distribución de frecuencias de los valores de los píxeles e las tres capas temáticas generadas por al estimación de las variables principales.

En este caso se vuelven a comprobar los efectos de la distribución celda a celda de los valores de las variables principales puede observarse en la Figura 6.48.

Comparando los resultados anteriores los expuestos en la Figura 6.38 se puede comprobar que los resultados del proceso de estimación propuesto generan histogramas en los cuales la distribución de frecuencias es también claramente más armónica. Esto se destaca con claridad del caso donde los valores modales son distribuidos mediante unidades cartográficas.

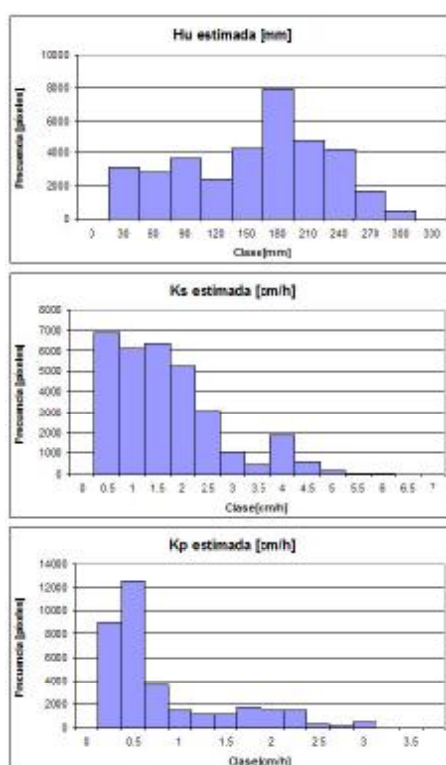


Figura 6.48: Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales

Una vez analizada la precisión del ajuste de forma unidimensional, los variogramas experimentales realizados sobre las diferentes estimaciones permitirán analizar los resultados espacialmente.

El gráfico 6.49 y el Cuadro 6.62 señalan los resultados del variograma omnidireccional practicado sobre la totalidad del área de trabajo. Las variables del modelo ajustado, son similares a los modelos ajustados a los variogramas e las variables modales. La mayor diferencia se encuentra en el caso de la variable K_s , particularmente en los valores de c_0 y c , y en menor medida en el de a .

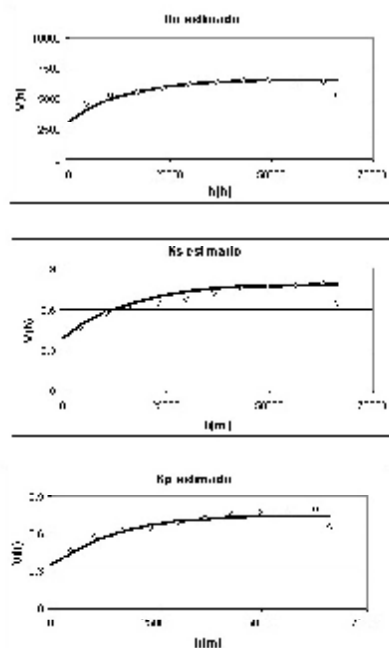


Figura 6.49: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	3100	3500	40000
Ks modal	Exponencial	0.4	0.4	50000
Kp modal	Exponencial	0.35	0.4	45000

Cuadro 6.62: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales

Las figuras 6.50 y 6.51, y los cuadros 6.63 y 6.64 señalan los resultados análisis geoestadístico a las regiones Norte y Sur, respectivamente.

En el sector norte, se observa que los modelos ajustados a los variogramas experimentales son similares a los observados en los valores modales, sobre todo en el caso de Hu y Ks . Las mayores diferencias se encuentran en el ajuste de Kp , donde el valor de c es claramente mayor que el estimado en los valores modales. esto produce una ligera diferencia en la curvatura del variograma, lo cual se enciende que la forma en que se va perdiendo correlación espacial es, en el caso de

las estimaciones de Kp y algo más gradual respecto a la observada en los valores modales. Idénticas características se pueden observar en los resultados expuestos para el Sector Sur.

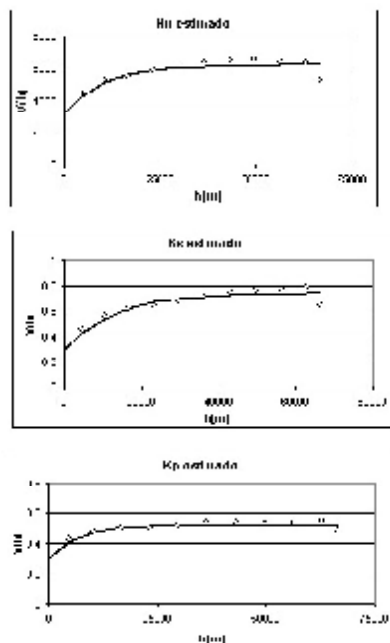


Figura 6.50: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Región Norte. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu modal	Exponencial	3200	3000	30000
Ks modal	Exponencial	0.3	0.45	40000
Kp modal	Exponencial	0.3	0.22	20000

Cuadro 6.63: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Región Norte.

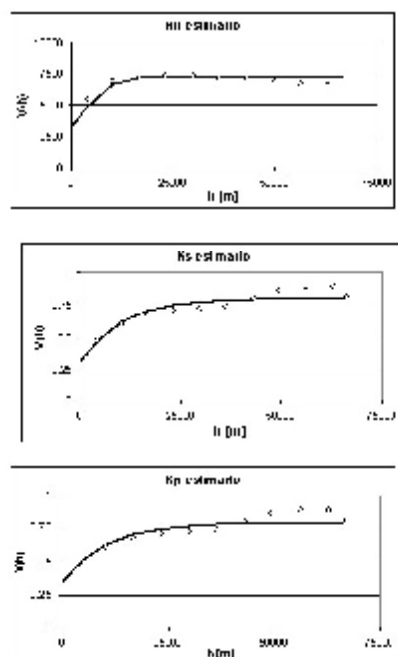


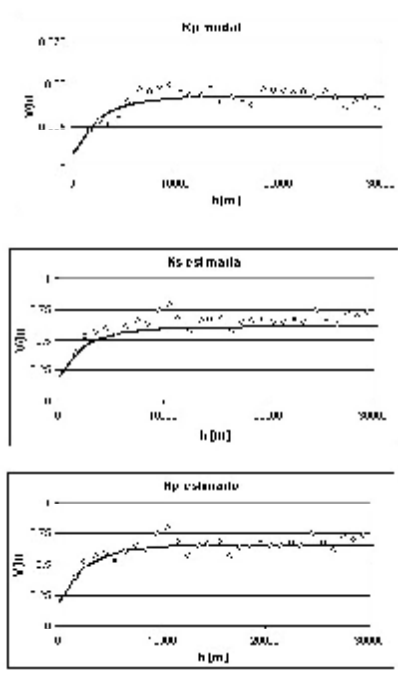
Figura 6.51: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Región Sur. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	3200	4000	15000
Ks modal	Exponencial	0.3	0.5	30000
Kp modal	Exponencial	0.35	0.44	30000

Cuadro 6.64: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Región Sur.

Analizando los variogramas omnidireccionales experimentales de las variables estudiadas en diferentes cuencas (Ibaizábal, Oria y Zadorra, respectivamente), se observa que se repiten las características ya observadas en el Sector Norte y Sur. Las figuras 6.52, 6.53 y 6.54, y los cuadros 6.65, 6.66 y 6.67, señalan los resultados obtenidos. Así, los modelos ajustados a las estimaciones de Hu y Ks son similares o iguales a las observadas en los valores modales, especialmente en el caso de la cuenca del Ibaizábal y del Oria. En ambas cuencas se reproduce, a su vez, las pequeñas divergencias en los valores de c , para el caso de la estimación de Kp , tal como se apuntó anteriormente.

Dentro de un contexto de general congruencia con las observaciones hechas en los valores modales, las estimaciones realizadas en la cuenca del Zadorra guardan algunas diferencias a destacar. En este caso, las diferencias se encuentran principalmente en los valores de c en los modelos ajustados a los variogramas de las estimaciones de Ks y Kp . En ambos casos, y como ya se ha explicado, la curvatura de los variogramas es mayor que en el caso de lo observado en los valores modales.



3200

Figura 6.52: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Ibaizábal. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu modal	Exponencial	1500	4000	5000
Ks modal	Exponencial	0.2	0.4	8000
Kp modal	Exponencial	0.2	0.45	8000

Cuadro 6.65: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Ibaizábal

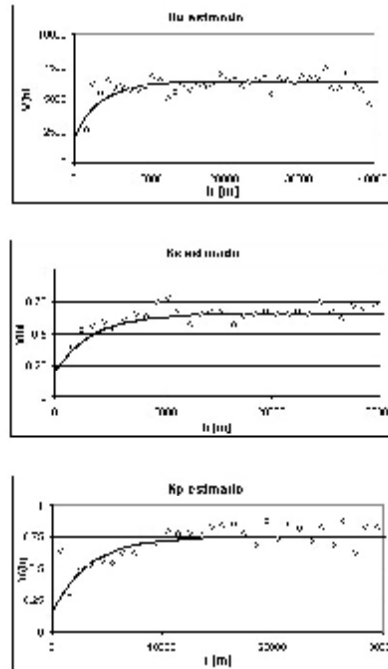


Figura 6.53: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Oria. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	2000	4300	10000
Ks modal	Exponencial	0.2	0.45	10000
Kp modal	Exponencial	0.15	0.6	10000

Cuadro 6.66: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Oria

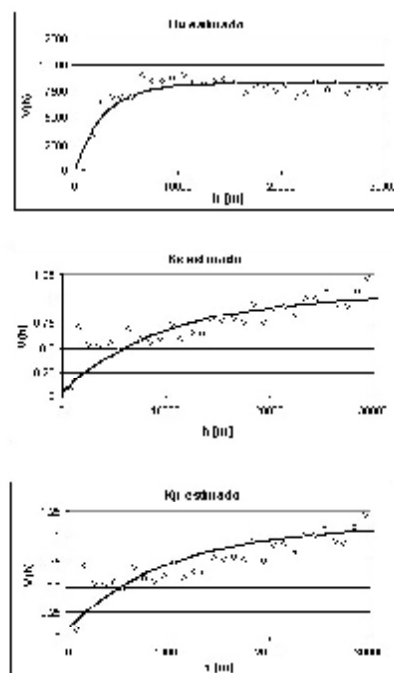


Figura 6.54: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Zadorra. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	200	8000	8000
Ks modal	Exponencial	0.05	1	30000
Kp modal	Exponencial	0.1	1	30000

Cuadro 6.67: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales. Zadorra

Al igual que en el caso de la cuenca del Tajo, las estimaciones señalan la presencia clara del efecto pepita, el cual sólo es reducido en el caso de la cuenca del Zadorra.

Finalmente, puede comprobarse en el caso analizado, las estimaciones han logrado reproducir adecuadamente la información modal que se poseía, a pesar de las especiales características de las mismas. Además, queda claro que es posible integrar información proveniente de diferentes fuentes y definida a escalas diferentes entre sí, siempre y cuando el análisis tenga en cuenta esta diferencia.

6.4.6. Calibración

6.4.6.1. Ibaizábal

Para la calibración, en la cuenca del río Ibaizabal se disponían de muchas estaciones de aforos aptas para esta tarea. Finalmente, se empleó la estación NB05 Abusu localizada en el tramo final del río con un área aproximada de 1021.00 km^2 . La información proveniente de las estaciones localizadas aguas arriba de la estación fue utilizada durante el proceso de validación.

El conjunto de factores correctores encontrados durante la optimización se muestra en el Cuadro 6.68. Observando los resultados, los factores se encuentran en rangos razonables y algunos de ellos son muy parecidos a lo observado en cuencas vecinas.

Variable	Factor corrector
Almacenamiento capilar	0.62
Evapotranspiración	1.00
Infiltración	0.035
Escorrentía	0.438
Percolación	0.024
Flujo subsuperficial	675.5
Pérdidas subterráneas	0.001
Pérdidas subterráneas	58.1
Velocidad de flujo	1.56

Cuadro 6.68: Factores correctores obtenidos mediante calibración en la estación NB05 Abusu, en la cuenca del río Ibaizábal.

Los índices calculados para establecer la calidad del conjunto de factores correctores obtenidos durante la calibración se puede apreciar en el Cuadro 6.69. En general, los resultados son satisfactorios ya que los índices de Nash-Shutcliffe a nivel diario y mensual (R_N^2 diario y R_N^2 mensual, respectivamente) son muy cercanos a 1. También se aprecia que el ajuste del volumen es muy bueno durante el período de calibración.

Estación	Área [Km^2]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm^3	Vol. est. Hm^3	R_N^2 diario	R_N^2 mensual
NB05 Abusu	1021.00	01/07/97	31/07/99	334.272	1311.719	0.923	0.962

Cuadro 6.69: Resumen de las características del evento durante el periodo de calibración en la cuenca del río Ibaizabal.

En la Figura 6.55 se muestran un ejemplo con los resultados a nivel diario obtenidos durante la calibración. Se puede apreciar el buen ajuste del flujo base y la buena

forma de las recesiones y los caudales punta, mostrando que el ajuste diario es muy bueno.

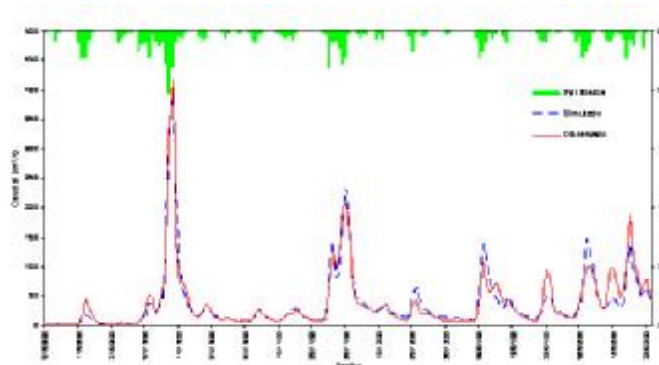


Figura 6.55: Hidrograma observado y simulado con los factores correctores de calibración.

En términos generales, se puede afirmar que los resultados obtenidos en la calibración del modelo en esta cuenca son buenos. En consecuencia, se procedió a realizar una validación para determinar si los factores seleccionados pueden ser empleados durante un eventual proceso de simulación.

El proceso de validación espacio-temporal fue posible de realizar empleando la información de las estaciones localizadas aguas arriba de Abusu, dado que se dispuso de información suficiente. En el Cuadro 6.70 se observa un resumen con los indicadores obtenidos durante la validación para las estaciones estudiadas. Los resultados indican que la validación espacial fue también satisfactoria en la mayoría de los casos.

Estación	Área [Km ²]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm ³	Vol. est. Hm ³	R _N ² diario	R _N ² mensual
CHN163 Lemona	256.00	01/02/93	31/12/00	1642.594	1502.378	0.684	0.816
NB04 Zarátamo	506.50	19/08/93	20/08/95	496.682	502.780	0.943	0.986
NB01 Saratxo	93.50	01/10/95	01/08/99	139.251	141.164	0.691	0.878
164 Lemoa	143.50	22/07/93	31/12/00	943.733	614.515	0.212	0.687

Cuadro 6.70: Resumen de las características del evento durante el período de validación espacio-temporal en la cuenca del río Ibaizabal empleando los factores correctores de la estación NB05 Abusu.

Finalmente, tanto la calibración como la validación en la cuenca del Ibaizabal generaron resultados satisfactorios, con los cuales es posible afirmar que se observa

un ajuste correcto en el volumen, en diferentes puntos de aforo de la cuenca, utilizando las estimaciones de Hu , Ks y Kp ya expuestas en esta tesis.

6.4.6.2. Oria

Las calibraciones en la cuenca del río Oria se realizaron tanto a nivel de toda la cuenca, como al nivel de diferentes subcuencas. Finalmente, para la cuenca total se ha empleado la estación identificada como D9Z1 Lasarte que tiene un área asociada de 805.5 km^2 , y está situada en el tramo final del río, hacia su desembocadura al mar. Los resultados se pueden observar en la Cuadro 6.71.

Variable	Factor corrector
Almacenamiento capilar	1.64
Evapotranspiración	1.19
Infiltración	0.037
Escorrentía	0.135
Percolación	0.026
Flujo subsuperficial	398.7
Pérdidas subterráneas	0.00
Pérdidas subterráneas	30.1
Velocidad de flujo	1.22

Cuadro 6.71: Factores correctores obtenidos en la estación D9Z1 Lasarte.

Los factores correctores encontrados en la estación Lasarte se encuentran dentro de los rangos razonables, aunque los correspondientes almacenamiento capilar y la evapotranspiración pueden ser un poco elevados. En el Cuadro 6.72 se observan algunos indicadores para estimar la calidad del conjunto de factores correctores obtenidos durante la calibración. En general, los resultados obtenidos son muy buenos ya que el índice de Nash y Shutcliffe a nivel mensual y el índice diario están muy cerca a uno.

Estación	Área [Km^2]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm^3	Vol. est. Hm^3	R_N^2 diario	R_N^2 mensual
D9Z1 Lasarte	805.50	04/01/00	31/12/00	590.03	597.93	0.931	0.981

Cuadro 6.72: Resumen de resultados de la calibración en la cuenca del río Oria.

Tanto la estimación de volúmenes de esurrimiento como los índices de Nash-Shutcliffe se observaron buenos resultados, a pesar de tratarse de un período relativamente corto.

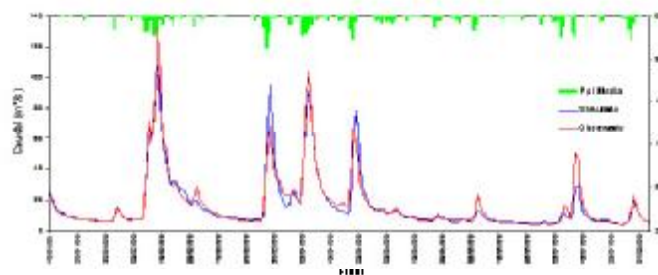


Figura 6.56: Hidrogramas diarios parciales observado y simulado de calibración en la estación D9Z1 Lasarte

En la Figura 6.56 se muestra un ejemplo con los resultados a nivel diario obtenidos durante la calibración. Se puede apreciar el buen ajuste del flujo base y la buena forma de las recesiones mostrando que el ajuste diario es muy bueno.

Dado que, como se observó, los factores correctores se encuentran dentro del rango esperado, se procedió a realizar una validación espacial y temporal para comprobar su consistencia y determinar si pueden ser empleados durante el proceso de simulación.

Para el proceso de validación espacial se emplearon las estaciones de Alegia y Andoain en el propio cauce principal del Oria y las estaciones Estanda (en el río Estanda), Agauntza (en el río Agauntza), Belauntza (en el río Zelai) y Andoain (en el río Leizarán). Este período temporal es algo mayor al empleado durante la calibración dado que se dispone de la información necesaria en estos casos. Un resumen con los resultados de la validación espacial se puede observar en el Cuadro 6.73, en donde se aprecia que el error en el volumen varía considerablemente, presentando exceso de volumen simulado en las estaciones C5Z1 Alegia y C2Z1 Agauntza, mientras que las simulaciones presentan deficit en el volumen simulado en la estación N080 Andoain. En todos los casos los resultados a nivel diario son satisfactorios.

En conclusión, en función de los resultados obtenidos, se considera que los factores correctores obtenidos en la calibración en la estación D9Z1 Lasarte son aceptables. Loas mismos pueden interpretarse como la consecuencia de una correcta estimación de las variables principales en este sector del territorio analizado.

6.4.6.3. Zadorra

En la cuenca del río Zadorra se encuentran varias estaciones de aforo y simplemente se ha seleccionado la que se encuentra localizada hacia aguas abajo para la calibración. Esta estación corresponde a Arce con un área de 1357.25 km^2 . Las demás estaciones se han dejado para las respectivas validaciones.

Estación	Área [Km ²]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm ³	Vol. est. Hm ³	R_N^2 diario	R_N^2 mensual
C1Z2 Estanda	54.89	01/07/97	30/06/00	104.558	103.519	0.818	0.917
C2Z1 Agauntza	70.67	01/07/97	30/06/00	169.400	201.304	0.812	0.912
C5Z1 Alegia	330.18	01/07/97	30/06/00	694.911	771.235	0.865	0.943
C7Z1 Belauntza	28.58	01/07/97	30/06/00	126.300	107.875	0.784	0.935
C8Z1 Andoain	114.02	01/07/97	30/06/00	471.610	445.753	0.625	0.932
CHN080 Andoain	778.44	01/07/97	30/06/00	2705.304	2131.709	0.789	0.894

Cuadro 6.73: Resumen de resultados de la validación espacial, en la cuenca del río Oria

Los resultados obtenidos han sido buenos, donde el conjunto de factores correctores escogidos se presentan dentro de rangos razonables. En el Cuadro 6.74 se observan estos factores, en donde se destaca el factor corrector asociado a las pérdidas subterráneas que es nulo, ya que el balance en la cuenca se cumple sin necesidad de generar pérdidas. Todos los factores encontrados se encuentran dentro de los rangos esperados.

Variable	Factor corrector
Almacenamiento capilar	0.80
Evapotranspiración	1.05
Infiltración	0.150
Escorrentía	0.400
Percolación	0.030
Flujo subsuperficial	500.00
Pérdidas subterráneas	0.00
Pérdidas subterráneas	60.00
Velocidad de flujo	0.75

Cuadro 6.74: Factores correctores obtenidos por calibración en la estación CHE074 Arce en la cuenca del río Zadorra.

En el Cuadro 6.75 se presentan los indicadores estimados para establecer la calidad del conjunto de factores correctores obtenidos durante la calibración. Los resultados son muy satisfactorios ya que el error entre el volumen observado y simulado es muy bajo y el índice de Nash-Shutcliffe tanto a nivel diario como a nivel mensual son muy altos, por lo que la calibración puede ser considerada muy buena.

En la Figura 6.57 se muestra un ejemplo con los resultados a nivel diario obtenidos durante la calibración. Se puede apreciar el buen ajuste del flujo base y la buena

Estación	Área [Km ²]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm ³	Vol. est. Hm ³	R_N^2 diario	R_N^2 mensual
CHE074 Arce	1357.25 km ²	01/08/89	29/02/92	1114.639	1186.310	0.689	0.946

Cuadro 6.75: Resumen de las principales características del período de calibración en la cuenca del río Zadorra.

forma de las recesiones, mostrando que el ajuste diario es bueno a pesar de no alcanzar los caudales máximos.

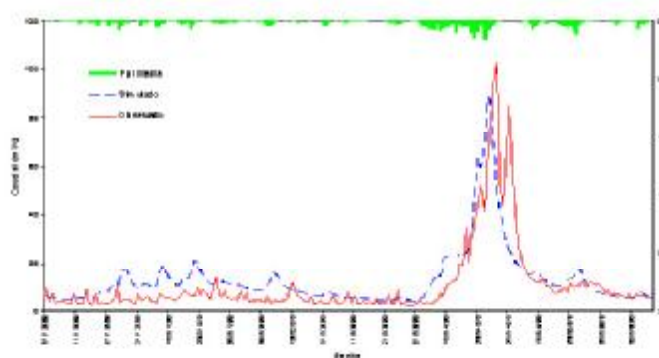


Figura 6.57: Hidrograma observado y simulado con los factores correctores de calibración

A partir de los resultados anteriores, se procedió a realizar la validación, ya que se dispone de suficiente información. La validación espacial en las subcuencas aguas arriba del punto de calibración, en las cuales se dispone de información. En el Cuadro 6.76 se observa el resumen de las principales características del proceso de validación.

Los índices indican un buen ajuste tanto a nivel diario como a nivel mensual en las cuencas seleccionadas. Adicionalmente, los errores en el volumen son pequeños y variados ya que en ocasiones sobrevalora y otras veces subvalora al volumen observado.

Se concluye entonces, que también en este caso se confirma la validez de las estimaciones realizadas para H_u , K_s y K_p en el sector analizado.

Estación	Área [Km ²]	Desde	Hasta	Vol. obs. Hm ³	Vol. est. Hm ³	R_N^2 diario	R_N^2 mensual
H152 Audicana	93.50	01/08/89	29/02/92	83.691	75.999	0.735	0.818
CHE221 Larrinoa	19.25	01/08/89	29/02/92	28.658	38.893	0.698	0.717
H154 Ozaeta	86.75	01/08/89	29/02/92	111.717	130.237	0.790	0.861
CHE108 Urrunaga	140.75	01/08/89	29/02/92	246.322	248.112	0.675	0.955
CHE107 Ullibarri	271.75	01/08/89	29/02/92	270.104	298.781	0.766	0.922

Cuadro 6.76: Resumen de las características del evento empleado para la validación espacial, en la cuenca del río Zadorra

Finalmente, los resultados permiten afirmar que el procedimiento de estimación representado en esta tesis ha provisto de buenos resultados al modelo TETIS, en este caso. Así la validación espacial de los resultados fue altamente satisfactoria, sumándose estos resultados a los del caso anterior de la cuenca del Tajo.

6.5. Caso 3: Réal Collobrièr

6.5.1. Descripción del área de trabajo

La cuenca del Réal Collobrièr se sitúa en el Macizo de Maures, cercana a la localidad de Toulon, en la región de la Provenza, sur de Francia. Se trata de una cuenca experimental, de $70,4 \text{ km}^2$, gestionada por el CEMAGEF (Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts), perteneciente a la administración nacional francesa. En la misma se cuenta con una intensa red pluviográfica y de aforos de caudal.

La región posee un clima mediterráneo húmedo, con precipitaciones anuales del orden de los 1000 mm . Y la temperatura media anual de $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

La cuenca fue visitada en el período de 9/10/ al 13/10/96, durante el cual se llevaron a cabo observaciones de la cubierta vegetal, suelos y litología.

Las coordenadas que limitan el área se describen en el Cuadro 6.77.

Extremo geográfico	$X(UTM) [m]$	$Y(UTM) [m]$
Mínimo	911000	3106000
Máximo	928000	3118000

Cuadro 6.77: Extensión geográfica del área de estudio. Coordenadas UTM en el Huso 30

Al contrario de los casos anteriores, la cuenca analizada es de dimensiones areales reducidas. En consecuencia, la estructura y la litología se analizarán conjuntamente. Dadas las características de la cuenca analizada, la estratigrafía y la configuración hidrogeológica local no fueron relevantes para el estudio. A partir de aquí, se seguirá el esquema de trabajo ya desarrollado en los casos anteriores.

6.5.1.1. Litología y estructura

En la cuenca de Colobrières, afloran materiales asociados a Macizo de Maurés (Massif des Maures, B.R.G.M., 1970), de origen metamórfico (Figura 6.58). Se tratan, principalmente de gneisses, esquistos, micaesquistos, cuarcitas y anfibolitas.

Los micaesquistos provienen, según el B.R.G.M. (1970) derivan de una serie detrítica mal seleccionada. Contienen niveles cuarzo-feldespáticos, intercalando con niveles micáceos. Presentan afloramientos con foliación gruesa. El resto de los esquistos son pelíticos y de una mayor uniformidad litológica. Se presentan normalmente parcialmente foliados y localmente alterados. Las cuarcitas son blancas, dispuestas en bancos métricos, con intercalaciones frecuentes de niveles ligeramente esquistosos. Las anfibolitas se presentan en afloramientos masivos o en bancos métricos y

se alteran fácilmente, dando origen a suelos que son muy favorables para el cultivo de castaños (B.R.G.M., 1970). Finalmente, los gneises presentan un bandeo cuarzo-feldespático bien definido, que alterna con niveles más micáceos. En la región de estudio presentan una foliación gruesa, con grados variables de alteración local.

El conjunto de los materiales se encuentran dispuestos según una estructura isoclinal de rumbo NNE-SSO. El isoclinal se encuentra afectado por un importante sistema de fracturas de rumbo ENE-OSO, dentro del cual se destaca con claridad la fractura principal, con claro rechazo, que divide a la cuenca en dos sectores. La misma es, además, la que define el rumbo del cauce principal del curso de agua de la cuenca. Existe además, otro sistema de fracturas, de igual importancia que el anterior, con rumbo NO-SE.

En la zona de cabeceras oriental y sud-oriental dominan los afloramientos de gneises, afectados por fracturación. Hacia cuenca media, y cabeceras del sector Sur de la cuenca, los afloramientos se componen de micaesquistos, afectadas por una intensa fracturación, y anfibolitas, fuertemente alteradas. En las cabeceras del sector norte, parte de cuenca media y cuenca baja dominan los afloramientos de esquistos detríticos.

Por último, los materiales sedimentarios son de origen reciente y se encuentran asociados principalmente a la actividad fluvial.

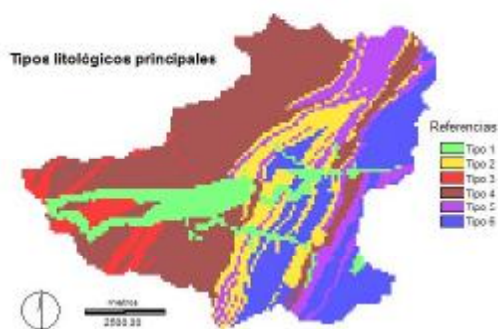


Figura 6.58: Litología global del sector

En la Figura 6.58 se observa con claridad las diferencias litológicas existentes en los sectores definidos por la fractura principal ya mencionada. Por otra parte, la misma fractura influye decididamente en la definición del valle principal, dentro del cual se encuentran los mayores volúmenes de depósitos de material aluvial en

Tipo	Litología dominante
Tipo 1	Material aluvial
Tipo 2	Anfibolitas
Tipo 3	Cuarcitas
Tipo 4	Esquistos
Tipo 5	Micaesquistos
Tipo 6	Gneis

Cuadro 6.78: Tipos litológicos dominantes en el sector

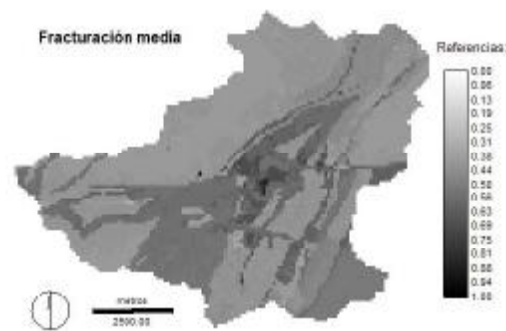


Figura 6.59: Estimación independiente de la fracturación media

la cuenca. Resulta característica la definición de la estructura isoclinal general del terreno y la particular disposición de anfibolitas y esquistos.

Las zonas de debilidad no sólo están definidas por la presencia de fracturas. Los límites litológicos son en sí mismos zonas de debilidad, donde se ponen en contacto litologías de diferente resistencia mecánica y composición mineralógica, como en el caso de los gneises o esquistos con las anfibolitas.

Dada la escala del trabajo, fue posible elaborar una estimación “a priori” e independiente del grado de fracturación medio que afecta a la superficie del terreno. La misma se basó en asignar a cada unidad cartográfica geológica un valor entre 0 y 1 y luego suavizar el mapa general mediante un filtro de media. Los valores fueron obtenidos heurísticamente, sobre la base de la observación de campo y la cartografía geológica existente. Los resultados se observan en la Figura 6.59.

Los mayores grados de fracturación se asocian a materiales esquistosos, particularmente cuando éstos se hallan en contacto con los demás tipos litológicos: anfibolitas, cuarcitas y gneises. Dichos contactos se deben tanto a la estructura tectónica do-

minante como a la acción de los dos sistemas de fracturación dominantes que han desplazado en sentido lateral (y probablemente en vertical) a bloques individuales del terreno.

6.5.1.2. Morfología del terreno

En términos generales, la morfología es la típica de una cuenca de montaña. Las divisorias de cuencas están definidas por relieves residuales resistentes, directamente relacionados con la estructura tectónica, la orientación y la densidad local de fracturación. La pendiente media de las laderas es de 20%, pudiendo alcanzar el 35%. En cuanto a la longitud, Curt (1993) indica que las mismas pueden alcanzar los 300 a 400 m. de longitud, con un perfil fundamentalmente rectilíneo. La sección fluvial en en "V" en las subcuencas, mientras que en los tramos finales del curso principal es rectangular, con desarrollo de terrazas fluviales.

A la escala de la cuenca, es posible observar ciertas características descriptivas de la misma, como la pendiente topográfica, la orientación del terreno o el desarrollo de la red hidrográfica. A partir de éstas surge una síntesis que aporta información respecto a la variabilidad espacial de los suelos y de su comportamiento hidrológico.

La red hidrográfica de la cuenca se encuentra claramente ordenada por la estructura tectónica. El cauce principal está directamente relacionado con la fractura principal que divide a la cuenca en los sectores Norte y Sur. Hacia éste convergen diferentes subcuencas drenantes, cuyo desarrollo se encuentra dirigido principalmente por la familia de fracturas orientadas NO-SE y en menor medida por la propia estructura isoclinal, perpendicular a las direcciones de fracturas antes mencionadas.

En los terrenos dominados por gneises, el relieve es particularmente suave, dominando las cabeceras orientales de la cuenca. En el resto de la misma, el relieve es claramente más pronunciado. Sin embargo, en este sector del terreno pueden diferenciarse con claridad las regiones al norte al sur de la fractura principal. Cada una con un relieve diferente, siendo el sector Sur el que presenta de paisaje más suave de ambos. Localmente, existen zonas llanas en las cercanías de los cursos principales, siendo claramente más frecuentes en el sector Sur de la cuenca.

De lo expuesto anteriormente, es posible diferenciar cuatro sectores principales o Dominios geomorfológicos, en cada uno de los cuales las características del terreno sean claramente diferenciables de los demás. Así, en primer lugar la cuenca se dividió en dos sectores (Norte y Sur) cada uno de los cuales fue subdividido en dos sectores (Este y Oeste) según si el terreno se localiza en la zona cabeceras con afloramientos de gneises o no.

Las características mencionadas anteriormente se exponen en la Figura 6.60, junto con la síntesis geomorfológica obtenida. En primer lugar, la topografía se representa por medio del modelo de elevación del terreno elaborado a partir de la información topográfica provista por el CEMAGREF.

A partir de éste se elaboraron los mapas de Índice topográfico, pendiente topográfica (en %) y orientación del terreno (en grados acimutales), donde el valor -1 simboliza a las zonas llanas.

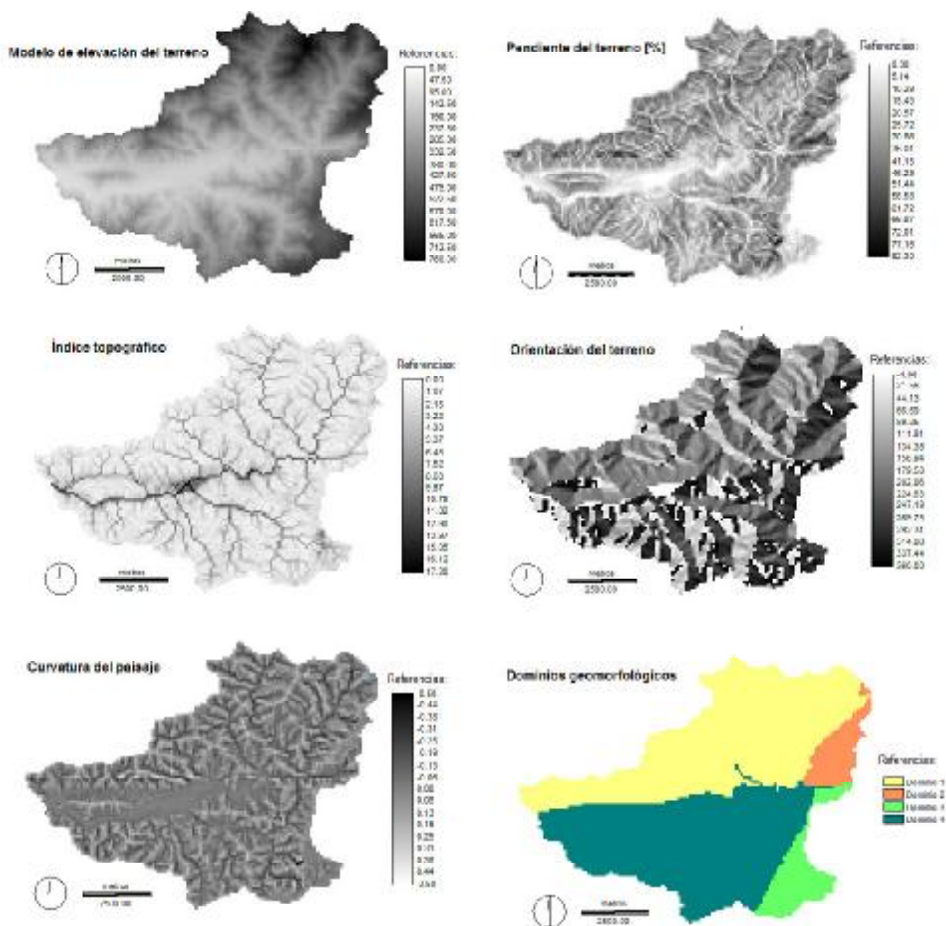


Figura 6.60: Geomorfología de la cuenca

6.5.1.3. Suelos

Como en los casos anteriores, las consideraciones taxonómicas fueron, han servido de referencia general respecto al origen y comportamiento global del suelo. La base

para la descripción de los tipos de suelo se basó principalmente en las características morfológicas del perfil y su situación en el paisaje, a expensas de la aplicación de un esquema de clasificación de suelos en particular.

Como función del clima, altitud, cubierta vegetal y la relativa uniformidad geoquímica del substrato geológico (silíceo a alúmino-silicatado) del área, los suelos son de tipo ácido. El desarrollo de procesos pedogenéticos se halla fuertemente limitado por el relieve y los procesos hidrológicos. Según Curt (1993) los suelos dominantes se pueden clasificar como Rankers y Litosoles. Ambos tipos de suelos son ampliamente representativos de la región analizada, en los interfluvios, las crestas rocosas y en los terrenos cóncavos. Los mismos apoyan, sobre materiales líticos parcialmente alterados o materiales coluviales de profundidad limitada (Curt, 1993).

Los suelos desarrollados sobre materiales coluviales son los componentes básicos en las laderas de las subcuencas, desarrollados a partir de procesos de erosión y transporte fluvial. Curt (1993) afirma que la aparición de acumulaciones coluviales es “cuasi-sistemática” en las laderas y en los fondos de valles. En menor medida, también se encuentran suelos aluviales, asociados generalmente al cauce principal.

Los perfiles que caracterizan a la región pueden ser diferenciados en tres tipos, íntimamente relacionados entre sí (Cuadro 6.79).

Categoría	Denominación	Perfil Tipo
1	Suelos sin horizontes definidos	Sin perfil definido
2	Suelos con poco desarrollo edáfico	Usualmente con perfiles tipo A/C-R
3	Suelos algo más desarrollados	Usualmente con perfiles tipo A-C-C

Cuadro 6.79: Categorías básicas de los suelos

En el primer caso, los perfiles más simples son aquellos que no presentan un perfil edáfico desarrollado o éste es mínimo son lo que más características comparten con los materiales parentales. Éstos se relacionan fundamentalmente con depósitos sedimentarios recientes, o materiales de alteración “in situ”. Su heterogeneidad es marcada y su textura y sus espesores son variables. Así se han observado depósitos de textura que varía entre la franco-arenosa hasta franco-arcillosa. Por otra parte los espesores observados varía entre 10 *cm.* en zonas de cabecera hasta 150 *cm.* en pies de laderas.

En segundo lugar se encuentran los suelos que muestran algo de desarrollo pedogénico. Estos se caracterizan por presentar un perfil de tipo A/C-R, en el cual se diferencia un horizonte de bajo desarrollo pedogénico, que apoya sobre material lítico o sedimentario.

El tercer tipo es del tipo A-C-C o A-C-IIC, que representa la evolución del perfil anterior en cuanto a la adición de un nuevo horizonte edáfico y, en consecuencia una mayor complejidad en el comportamiento hidrológico del terreno. Los perfiles presentan un límite claro entre los horizontes A-C y el C (o IIC). Al igual que en tipo anterior, la textura dominante es franco arcilloso, y sus agregados se presentan según una estructura en bloques subangulares medios a débiles.

En casos donde la cubierta vegetal es densa y estratificada se observa a presencia de mantillo vegetal parcialmente alterado, con espesores de hasta 4 *cm.*.

A partir de las observaciones de campo y la información existente se elaboraron diferentes unidades cartográficas a cada una de las cuales le fue asignado un perfil de suelo en concreto. El resultado no es un mapa de suelos en el sentido estricto del término, ya que no se desarrolló ningún sistema de clasificación y/o de correlación de suelos, el resultado fue suficiente para desarrollar la metodología propuesta en esta tesis. Al analizar dicho mapa se fue posible, en primer lugar describir la extensión espacial de los tres tipos de perfiles a mencionados, así como la de las clases texturales dominantes en los mismos. La Figura 6.61 expone estos resultados.

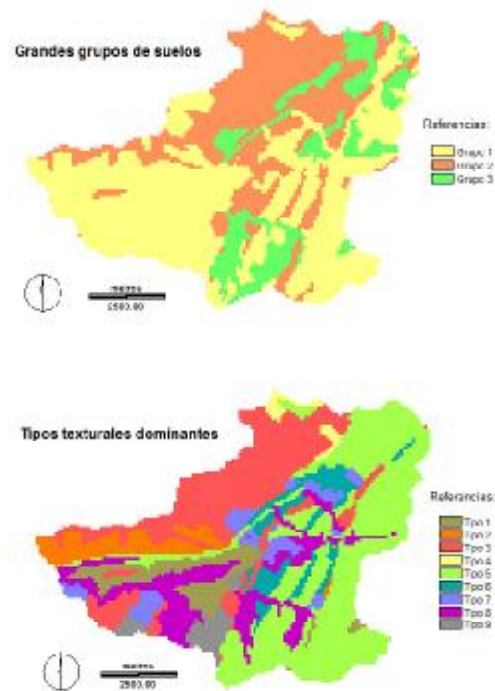


Figura 6.61: Grandes grupos de suelos sus clases texturales principales

Existe una clara correlación entre el tipo de suelos y la presencia de esquistos y

anfibolitas. Existe, pues, una evidente relación entre el relieve, dinámica hídrica, fracturación y la presencia de materiales alterados para el desarrollo de suelos con horizontes diferenciados.

Por otra parte, los suelos con perfil de tipo A-C-R se concentran preferentemente en el sector Norte de la cuenca. En el sector Sur sólo se han observado en mucha menor medida y asociada a zonas con mayor complicación tectónica.

Finalmente, los materiales sedimentarios clásticos sin desarrollo edáfico visible se observan preferentemente en el sector Sur de la cuenca.

En síntesis, se puede afirmar que los trabajos de campo permitieron observar una clara correspondencia entre la delimitación de dominios geomórficos y la presencia de los diferentes tipos de suelos.

El Cuadro 6.80 señala los tipos texturales cartografiados en la Figura 6.61

Tipo	Textura
1	Arenoso
2	Arenoso-Franco
3	Franco
4	Fanco a Franco-arcilloso
5	Franco-arenoso
6	Franco-Areno-Arcilloso
7	Franco-Arcilloso
8	Franco-Limoso
9	Limo-Arcilloso

Cuadro 6.80: Tipos texturales

Analizando la información expuesta se puede comprobar que las texturas más gruesas se concentran fundamentalmente en el sector cercano al cauce principal, en parte del Sector Norte de la cuenca. Las texturas medias, más equilibradas, se localizan en terrenos de cuenca superior y cuenca media, tanto en el sector Norte como en el Sur. Fundamentalmente, las texturas más finas se localizan preferentemente en el Sector Sur, en buena parte asociados a cauces de tributarios al curso principal.

Finalmente, la información expuesta permite comprobar de forma visual la estrecha correlación entre litología, estructura, paisaje y desarrollo de suelos, así como la textura de los mismos. Resulta claro observar que la presencia de materiales localmente más tectonizados, conjuntamente con la presencia de materiales alterados incide definitivamente en la presencia de suelos y de texturas concretas.

6.5.1.4. Cubierta del suelo

En términos generales la cubierta vegetal pertenece al tipo de la *maquia* mediterránea (Curt 1993), con una amplia variabilidad local en cuanto a su estado de degradación, ya sea por incendios o por la actividad humana.

El relieve accidentado, la discontinuidad espacial de los suelos y el clima mediterráneo son claros limitantes a las actividades agrícolas en la zona. Las mismas se limitan al aprovechamiento de laderas con pendientes favorables, con desarrollo eventual de bancales, o en suelos más profundos del los valles fluviales. El monte mediterráneo y la explotación de castaños es el dominante en la región. En la cuenca inferior se desarrolla la industria local vitivinícola que aprovecha los terrenos aluviales y los relieves suaves.

La observación que se desarrolló en campo permitió distinguir diferentes variantes en la cubierta vegetal sobre la base de analizar los estratos vegetales que la componen (fundamentalmente tres: arbóreo, arbustivo y herbáceo) y la densidad con la cual se presentan (alta, media y baja).

En función de estos criterios se pudo distinguir diferentes casos a destacar:

- a) Monte mediterráneo. Compuesto por encinas, alcornoques, un estrato de matorral denso y un estrato herbáceo. Su densidad y grado de estratificación es espacialmente variable. La misma puede ser causada por la degradación del estrato arbustivo, avanzando sobre el estrato de matorral y herbáceo. El caso más claro se observa en zonas afectadas por incendio. Allí, el terreno puede estar desnudo cierto por matorral disperso.
- b) La plantación de castaños. Normalmente se define como un estrato arbóreo bajo el cual se desarrolla una cubierta herbácea con ausencia de estratos arbustivos. Es localmente variable en canto a su estado sanitario, lo cual afecta directamente a su comportamiento hidrológico.
- c) Viñedos. Localizados en la cuenca inferior. Su grado de cobertura es mínima y su estratificación nula. Frecuentemente se los encuentra orientados a favor de la pendiente local.

Caso aparte se pueden mencionar la presencia de pequeñas zonas de pastoreo y una reducida plantación forestal de pinos, gestionada por el INRA.

La distribución espacial de la estratificación y de la densidad de la vegetación se puede observar en la Figura 6.62.

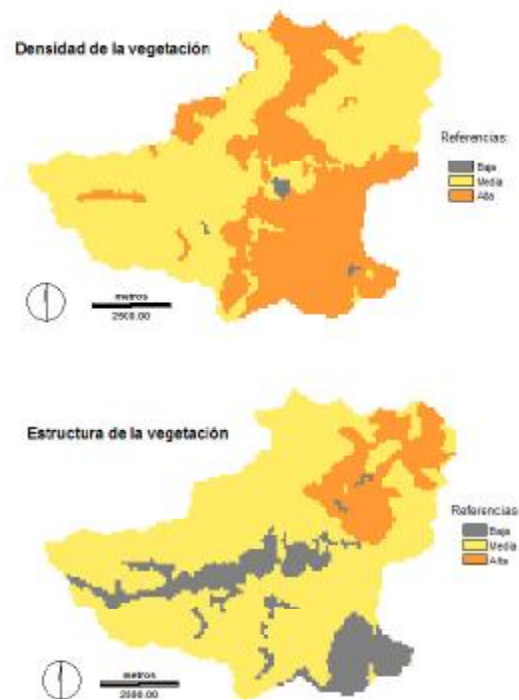


Figura 6.62: Distribución de la densidad y estratificación de la vegetación en el área de trabajo

En los mapas expuestos se observa que las diferencias en la distribución espacial de las dos características analizadas: densidad y estructura de la vegetación, La densidad de la vegetación domina la sección Sur, desde cabeceras hasta cuenca media. En el sector Norte su distribución es más reducida. Por el contrario, la densidad baja se concentra en la pequeña zona urbana localizada en el centro de la cuenca. La densidad media domina en la cuenca inferior (tanto al Norte como al Sur del cauce principal) y en una zona claramente definida del Sector Norte, en la cual se concentra la vegetación con una estructura más desarrollada. La vegetación con menor desarrollo de estructura se localiza en la zona ocupada por el cauce principal y en zonas de cabeceras sudorientales, antiguamente afectadas por incendios.

En función de la nomenclatura utilizada quedan señaladas diferentes relaciones entre las características de la vegetación. Por una parte, una cubierta vegetal densa no significa necesariamente que esté estratificada y viceversa. Por otra parte, las zonas asociadas al cauce, asociado a la acción antrópica la vegetación permanece estratificada lo hace de forma muy poco densa, es decir existen pequeñas concen-

traciones relícticas de bosque dentro de un terreno afectado por la acción humana. Por otra parte, en zonas afectadas por antiguos incendios se logró cubrir la superficie del terreno con material vegetal vivo, pero esto no significa la reconstrucción total de la masa vegetal. En ambos casos, se supone que la respuesta hidrológica será la misma.

De la misma forma, se observa que las condiciones para el desarrollo de una vegetación densa, aunque no altamente estratificada, son más frecuentes en la sección Sur de la cuenca, en sectores de cabecera y cuenca media, en terrenos donde el relieve es más suave, en relación al resto de la cuenca. Por el contrario, la cubierta vegetal con mayor estratificación se encuentra en el sector Norte en sectores donde el relieve es marcado.

Por último, se observa que, a la escala de análisis que se desarrolló en este caso, existen datos e información que revelan la existencia de una relación concreta entre los suelos, la vegetación y el resto del paisaje. La misma será desarrollada de forma explícita en los apartados posteriores.

6.5.2. Información utilizada

Como en los casos anteriores, los materiales fueron los datos puntuales, información bibliográfica y cartográfica, referida a la zona de trabajo. El Cuadro 6.81 expone los diferentes tipos de información cartográfica original, utilizada en función del tema tratado en el estudio.

Puede comprobarse que dada la escala en la cual se analiza el caso, la información utilizada varía ligeramente aunque se conservan aquellas fuentes de información que son básicas para poder aplicar el tipo de análisis propuesto en esta tesis: geología, uso de suelo, relieve y suelos.

Tipo de Información	Mapas	Formato y escala
Litología	Mapa geológico	Papel, Escala 1:50000
Topografía	Modelo digital del terreno (CEMAGREF)	Digital vectorial
Cobertura y Uso del suelo	Información de CEMAGREF	Digital, Vectorial
Tipos de suelos	Información de CEMAGREF Observaciones de campo	Digital, Vectorial Digital, Vectorial

Cuadro 6.81: Información cartográfica utilizada en la estimación de parámetros hidrológicos

6.5.3. Variables empleadas

6.5.3.1. Variables principales

Al igual que en los casos anteriores, las variables principales fueron expresadas como variables continuas (Cuadro 6.82), mientras que las variables ambientales fueron procesadas previamente, a fin de que fueran expresadas en escalas continuas normalizadas o como variables indicadoras, respectivamente. Dada su importancia hidrológica algunas de las variables fueron utilizadas en ambas formas (Cuadro 6.42).

Denominación	Escala	Fuente
Conductividad hidráulica del suelo	Cuantitativa	Mapas de suelos
Conductividad hidráulica del substrato del suelo	Cuantitativa	Mapas de suelos
Capacidad de almacenamiento hídrico	Cuantitativa	Mapas de suelos

Cuadro 6.82: Detalle de las variables principales, y su forma de expresión

Los valores de las variables principales fueron deducidos a partir de la información obtenida en campo.

A través de la aplicación de las funciones de pedotransferencia se pudo elaborar un mapa de valores modales para cada una de las variables principales analizadas y evaluar la estructura de su distribución espacial.

El procedimiento de análisis y asignación de valores modales a las unidades cartográficas del mapa de suelos fue el mismo que el descrito en los casos anteriores.

En este caso, el total de unidades cartográficas obtenidas es de 128, un número muy inferior al utilizado en los casos de la cuenca del Tajo y del País Vasco.

De los 128 valores modales asignados, se expone una síntesis en forma espacial en la Figura 6.63.

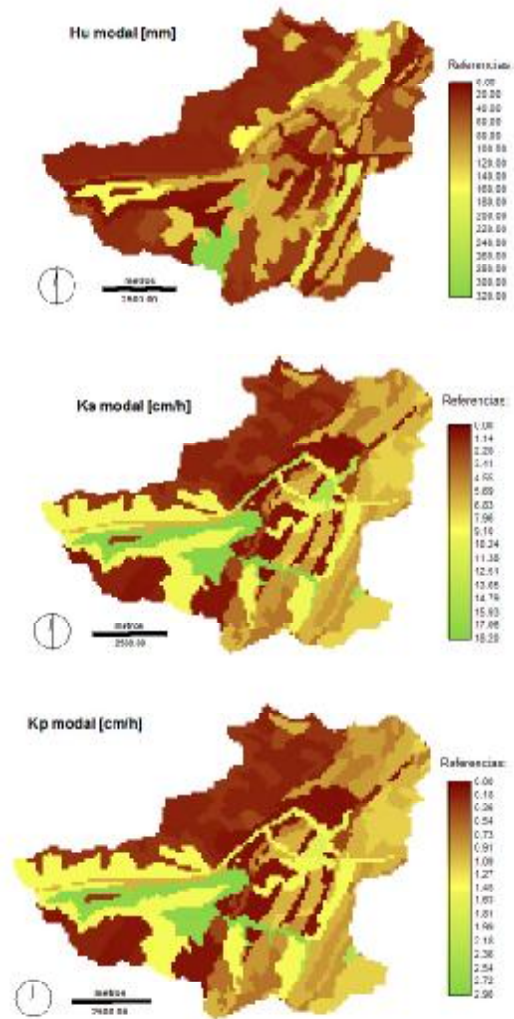


Figura 6.63: Mapa de valores modales

De la misma forma que en los casos anteriores, la distribución de los valores modales de las variables principales fue analizada a partir de su distribución de frecuencias de los valores asignados a cada uno de los píxeles en los que se dividió el terreno analizado.

La Figura 6.64 señala los resultados obtenidos. Los mismos indican la concentración de la mayor cantidad de píxeles dentro de unas pocas categorías de valores. Sin embargo esta concentración es menor que la observada en los casos anteriores. Se debe recordar que en este caso la escala de definición de unidades cartográficas es claramente menor que la de los casos anteriores.

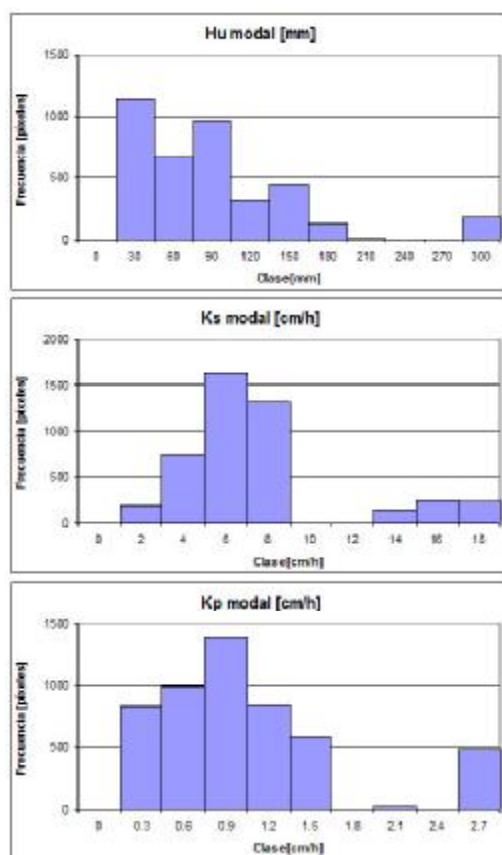


Figura 6.64: Histogramas de frecuencias de los valores modales de las variables principales

La continuidad espacial de los valores modales de las variables principales se exponen sobre la base de los variogramas experimentales y los modelos ajustados a los mismos. Éstos se exponen a continuación(Figura 6.65 y Cuadro 6.83).

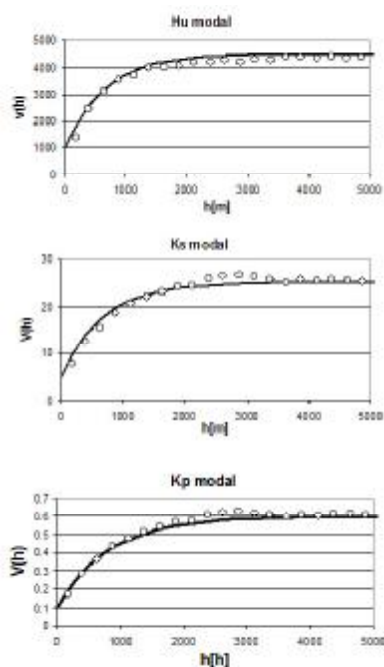


Figura 6.65: Estructura espacial de los valores modales de las variables principales. Variogramas omnidireccionales

Variable	Ajuste	c_0	c	a
Hu modal	Exponencial	1000.0	3500.0	2000.0
Ks modal	Exponencial	5.0	20.0	2000.0
Kp modal	Exponencial	0.1	0.5	2000.0

Cuadro 6.83: Ajuste de los variogramas de los valores modales de las variables principales

Los resultados obtenidos indican ciertas diferencias claras con los valores modales expuestos en los casos anteriores. Si bien los modelos ajustados los variogramas experimentales en este caso son exponenciales, como en el caso anterior, los valores de sus parámetros guardan claras diferencias.

En primer lugar, el alcance de los variogramas es mucho más corto que en los casos anteriores. En segundo lugar, los valores del coeficiente de escala son, a excepción del correspondiente a Hu mucho mayores. Es de destacar que las relaciones de magnitud entre los valores de c en las diferentes variables principales se conservan (el valor de c de Hu es siempre mayor que el de Ks y este último es siempre igual o mayor que el de Kp).

6.5.3.2. Variables ambientales

Las variables ambientales finalmente utilizadas en las regresiones se recogen en el Cuadro 6.84 adjunto.

Las variables ambientales del tipo de indicador se generaron de la misma forma que en los casos anteriores (Cuadro 6.85).

Denominación	Cuantitativa (Normalizada)	Cuantitativa (Val. originales)	Var. muda
Dominios geomorfológicos	No	No	Si
	Fuente: Trabajo de campo		
Unidades litológicas	No	No	Si
	Fuente: B.R.G.M., 1970		
Altimetría	Si	No	Si
	Fuente: CEMAGREF		
Fracturación media	Si	No	Si
	Fuente: B.R.G.M., 1970		
Densidad de la vegetación	No	No	Si
	Fuente: Trabajo de campo		
Estructura de la vegetación	No	No	Si
	Fuente: Trabajo de campo		
Pendiente topográfica	Si	No	Si
	Fuente: CEMAGREF		
Orientación de la pendiente	No	No	Si
	Fuente: CEMAGREF		
Curvatura del paisaje	Si	No	Si
	Fuente: CEMAGREF		
Índice topográfico	Si	No	Si
	Fuente: CEMAGREF		

Cuadro 6.84: Detalle de las variables ambientales utilizadas, y su forma de expresión

Variable	Var. muda = 1	Var. muda = 0
Dominios geomorfológicos	Sector Norte	Sector Sur
	Zonas de la cuenca al Norte o al Sur de la fractura principal	
Unidades litológicas	Micaesquistos y anfibolitas	Otras
	Materiales fracturados o fisurados, total o parcialmente afectados por procesos de alteración	
Altimetría	cotas entre 95 y 245 msnm.	cotas mayores a 245 msnm.
	Distinción de los diferentes sectores de la cuenca	
Fracturación media	mayor de 0.5	menor de 0.5
	Distinción de los diferentes grados de fracturación del terreno	
Densidad de vegetación	media	alta y baja
	Distinción del grado de densidad de vegetación dominante	
Estructura de la vegetación	Alta y media	baja
	Distinción de la estructura de vegetación más bajo respecto del resto	
Pendiente topográfica	más de 45 %	menos de 45 %
	Distinción de los relieves más fuertes respecto del resto	
Orientación de la pendiente	45 - 135 ° acimutales	resto
	Vertientes con diferente exposición a las precipitaciones	
Índice topográfico	Celdas del MED asociadas al cauce principal	Celdas del MED no asociadas al cauce principal
	Terrenos con mayor desarrollo de la red fluvial	

Cuadro 6.85: Criterios de separación de variables mudas

Analizando los cuadros anteriores, se comprueba que tanto las variables como los criterios aplicados para la generación de variables indicadoras es similar al aplicado en los casos anteriores.

6.5.4. Resultados de la estimación de los parámetros

6.5.4.1. Ajuste de las regresiones

Al igual que en los casos anteriores, la base del análisis fueron las unidades de muestreo, obtenidas a partir de la intersección de las diferentes variables ambientales indicadoras. En este caso, mediante tal procedimiento se generaron 128 unidades de este tipo.

Los resultados se pueden observar en la Figura 6.66. En ésta, se puede comprobar, como en casos anteriores, que el procedimiento aplicado ha permitido reproducir de forma aceptable la variabilidad espacial del terreno, en las tres variables principales.

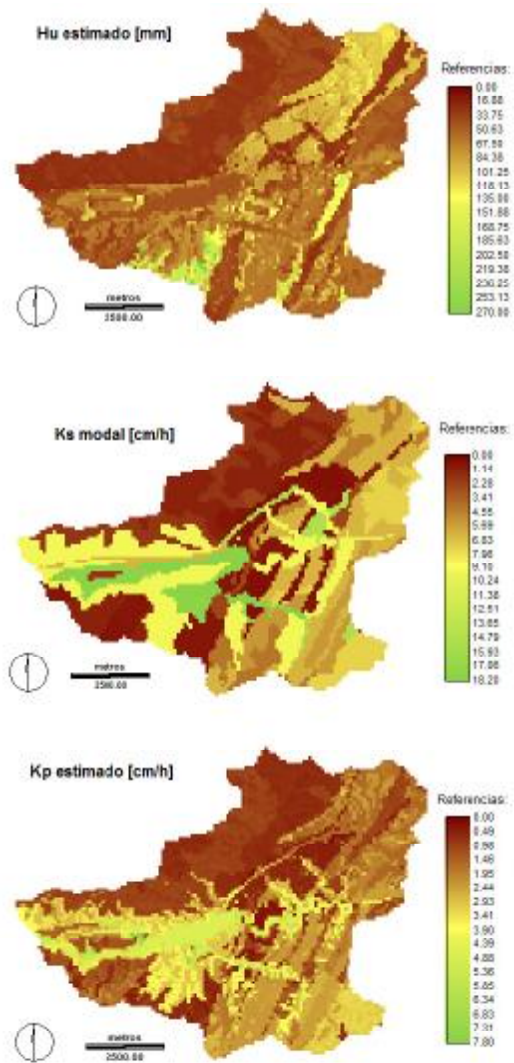


Figura 6.66: Valores estimados

Las variables ambientales y los coeficientes empleados en los ajustes de las variables principales se exponen en los cuadros 6.86, 6.87 y 6.88.

Estimación de $SQRT(Hu) * 100$	
Variable	β
Constante	807.80
Variables continuas	
Altimetría	-258.55
Pendiente topográfica	752.76
Curvatura del paisaje	-268.89
Variables discretas	
Dominio geomorfológico	-228.868
Litología	-229.78
Fracturación	75.97
Pendiente topográfica	-171.47
Orientación de la pendiente	46.27
Interacción entre variables discretas	
Dominio geomorfológico * Litología	628.77
Dominio geomorfológico * Fracturación	-346.82
Dominio geomorfológico * Orientación de la pendiente	79.179
Litología * Altimetría	331.59
Litología * Fracturación	-130.07
Litología * Densidad de vegetación	107.58
Altimetría * Fracturación	-264.60
Altimetría * Estructura de la vegetación	-91.16
Fracturación * Densidad de vegetación	133.27
Fracturación * Estructura de la vegetación	264.29
Fracturación * Pendiente topográfica	59.64
Fracturación * Orientación de la pendiente	-101.61
Densidad de vegetación * Estructura de la vegetación	-89.18
Densidad de vegetación * Orientación de la pendiente	-78.39
Orientación de la pendiente * Índice topográfico	45.95

Cuadro 6.86: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo

Las relaciones entre el parámetro Hu y Ks y entre éstas y el terreno quedan claros en el análisis. Ambos valores provienen del análisis directo de las características del suelo. A partir de ello, la escala de trabajo permite que el análisis desarrollado en esa tesis exponga con claridad estas relaciones.

Variables directamente representantes de la topografía del terreno, como la altimetría, pendiente topográfica, curvatura y orientación del paisaje poseen clara

importancia en la explicación de la distribución espacial de las variables principales en la cuenca de Réal Collobrières.

Estimación de $\ln(Ks) * 100$	
Variable	β
Constante	251.23
Variables continuas	
Densidad de fracturación	-370.321
Altimetría	62.9871
Pendiente topográfica	-32.5813
Variables discretas	
Dominio geomorfológico	-312.08
Estructura de la vegetación	-33.0417
Interacción entre variables discretas	
Dominio geomorfológico * Litología	67.6408
Dominio geomorfológico * Altimetría	97.4146
Dominio geomorfológico * Densidad de vegetación	102.256
Dominio geomorfológico * Estructura de vegetación	178.422
Litología * Altimetría	-93.9383
Litología * Fracturación	-59.9844
Litología * Pendiente topográfica	22.0872
Litología * Orientación de la pendiente	25.5586
Altimetría * Fracturación	80.6854
Altimetría * Densidad de vegetación	36.8532
Altimetría * Pendiente topográfica	-65.01
Fracturación * Densidad de vegetación	-34.6725
Fracturación * Estructura de vegetación	42.7928
Fracturación * Orientación de la pendiente	17.3648
Fracturación * Índice topográfico	16.0945
Densidad de vegetación * Estructura de vegetación	-63.2988
Densidad de vegetación * Pendiente topográfica	19.1432
Densidad de vegetación * Orientación de la pendiente	-17.8914

Cuadro 6.87: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la conductividad hidráulica del suelo

Tanto en el análisis de Hu como en el se Ks , existen interacciones de variables ambientales que comunes a la explicación de ambas. Así, las interacciones entre el tipo de dominio geomorfológico y el tipo litológico, y de este último con la altimetría y la vegetación están presentes en ambos análisis. De la misma forma, la interacción entre la fracturación y variables indicadoras representantes del estado de la vegetación y de la orientación de la pendiente son necesarias para poder

explicar la distribución espacial de ambas variables.

Por otra parte, para la explicación de la distribución de Hu fue necesario utilizar diferentes variables representantes de la morfología del terreno, mientras que en el caso de Ks fue necesario utilizar variables asociadas al estado de la vegetación.

Sumado a lo anterior, existe dos coincidencias adicionales. En primer lugar, en ambos casos las variables representantes de la configuración geológica del área han sido claramente importantes. En segundo lugar, se destaca la aparición de la interacción entre la densidad de la vegetación y la estructura de la vegetación como variable ambiental que destaca la variación de los valores de Hu y Ks en aquellas zonas que han sido más afectadas por la acción antrópica y/o incendios y en aquellas donde la densidad no alcanza su máximo desarrollo.

Estimación de $\ln(Kp) * 100$	
Variable	β
Constante	266.626
Variables continuas	
Densidad de fracturación	-358.442
Variables discretas	
Dominio geomorfológico	-292.311
Estructura de la vegetación	-44.3448
Interacción entre variables discretas	
Dominio geomorfológico * Litología	58.7863
Dominio geomorfológico * Altimetría	107.927
Dominio geomorfológico * Densidad de vegetación	85.942
Dominio geomorfológico * Estructura de vegetación	166.853
Litología * Altimetría	-108.951
Litología * Fracturación	-53.9053
Litología * Pendiente topográfica	25.7763
Litología * Orientación de la pendiente	30.8753
Altimetría * Fracturación	87.1023
Fracturación * Densidad de vegetación	-28.3112
Fracturación * Estructura de vegetación	32.8108
Fracturación * Índice topográfico	20.2285
Densidad de vegetación * Estructura de vegetación	-46.2079
Densidad de vegetación * Orientación de la pendiente	-14.0257

Cuadro 6.88: Detalle de la ecuación de ajuste para la estimación de la conductividad hidráulica del substrato del suelo

Existe una vinculación genética y ambiental entre Ks y Kp . En ambos casos se trata de estimaciones de conductividad hidráulica saturada, ambos en ambientes

contiguos espacialmente. Genéticamente ambas estimaciones están íntimamente relacionadas, ya que el suelo en el cual se estima Ks deriva de los materiales en los cuales se estima K .

Las consideraciones genéticas se reflejan con claridad en las estimaciones realizadas para Ks y Kp . Así en este último caso, todas las variables utilizadas, ya lo habían sido en el caso de la otra variable principal. Las diferencias entre ambas estimaciones se encuentran en la relevancia que poseen la altimetría y la pendiente topográfica, y las interacciones de la litología y la fracturación con la orientación de la pendiente, la altimetría y la densidad de la vegetación con la pendiente topográfica, y de la altimetría y la densidad de vegetación. El conjunto describe la relación existente entre litología, releve y vegetación, las cuales permiten definir el patrón de distribución de las variables principales que son analizadas.

Dado a que los tres casos se desarrollaron a escalas de definición diferentes, se pudo comprobar no sólo la efectividad del procedimiento propuesto en esta tesis, sino también la utilidad potencial de la información disponible. Así, analizando los ajustes obtenidos en este caso en relación con los resultados anteriores, se observan coincidencias sumamente significativas en cuanto a las variables seleccionadas. En primer lugar, en todos los casos, fue la combinación de variables continuas con variables discretas lo que permitió la explicación coherente de la distribución de las variables principales en el espacio. Dentro de esta combinación de variables, la utilización de interacciones de variables indicadoras ha jugado en todos los casos analizados un papel fundamental en los resultados.

Las variables referidas a la configuración geológica del terreno han mostrado ser significativas para la explicación no sólo de la distribución espacial de Kp sino de Ks y de Hu . En el primer caso por ser una variable estimada a partir del tipo y estado de materiales geológicos, mientras que en el segundo caso la razón se encuentra a que tales variables derivan del análisis de una componente del paisaje derivado de la acción del ambiente sobre el material geológico: el suelo.

De la misma forma que lo anteriormente expresado, las variables asociadas a la morfología del terreno demostraron su poder de explicación en el análisis de las tres variables principales. Así, si bien su relación con la distribución de Hu y Ks ha sido ampliamente difundida en la literatura, su relación con Kp ha sido establecida con claridad, debido al vínculo genético y ambiental que existe entre estas tres variables.

Finalmente, la cubierta del suelo, analizada a partir de observaciones directas o de la información disponible fue de gran utilidad. El éxito en su procesamiento se basó en la distinción de las características de densidad y grado de estratificación de la misma, de forma directa o indirecta, según el tipo de información disponible.

6.5.5. Análisis de la precisión en las estimaciones

En primer lugar, el Cuadro 6.89 señala el valor del coeficiente de determinación par las tres variables principales.

Los resultados expuestos indican que la precisión de los ajustes obtenidos es del mismo orden de los obtenidos en el caso anterior, el País Vasco. Sin embargo, se puede comprobar también en este caso que en todos los casos se logra explicar entre el 85 y 90 % de la variabilidad analizada.

Variable principal	R^2
Capacidad de almacenamiento hídrico	89.27 %
Conductividad hidráulica del suelo	85.94 %
Conductividad hidráulica del substrato	85.01 %

Cuadro 6.89: Precisión de los ajustes realizados

La evolución de los ajustes se puede observar en la Figura 6.67.

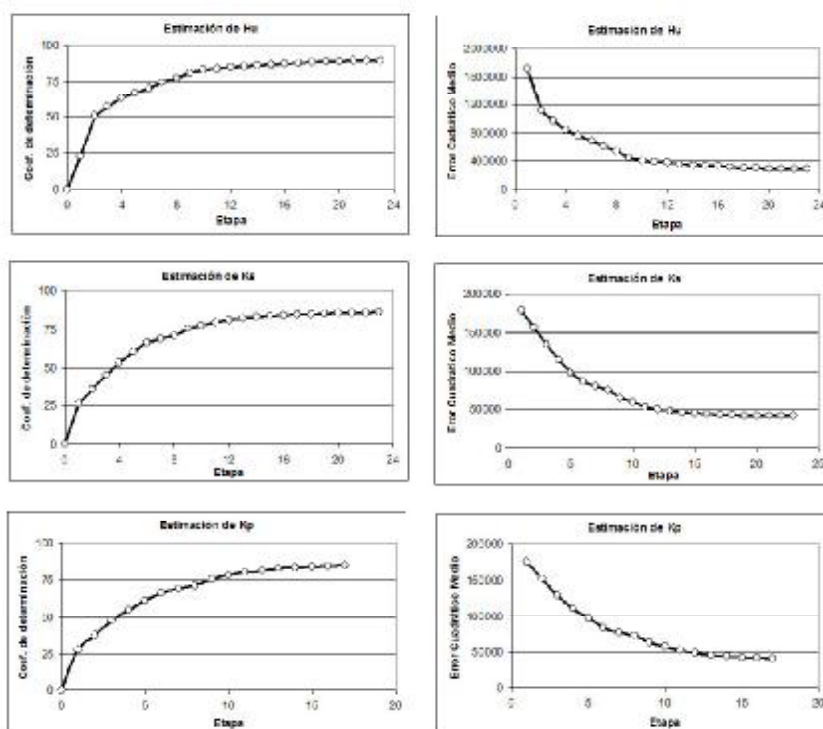


Figura 6.67: Evolución de los ajustes según R^2 y el MCE

Los gráficos indican que, la evolución del ajuste es progresiva, tal como la observada en el caso de la cuenca del País Vasco. Tal observación es especialmente clara en los casos de los ajustes de Ks , y Kp en los cuales a partir del 25 %, la explicación avanza con particular lentitud a medida que se agregan variables ambientales al ajuste. Se observa aquí una nueva diferencia clara con los casos anteriores. En éste, a medida que la escala de detalle aumenta, la evolución del ajuste es progresivamente más lenta.

La evolución de los valores de R^2 a medida que se agregaron las diferentes variables ambientales a la estimación puede observarse en los cuadros 6.90 y 6.91 y en el Cuadro 6.92. Analizando estos cuadros se pueden extraer conclusiones de interés para el análisis.

Orden	Nombre	R^2	MSE
1	Dominio geomorfológico * Litología	22.71	1.7E+6
2	Dominio geomorfológico	50.44	1.11E+006
3	Fracturación * Estructura de la vegetación	57.07	968810
4	Dominio geomorfológico * Fracturación	62.82	845910
5	Altimetría * Fracturación	66.78	762213
6	Litología	70.14	690848
7	Litología * Altimetría	74.38	597969
8	Fracturación * Densidad de vegetación	77.25	535598
9	Densidad de vegetación * Estructura de la vegetación	81.16	447403
10	Pendiente topográfica	83.22	401964
11	Litología * Fracturación	83.9	389146
12	Dominio geomorfológico * Orientación de la pendiente	84.56	376374
13	Fracturación * Orientación de la pendiente	85.34	360535
14	Pendiente topográfica	85.97	348301
15	Litología * Densidad de vegetación	86.48	338706
16	Altimetría	86.83	332842
17	Altimetría * Estructura de la vegetación	87.69	314097
18	Curvatura del paisaje	88.15	305229
19	Fracturación	88.61	296235
20	Densidad de vegetación * Orientación de la pendiente	88.83	293204
21	Orientación del terreno	89.05	290293
22	Fracturación * Pendiente topográfica	89.16	290072
23	Orientación de la pendiente	89.27	289978

Cuadro 6.90: Evolución del ajuste de Hu

En el caso del ajuste de Hu , las variables que representan al entorno geológico del territorio fueron variables sumamente importantes en la evolución del ajuste. A medida que el avanzaba el ajuste, éstas fueron reemplazadas parcialmente por las variables representantes de la morfología del terreno. Las variables asociadas a la cubierta vegetal fueron de relativa importancia en la totalidad del ajuste.

En el caso de Ks , resulta claro comprobar que, a diferencia del caso del País Vasco, la morfología del terreno fue fundamental para definir la evolución del ajuste. De la misma forma, la vegetación ha sido claramente influyente en este proceso.

Orden	Nombre	R^2	MSE
1	Dominio geomorfológico	25.97	179051
2	Litología * Fracturación	35.6	157023
3	Dominio geomorfológico * Altimetría	45.26	134581
4	Dominio geomorfológico * Litología	53.51	115251
5	Fracturación * Índice topográfico	60.75	98131.9
6	Litología * Altimetría	66.12	85412.7
7	Estructura de la vegetación	68.76	79439.2
8	Altimetría * Fracturación	70.79	74898.8
9	Fracturación * Densidad de vegetación	75.27	63977.9
10	Dominio geomorfológico * Densidad de vegetación	77.47	58780.7
11	Densidad de vegetación * Estructura de la vegetación	79.7	53433.2
12	Dominio geomorfológico * Estructura de la vegetación	80.99	50503.9
13	Densidad de fracturación	82.27	47510.6
14	Litología * Orientación del terreno	82.96	46073.2
15	Fracturación * Estructura de la vegetación	83.65	44611
16	Litología * Pendiente topográfica	84.09	43831.3
17	Densidad de vegetación * Orientación del terreno	84.4	43367.1
18	Altimetría * Densidad de vegetación	84.65	43082
19	Altimetría	85.1	42228.8
20	Altimetría * Pendiente topográfica	85.39	41779.8
21	Fracturación * Orientación del terreno	85.6	41598.5
22	Densidad de vegetación * Pendiente topográfica	85.78	41467.2
23	Pendiente topográfica	85.94	41425.9

Cuadro 6.91: Evolución del ajuste de Ks

Finalmente, en el caso del ajuste de Kp , las variables representantes del entorno geológico y la cubierta vegetal han sido fundamentales en la evolución del ajuste de esta variable.

Orden	Nombre	R^2	MSE
1	Dominio geomorfológico	27.50	175050
2	Litología * Fracturación	37.4	152394
3	Dominio geomorfológico * Altimetría	47.19	129632
4	Fracturación * Índice topográfico	55.16	110980
5	Dominio estructural * Litología	61.22	96786.1
6	Litología * Altimetría	66.79	83604.9
7	Estructura de la vegetación	69.4	77673.9
8	Altimetría * Fracturación	71.44	73137.5
9	Fracturación * Densidad de vegetación	75.8	62502.1
10	Dominio geomorfológico * Densidad de vegetación	78.08	57120.5
11	Densidad de vegetación * Estructura de la vegetación	80.3	51771.9
12	Dominio geomorfológico * Estructura de la vegetación	81.55	48927.8
13	Densidad de fracturación	82.91	45721.1
14	Fracturación * Estructura de la vegetación	83.59	44305.4
15	Litología * Orientación del terreno	84.28	42837.6
16	Litología * Pendiente topográfica	84.68	42130
17	Densidad de vegetación * Orientación del terreno	85.01	41610.1

Cuadro 6.92: Evolución del ajuste de Kp

Los residuales generados en los ajustes a la información son expuestos en la Figura 6.68.

En la mencionada figura se puede observar que la distribución de los residuales es relativamente uniforme a lo largo del rango de valores observados, en las tres variables principales analizadas.

Al igual que en los casos anteriores, los gráficos indican que a medida que aumenta el valor del valor de ponderación del valor muestral analizado, los valores de los residuales se reducen, tal como es de esperar en estos procedimientos .

Sobre la base de estos resultados se puede afirmar que los resultados son satisfactorios, y que los residuales no señalan tendencia alguna, que señale problemas de ajuste.

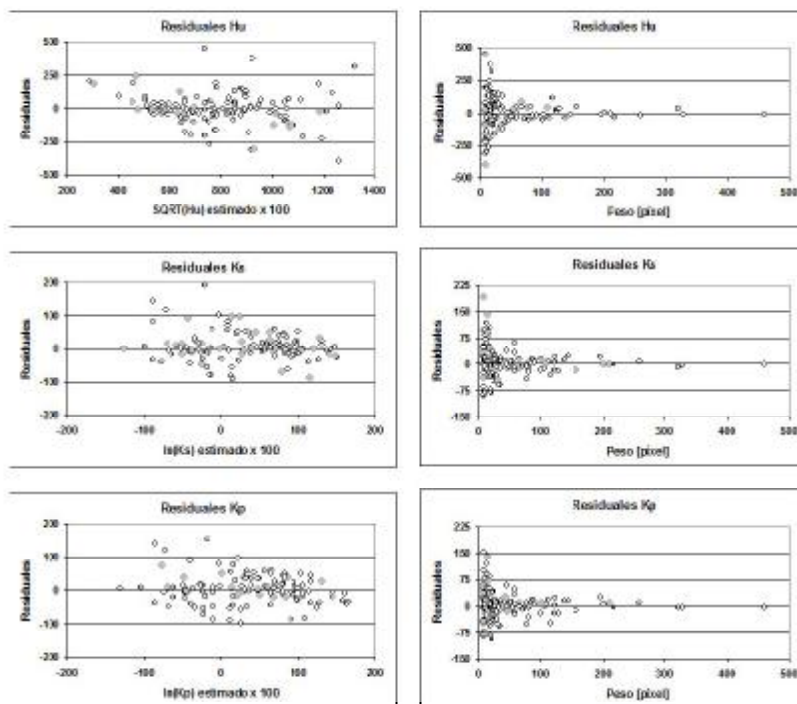


Figura 6.68: Residuales

Al igual que en el caso anterior, se analizó la distribución de frecuencias de los valores de los píxeles e las tres capas temáticas generadas por la estimación de las variables principales.

En este caso se vuelven a comprobar los efectos de la distribución celda a celda de los valores de las variables principales puede observarse en la Figura 6.69.

Comparando los resultados anteriores los expuestos en la Figura 6.64 se puede comprobar que los resultados del proceso de estimación propuesto generan histogramas en los cuales la distribución de frecuencias es también claramente más armónica. Esto se destaca con claridad del caso donde los valores modales son distribuidos mediante unidades cartográficas.

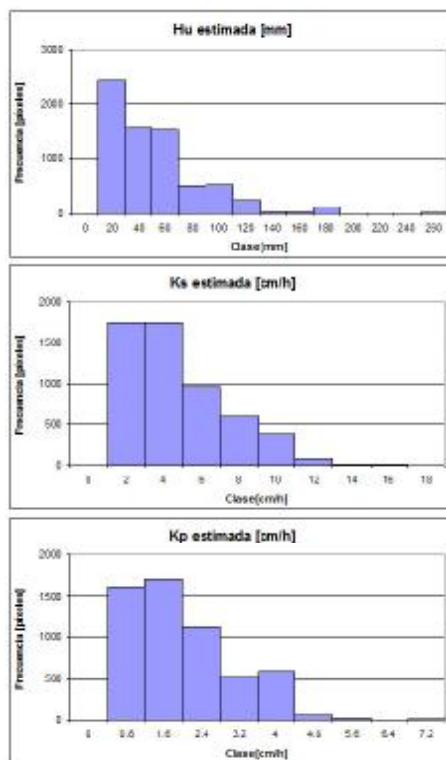


Figura 6.69: Histogramas de frecuencias de los valores estimados de las variables principales

Una vez analizar el ajuste desde el punto de vista agregado, es necesario estudiar la forma por la cual las estimaciones realizadas generaron la distribución espacial de las variables principales (Figura 6.70 y Cuadro 6.93).

Analizando los parámetros de los modelos ajustados a los variogramas experimentales de los resultados de la estimación, se observan algunas diferencias con los correspondientes a los valores modales de las variables principales.

Mientras que el alcance de los variogramas de los valores modales es en todos los casos, de 2000 $m.$, en la estimación los alcances varían entre 2000 (para el caso de u) y 3000 $m.$ (para el caso de Ks).

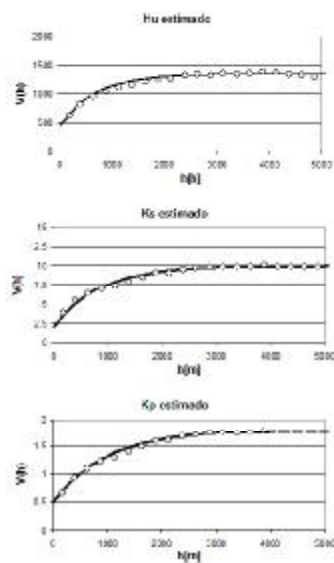


Figura 6.70: Estructura espacial de los valores estimados de las variables principales. Variogramas omnidireccionales

De igual forma que en los casos anteriores, y a pesar de la escala a la cual se define la información en este caso, existe un claro efecto pepita en los variogramas experimentales de las variables principales estimadas.

En cuanto al factor de escala de los modelos ajustados, éstos son particularmente diferentes en el caso de Hu , y en menor medida en el caso de Kp .

Si embargo, analizando los resultado de forma global éstos guardan clara relación a los observados en los valores modales, en cuanto a forma y escala.

Variable	Ajuste	$c0$	c	a
Hu modal	Exponencial	450.0	900	2000.0
Ks modal	Exponencial	2.0	8.0	2500.0
Kp modal	Exponencial	0.5	1.3	3000.0

Cuadro 6.93: Ajuste de los variogramas de los valores estimados de las variables principales.

6.5.6. Calibración y validación del modelo TETIS en la cuenca del Réal Collobrières

6.5.6.1. Información de los eventos

Del gran número de eventos registrados por el CEMAGREF, se seleccionaron los que registraron una precipitación superior a 200 mm. Se cuenta con la siguiente información para cada evento:

- a) El registro pluviográfico en nueve estaciones (resolución horaria)
- b) El registro limnigráfico de tres estaciones: Pont de Fer, Maliere y Collobrières
- c) El registro de temperaturas durante los períodos de análisis en dos estaciones llamadas Lambert y Collobrières.

6.5.6.2. Calibración del modelo TETIS

Para la calibración del modelo TETIS se utilizó únicamente el evento 1, registrado en la estación de aforo de Pont de Fer, entre el 26 de enero y el 12 de febrero de 1974. Este evento en realidad corresponde a dos tormentas y sus respectivas crecidas espaciadas varios días.

Para la verificación del modelo se cuenta con información del mismo evento en dos subcuencas y de otros eventos en la cuenca y sus subcuencas. La información disponible de la precipitación tiene una resolución temporal horaria.

Los resultados señalados a continuación fueron ya expuestos por Vélez (2001).

Evento	Vol. obs. [Hm ³]	Vol. est. [Hm ³]	R_N^2
Evento 1	11.101	11.257	0.924

Cuadro 6.94: Resultados de la calibración del modelo TETIS en Pont de Fer, sobre la base de los valores del Evento 1

Para la calibración y validación se dio más importancia al ajuste de las curvaturas de los hidrogramas, tal como se hizo en los casos anteriores. La coincidencia entre la curvatura de la rama descendente de los hidrogramas simulados con la curvatura correspondiente en los hidrogramas observados (tanto en los eventos utilizados en la calibración, como en los usados para la verificación) indica que los valores estimados de Hu , Ks y Kp es coherente con la realidad estas componentes parecen ser acertadas para su representación, por lo que la configuración del modelo parece adecuada (Figura 6.71 y Cuadro 6.95).

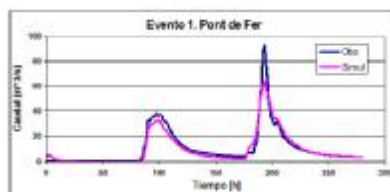


Figura 6.71: Calibración de TETIS. Evento 1

Variable	Factor corrector
Almacenamiento capilar	1.30
Evapotranspiración	1.50
Infiltración	0.67
Escorrentía	0.68
Percolación	0.71
Flujo subsuperficial	350.0
Pérdidas subterráneas	0.001
Pérdidas subterráneas	78.00
Velocidad de flujo	1.00

Cuadro 6.95: Factores correctores obtenidos mediante calibración en la estación Pont de Fer. Evento 1

Debido a que los factores de corrección del ajuste son cercanos a la unidad (en orden de magnitud), lo que indica que en los aspectos relacionados con estos parámetros el modelo parece ser muy coherente con la física.

6.5.6.3. Validación del modelo

Para la validación del modelo se usaron los registros de los caudales registrados en el Evento 1 en las estaciones de Maliere y Collobirières, y los caudales correspondientes a dos eventos adicionales:

- a) Evento 2 (entre el 30 de enero y el 12 de febrero de 1976)
- b) Evento 3 (entre el 11 y el 31 de octubre de 1974)

En las figuras 6.72, 6.73 y 6.74, y en el Cuadro 6.96 se ilustran los resultados obtenidos.

En todos los eventos analizados, se puede observar un buen ajuste entre los hidrogramas observados en Pont de Fer y los hidrogramas obtenidos con el modelo. Se observa además, que los eventos en cuanto a su magnitud, cubren un rango bastante amplio y que en todos los casos el ajuste es satisfactorio. El buen desempeño del

modelo ante eventos de tan distinto orden de magnitud demuestra su coherencia y robustez. Para la validación también se utilizaron los registros de los eventos, 2 y 3 en las estaciones de registro de caudales en las subcuencas de Collobrières y Maliere. Hay que destacar que el modelo no ha sido calibrado en estas estaciones.

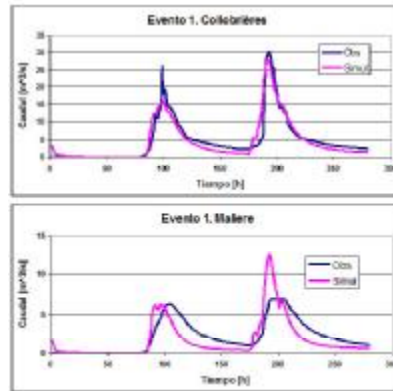


Figura 6.72: Validación de TETIS. Evento 2

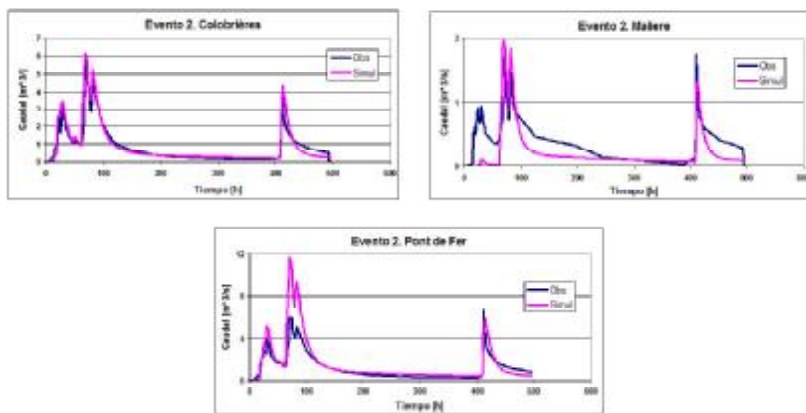


Figura 6.73: Validación de TETIS. Evento 2

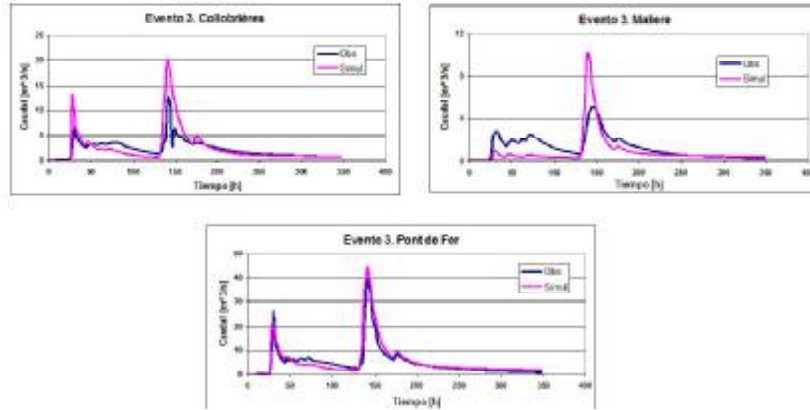


Figura 6.74: Validación de TETIS. Evento 3

Evento	Vol. obs. [Hm³]	Vol. est. [Hm³]	R_N^2
Evento 1			
Collobrier	5.25	5.06	0.91
Maliere	2.34	1.96	0.48
Evento 3			
Pont de Fer	2.18	3.07	0.83
Collobrier	1.53	1.70	0.88
Maliere	0.62	0.41	0.76
Evento 3			
Pont de Fer	5.97	7.08	0.89
Collobrier	2.65	3.22	-0.18
Maliere	1.51	1.16	0.16

Cuadro 6.96: Resultados de la validación en diferentes puntos de aforo y en diferentes eventos

En términos generales, los hidrogramas simulados se ajustan bastante bien a los observados, y en cada uno de los casos se encuentran rasgos bastante similares en ambos casos.

Los resultados señalan así que el modelo y las estimaciones de Hu , Ks y Kp son coherente espacialmente con el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La comparación visual del hidrograma observado con el hidrograma simulado en las distintas estaciones y para los distintos eventos considerados en la validación permite considerar que, en términos generales, la validación del modelo TETIS es satisfactoria.

Una observación más detallada permite considerar que:

- a) En términos generales, la coincidencia de los valores de los caudales pico es bastante buena, en todos los casos es aceptable ya que los valores obtenidos son de un orden de magnitud similar.
- b) La coincidencia en el volumen de la crecida en la mayoría de los casos es bastante buena. En ningún caso las diferencias son superiores al 100 % del valor observado.
- c) En las curvas de recesión el ajuste es muy bueno ya que las curvaturas de los hidrogramas simulados son bastante similares a las curvaturas de los caudales observados.

No debe dejarse de destacar el hecho que, en este caso, a partir de una calibración en un punto (Pont de Fer) se logró reproducir de forma aceptable los hidrogramas observados en dos subcuencas diferentes, en tres eventos distintos.

Finalmente, cabe destacar que se ha mostrado la efectividad del método propuesto en esta tesis en cuencas de muy diferente tamaño, con diferente tipo y detalle de información, en diferentes regiones climáticas del sector Sur de Europa.

6.5.7. Influencia de la variabilidad espacial en la modelación

El funcionamiento, efectividad y capacidad operativa del método propuesto en esta tesis ha sido comprobado, en diferentes ambientes geológicos y con diferente calidad de información.

A continuación, y para concluir este trabajo, es importante comprobar el grado de influencia de la variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos sobre los resultados de la modelación hidrológica. Se conocen los beneficios de la modelación distribuida: como la capacidad para modelar el comportamiento hidrológico del terreno en cualquier punto de la cuenca, la capacidad de producir resultados precisos y reproducibles en el tiempo y el espacio, entre otros. Queda por comprobar si

existe Existe una diferencia clara con la modelación agregada y pseudodistribuida como función de las limitaciones de ambas respecto a la primera.

Existen diferentes preguntas importantes en lo que respecta a la modelación distribuida. Tales preguntas se orientan a dos temas claves, ambos estrechamente relacionados entre sí. Por una parte, los interrogantes se concentran respecto a la existencia o no de diferencias en la estimación de variables principales a la escala de celda o no, como la cuenca total o por subcuencas. Por otra parte las dudas se orientan directamente a la validez y avance que significa en sí a la modelación distribuida. Ambas se relacionan, además, con la necesidad de conocer si influye la existencia de una dependencia espacial entre los valores de la variable a lo largo del espacio en los resultados de la modelación. Lo último lleva al investigador a analizar la importancia de la varianza espacial en la distribución de una variable.

En esta tesis se ha expuesto un procedimiento de utilizado para este tipo de estudios. Adicionalmente a la calibración y validación del modelo en la cuenca del Réal Collobrières, la información hidrológica permite elaborar algunos estudios complementarios, dirigidos a confirmar desde otro punto de vista algunas de los conceptos básicos expresados en esta tesis, y aclarar las incógnitas planteadas en el párrafo anterior. Los mismos hacen referencia, como es lógico, a la importancia de tener en cuenta la variabilidad espacial del comportamiento hidrológico del terreno en la modelación hidrológica y la necesidad de la estimación distribuida de las variables principales.

6.5.8. Información utilizada

6.5.8.1. Eventos hidrológicos y red de observación

Par el desarrollo del análisis se contó, en primer lugar, con los registros de eventos hidrológicos mencionados en el estudio de la cuenca del Réal Collobrières. Los mismos fueron registrados, como ya se aclaró, en tres puntos de aforo : Collobrier, Maliere y Pont de Fer. Estos eventos fueron denominados como “eventos reales”.

Para poder comprobar los efectos de la variabilidad espacial en la modelación hidrológica se tuvieron en cuenta un conjunto de 280 puntos de aforo internos de la cuenca, en los cuales estaban incluidos las estaciones antes mencionadas. A éste nueva red de aforos se la denominó como “sintética”, para distinguirla de la original. La posición geográfica de los puntos de observación que la componen fueron seleccionadas de forma aleatoria a partir de aquellos puntos situados que tuvieran un área acumulada de cuenca aguas arriba igual o superior a tres celdas. De esta forma se mantuvo la norma empírica por la cual se entiende que los puntos de aforo agregados se hallaban dentro de la red de drenaje de la cuenca. Tal norma fue elaborada a partir de las observaciones de campo, en las cuales se pudo comprobar que el inicio de una red de drenaje definida en campo coincidía, en una malla ráster

de píxeles de 100 por 100 metros, con un mínimo de tres celdas acumuladas en un modelo de elevación del terreno.

Para poseer una referencia de los valores de caudal que se espera observar en cada uno de los 280 puntos de la red sintética, se generó un conjunto de eventos sintéticos. Los mismos se generaron a partir de los resultados de simulación obtenidos en todos los puntos de la red sintética, ejecutándose el modelo calibrado según lo expuesto en el Cuadro 6.95, para los casos de los tres eventos reales, ya mencionados. Se obtuvieron así, tres “eventos sintéticos” equivalentes a los eventos reales 1, 2 y 3, con los cuales elaborar un análisis distribuido de los caudales simulados. Dicho análisis podrá ser analizado en el presente capítulo.

6.5.8.2. Escenarios de simulación

Adicionalmente se elaboraron nuevos conjuntos de capas temáticas para las tres variables principales. Cada uno de éstos respondió a diferentes hipótesis de distribución de la información. Así, el primer conjunto de capas correspondió a la hipótesis de distribución de un modelo agregado, donde las capas de Hu , Ks y Kp consistían en un único valor, correspondiente al valor medio en la cuenca de cada una de las variables principales. La segunda hipótesis corresponde a un modelo pseudodistribuido, conforme a lo cual las capas temáticas contenían tres unidades cartográficas, dos representando a las subcuencas de Collobrier y Maliere y una correspondiente al resto de la cuenca hasta Pont de Fer. Cada una de estas unidades cartográficas tenía asignado un único valor para cada variable principal, equivalente al valor medio de éstas en cada subcuenca.

Finalmente, la tercer hipótesis tiene en cuenta la posible aleatoriedad de la distribución de las variables principales en el terreno. De esta forma, cada capa temática representó una variable aleatoria normal, cuya media y varianza corresponden a la media y varianza de cada una de las variables. Es decir que cada píxel de cada una de las capas temáticas fue una realización de una variable aleatoria y que aproxima a una distribución normal con media \bar{x} y varianza σ^2 :

$$y \approx N(\bar{x}, \sigma^2) \quad (6.3)$$

Los valores medios y de la varianza de cada variable principal se calcularon a partir de las estimaciones distribuidas, señaladas en la sección anterior. A igual que lo señalado en puntos anteriores, para conservar las cualidades estadísticas de las variables principales, los valores de media y varianza fueron calculados a a partir de las variables principales transformadas según la raíz cuadrada, en el caso de Hu , y logaritmo natural, en el caso de Ks y Kp .

Por otra parte, los datos de escurrimiento en la red de aforos “sintética” fueron en su totalidad elaborados a partir de la simulación distribuida de caudales, utilizando como dato para la calibración del modelo el Evento 1, observado en Pont de Fer.

Finalmente, cabe aclarar que para este análisis las calibraciones del modelo se realizaron exclusivamente sobre la ase de a información del evento 1 (observado, o su equivalente sintético) en Pont de Fer.

6.5.9. La capacidad de validación de las calibraciones realizadas con modelos distribuidos

En primer lugar, se procedió a estudiar en concreto los resultados que se obtienen a partir de información de diferente grado de agregación y aleatoriedad.

A diferencia del estudio anterior, en este caso se tuvieron en cuenta solamente los valores registrados en la realidad en las tres estaciones de aforo originales de la cuenca. En consecuencia, el episodio de calibración fue el evento 1 “real”, en Pont de Fer. Los eventos de validación temporal fueron los eventos “reales” 2 y 3, y la validación espacial se realizó comparando los resultados de la simulación con los observados en en Malieres y Collobrier., en los tres eventos mencionados, y en Pont de Ferm en los eventos 2 y 3. Los resultados son expuestos en el Cuadro 6.97

Punto de aforo	Evento 1	Evento 2	Evento 3
Collobrier. (Hu, Ks, Kp) Distribuido	0.91	0.76	-0.18
Maliere. (Hu, Ks, Kp) Distribuido	0.48	0.88	0.16
Pont de Fer. (Hu, Ks, Kp) Distribuido	0.92	0.83	0.89
Collobrier. (Hu, Ks, Kp) Aleatorio	0.354	0.263	-4.209
Maliere. (Hu, Ks, Kp) Aleatorio	-0.738	-0.451	-2.597
Pont de Fer. (Hu, Ks, Kp) Aleatorio	0.845	-1.723	0.019
Collobrier. (Hu, Ks, Kp) Agregado	0.403	-0.869	-4.156
Maliere. (Hu, Ks, Kp) Agregado	-0.688	-2.807	-2.320
Pont de Fer. (Hu, Ks, Kp) Aleatorio	0.836	-4.189	-0.366
Collobrier. (Hu, Ks, Kp) Pseudodistribuido	0.359	-0.065	-3.772
Maliere. (Hu, Ks, Kp) Pseudodistribuido	-0.586	-0.530	-1.901
Pont de Fer. (Hu, Ks, Kp) Pseudodistribuido	0.880	-1.907	0.341

Cuadro 6.97: Valores del Índice de Nash-Shutcliffe para diferentes opciones de agregación de variables principales

Los resultados indican, por una parte, que la diferente forma en que es distribuida la información en el espacio influye decisivamente en la respuesta hidrológica que puede simular un modelo.

Por otra parte, los resultados señalan con claridad que la estimación espacial coherente de las variables principales en un modelo distribuido genera resultados claramente mejores y reproducibles en eventos de validación. En ningún de los demás casos analizados se produjeron este resultados.

Los resultados permiten afirmar que, con diferente tipo de información, en modelos agregados, distribuidos o pseudodistribuidos es posible lograr un ajuste bueno regularmente bueno de un determinado evento hidrológico. Sin embargo dichos ajustes no son posibles de validar en eventos diferentes al de calibración.

La agregación espacial de la información genera una progresiva promediación de los valores de los parámetros. Tal proceso provoca que diferencias claras en la simulación de caudales, ya que todos los puntos del terreno empiezan a tener similares cualidades, hasta que finalmente en la modelación agregada la totalidad de la cuenca se supone que funciona de la misma forma.

Existe en los resultados la evidencia clara que la variabilidad espacial de los parámetros de modelación del suelo es fundamental en la modelación hidrológica. Así, la varianza de los valores de las variables principales favorecen a que la modelación sea más realista y reproducible en tiempo y espacio. Sin embargo, tal variabilidad espacial debe responder *necesariamente* a un criterio de tendencia regional. Dicha tendencia está dada por los elementos que componen el terreno.

La distribución espacial con criterio de los valores de las variables principales ejercen una influencia notable en la modelación. Es por esa razón que a mismas condiciones de eventos y modelo, la utilización de una variable aleatoria de misma media y varianza que la variable principal no genera los mismos resultados que utilizando una estimación fiable de la distribución espacial de la misma.

6.5.10. El efecto de la variabilidad espacial en la modelación hidrológica

Una vez definida la influencia del grado de distribución en los resultados de la modelación, se analizó desde otro punto de vista la importancia de tener o no en cuenta a la variabilidad espacial en la estimación de un fenómeno hidrológico.

Para poder obtener conclusiones se procedió a realizar simulaciones de los eventos 1, 2 y 3 con cada una de las opciones de variables principales explicadas en el punto anterior. Así se obtuvieron simulaciones utilizando la información de cada uno de los eventos, utilizando capas de valores agregados, pseudodistribuidos y aleatorios respectivamente. Finalmente, los resultados fueron comparados en función del área acumulada correspondiente a cada punto de aforo sintético. Sobre esta base se calculó, en cada uno de ellos, el índice de Nash-Shutcliffe a fin de contar con una medida estandarizada del error entre la estimación y el dato original. Los resultados se exponen en la Figura 6.75.

En el primer gráfico de la mencionada Figura se puede señalar que, tal como se indicó anteriormente, es posible lograr buenos resultados por calibración en un único evento a partir de diferente tipo y grado de agregación de la información. Los dos gráficos siguientes, corresponden a los eventos de validación de la calibración original en los eventos 2 y 3 “sintéticos”.

En la validación se observa, por una parte, la reducción de la precisión de resultados respecto a los observados en primer lugar. Por otra parte se puede comprobar un punto de particular interés: a medida que se tiene más en cuenta la variabilidad espacial de las variables principales, los resultados mejoran sustancialmente. Así, con información agregada se obtienen peores resultados que con información pseudodistribuida.

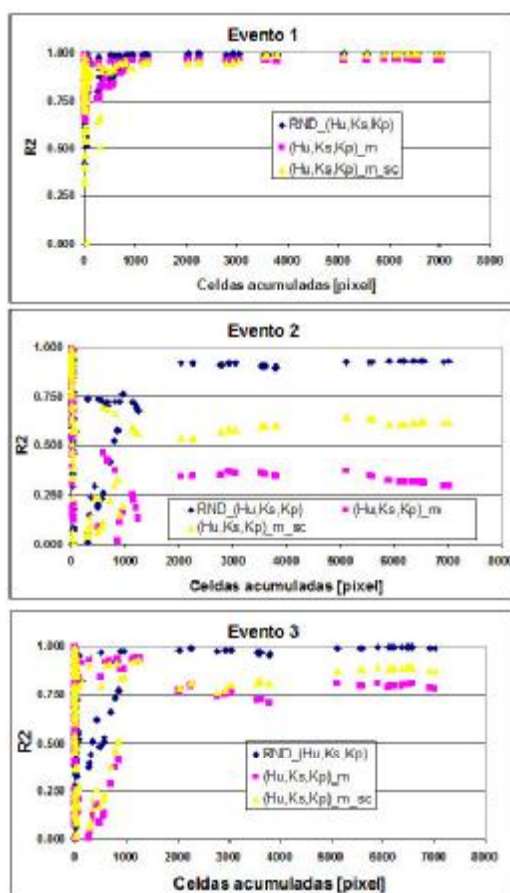


Figura 6.75: Simulaciones con diferentes tipos de información

Concretamente en este análisis, la información aleatoria (con media y varianza calculada sobre la base de los valores distribuidos) permite mejores resultados debido a que, aunque sin respetar el patrón de distribución espacial, respeta la variabilidad estadística natural de la cuenca en cuanto a los valores. En función de tal, los resultados serán mejores que los anteriores. Sin embargo con esta distribución no es posible obtener resultados tan buenos como en el caso de información distribuida espacialmente según el procedimiento propuesto en esta tesis.

El efecto de la agregación espacial se puede observar también en este análisis. Resulta evidente en los tres gráficos de la Figura el cambio en la distribución de los valores del error a partir de las 1000 celdas acumuladas, es decir 10 Km^2 de área acumulada. Tales resultados indican, que sería admisible no tener en cuenta la variabilidad espacial del terreno celda a celda a partir de dicho valor. Lo dicho indica la necesaria existencia de un equilibrio entre el grado de detalle de la variabilidad espacial y la escala del análisis que se pretende realizar.

No debe olvidarse así los resultados obtenidos en el punto anterior. Por el contrario, las conclusiones de mayor valor surgen de la integración de ambos análisis.

Capítulo 7

Resumen y conclusiones

A partir del trabajo expuestos en la presente Tesis se pueden extraer conclusiones en tres temas claramente definidos: *base conceptual del trabajo*, *base de valores de referencia* y *distribución espacial de parámetros hidrológicos para la modelación hidrológica*. El primero es fundamental para el avance de esta Tesis y la garantía de los resultados expuestos. El segundo punto expresa una visión del conocimiento científico aplicado concreto, y en determinadas áreas de estudio. Finalmente, el tercer tema trata de los resultados esperables en la modelación hidrológica teniendo en cuenta o no la variabilidad espacial. Para ello es necesario analizar tanto los resultados obtenidos por el procedimiento propuesto en esta Tesis, como los efectos que éstos producen en la simulación hidrológica.

A continuación se desarrollan cada uno de los mismos.

7.1. El terreno

Desde un primer momento se reconoció la necesidad de *contar con un esquema que permita explicar y predecir el comportamiento hidrológico del terreno a partir de hipótesis científicas y modelos*. Para formular unas y otros es totalmente necesario *distinguir y organizar* un conjunto de ideas que hagan del trabajo *una labor organizada, objetiva y operativa*.

En esta Tesis se destaca que el análisis hidrológico en sistemas naturales se basa en dos elementos clave: la distinción entre *información* y *datos*, y la forma en que ambos son obtenidos a partir de la realidad observable. Los valores de los parámetros de modelación se basan en los datos utilizados para el desarrollo del modelo y éstos pertenecen a un conjunto mayor; el de la información. La información se relaciona directamente con el *conocimiento* que se posee del tema. Es a partir de la información cuando se pueden generar datos concretos. Así, el éxito en la modelación (el grado de acierto y precisión) depende, además del modelo, de los datos utilizados y , en consecuencia, de la información procesada.

La información posee una estructura que le es propia, en la cual se distinguen *variables, características y cualidades*. Además la misma se puede expresar de diferentes forma: *cualitativa, cuantitativa*, etc. A partir de estos elementos, la misma es definida y procesada.

En esta Tesis se ha insistido en diferentes ocasiones en la necesidad de *conocer el medio y definirlo correctamente*. Para ello se relacionaron lo *conceptos genéticos* tradicionales en el análisis del terreno y los de *jerarquía y escala* mediante diferentes vías de análisis. Así por una parte se destacó la existencia en el paisaje de una o más *componentes sistemáticas*, con las cuales guiar análisis más detallados. Por otra, las características y cualidades relacionadas con procesos internos del terreno, relacionados a su estructura regional, ocupan un *nivel jerárquico superior* dentro del paisaje. Su influencia se transmite hacia los niveles inferiores de la estructura del terreno, visto éste como un *sistema*. Por el contrario, las características y cualidades asociadas a procesos exógenos exigen siempre para ser observados un nivel de detalle mayor que en el caso de los endógenos. Así, surgen argumentos para explicar el hecho por el cual en un análisis del terreno es más fácil hallar *componentes sistemáticas* cuando éste se desarrolla a nivel regional, que cuando los estudios se realizan a nivel local.

En la definición de los componentes del terreno se destacan *los procesos y las formas*. Mientras que los primeros son muchas veces difíciles de describir en términos concretos, las formas sí lo son. Si éstas son definidas correctamente pueden ser utilizadas como un medio eficaz para la descripción y estudio de los procesos que las originaron. A partir de aquí, la integración de observaciones a diversas escalas de agregación se destaca como fundamental. El concepto de *facies* es un elemento clave para comprender este proceso. El mismo relaciona al terreno con los conceptos de *jerarquía* de los procesos que le dieron origen.

Una vez comprendida la *naturaleza multiescalar del terreno*, el suelo surge como el elemento que *sintetiza* esta característica clave y es a su vez, la vía para la explicación de su comportamiento hidrológico. En esta Tesis se destaca al mismo como el elemento clave a modelar.

El suelo es considerado en esta Tesis desde diferentes puntos de vista. Así, el suelo además de ser un material no rocoso, sostén físico de los cultivos y resto de plantas, es el *producto de una combinación de factores naturales, en un terreno en concreto*. Lo dicho se refleja en su morfología interna y en su localización específica en el terreno.

El suelo es un individuo dentro del terreno. Su definición puntual se realiza por medio del perfil que define la columna existente entre la superficie del suelo y el material lítico sobre el que se apoya. Ésta y otras más se integran formando una *sucesión continua en el terreno*. Su análisis requiere reconocer que los mismos se integran a la secuencias de *facies* que describen el resto del paisaje y todos en conjunto componen la *arquitectura*, a diferentes escalas del terreno. Así la variabilidad

del terreno es explicado desde un punto de vista de su *génesis*.

Cada individuo de suelo puede considerarse *una facies más del conjunto que representa a los materiales del terreno*. La presencia física de un individuo de suelo se relaciona con el material parental a partir del cual se desarrolló y, a su vez con los materiales geológicos sobre los que se apoyan. El nexo de unión más importante entre ambas es la arquitectura del terreno, en consecuencia: *los elementos arquitectónicos definidos en Geología*. Esto último permite confirmar una vez más la naturaleza *multiescalar* del medio sobre el cual se pretende elaborar una parametrización concreta.

Los perfiles de suelos y litológicos (o litoestratigráficos) son conceptos equivalentes que indican la conformación de los materiales (edáficos o geológicos) en una localidad puntual del terreno. El pedón es una definición especial en Edafología equivalente con la idea de la caracterización geológica de una localidad en concreto, cuya área es despreciable en relación a la superficie total del estudio. *La unión y correlación de diferentes pedones genera un polipedón, lo cual es conceptualmente equivalente al concepto de facies en la escala geológica macroscópica*. La relación lateral y vertical de facies generan secuencias de facies. *La secuencia de facies es equivalente al concepto de paisajes edáficos, ya que se trata de polipedones relacionados lateralmente entre sí, como la manifestación tridimensional del concepto de catena*. Relacionando secuencias de facies se pueden generar elementos arquitectónicos, separados entre sí por superficies de diferente jerarquía dentro del ambiente analizado dando lugar a la definición de la arquitectura del terreno (en síntesis: definición de las relaciones entre formas, materiales y estructura).

Como consecuencia de lo anterior, agrupando y relacionando entre sí diferentes paisajes edáficos se pueden relacionar a los suelos de forma organizada y de acuerdo a la morfología del paisaje. *Cada grupo de polipedones que definen un paisaje edáfico concreto puede considerarse como un elemento arquitectónico*.

Sobre la base de un esquema formal de clasificación en particular, *los perfiles se asocian a una unidad taxonómica, la cual se integra con otras diferentes en una o más unidades cartográficas*. De esta manera, *la variabilidad de los suelos en el terreno se expresa formalmente*. Sin embargo, esta es sólo una expresión que sin tener en cuenta lo expresado en párrafos anteriores corre el peligro de perder sentido, quedando fundamentalmente como una expresión gráfica. En consecuencia, sin relacionar las expresiones formales con las genéticas, no es muy difícil obtener respuestas concretas más allá de las de tipo taxonómico o descriptivo general. La integración y relación de conceptos es la clave para resolver el problema práctico del comportamiento hidrológico del terreno. Así conceptos que aparentemente guardan distancia entre sí, como facies, elementos arquitectónicos, pedón y catena toman sentido en la definición unificada del suelo que se ha presentado en esta Tesis.

Desde el punto de vista operativo, *la unificación de las definiciones genéticas y*

formales de los suelos tuvo por finalidad relacionar de forma directa los enfoques fisiográficos y paramétricos, muchas veces desarrollados de forma separada entre sí. Respetando las etapas de cada uno de ellos, en esta Tesis se propuso un camino por el cual, a partir de un estudio descriptivo, arribar a la definición paramétrica del terreno. Tal resultado se propone ser obtenido a partir de la asignación de valores concretos a cada una de las unidades cartográficas, definidas en una primera etapa. así, a partir del conocimiento integral del terreno es posible asignarle valores concretos a las características y cualidades hidrológicas del mismo.

El nexo de unión de estas etapas es el *diseño de muestreo*. Por otra parte, en vistas a un estudio hidrológico, un diseño de muestreo debe realizarse sobre la base de un conocimiento fisiográfico detallado del medio no sólo en su configuración espacial sino también en su génesis y en su significado como parte integrante del medio ambiente, y reflejo de las interacciones presentes del medio.

En todo momento del estudio, el suelo es la clave para la realización de los trabajos. La adecuada definición de categorías de suelo permite delimitar sectores del terreno coherentes interna y externamente entre sí, y que representan de modo completo la variabilidad hidrológica del terreno en el área de estudio.

7.2. La valores de referencia

Paralelamente a la definición conceptual de terreno en general y del suelo en particular, al inicio de una aplicación hidrológica es necesario contar con un conjunto de *valores posibles* para los parámetros a utilizar en un cálculo concreto. Éstos son denominados en esta Tesis *valores de referencia*. Otros autores se refieren a este tema como la “estimación *a priori* de parámetros de modelación”. Este tipo de valores son frecuentes de encontrar en la literatura. Sin embargo, normalmente tanto el tipo y cantidad de casos señalados, así como las unidades con que se expresan no suele responder a un esquema uniforme.

Tomando en cuenta un conjunto de valores de referencia adecuados, es posible elaborar uno o más *escenarios básicos* en cada uno de los cuales organizar y analizar el total de la información disponible y elaborar estrategias futuras para el refinamiento y/o ampliación de la misma.

Tal como se expresó en el Capítulo 3 de esta Tesis, los valores de referencia *contribuyen* a:

- a) *Valorar* la calidad de la información con que se cuenta, por comparación entre los valores obtenidos en una toma de muestra y los valores más frecuentemente hallados en terrenos o situaciones similares.
- b) *Elaborar una pre-calibración* de los parámetros hidrológicos necesarios, cuando se carece de valores muestrales, o su densidad es baja respecto a la requerida en la operación de diseño, simulación y/o calibración.

- c) *Diseñar* la estrategia para una futura toma de muestras, sobre la base de las necesidades del trabajo y los desvíos entre los valores hallados en la situación que se analiza y los de referencia.

Sin embargo, no debe olvidarse que los valores de referencia son solamente un *medio* para realizar una *composición previa* de la situación que se analiza. En consecuencia, dichos valores *no son absolutos ni definitivos*, pues no pueden reemplazar a la realidad que representan las muestras del terreno concreto que se analiza.

En el Capítulo 4 de esta Tesis se exponen los resultados de un minucioso proceso de revisión, ordenamiento y síntesis de valores de referencia para diferentes parámetros hidrológicos del suelo. De los mismos se destaca la evidente posibilidad con la que se cuenta para integrar información global al análisis concreto que se desarrolla. Esto fue ya destacado en capítulos anteriores de esta Tesis. En este conjunto de información externa general se incluyen también las funciones de pedotransferencia, muy destacadas en las últimas décadas.

Finalmente, cabe destacar que en la actualidad existen una gran variedad de información disponible y de libre acceso con la cual enriquecer los resultados de los estudios hidrológicos que se realizan.

7.3. El procedimiento de estimación propuesto

En el primer capítulo de esta Tesis, se destacó la necesidad de elaborar un conjunto de criterios que permitan integrar la información disponible, con el fin de elaborar una *primera aproximación* a la definición de variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos en el paisaje. La base de tales criterios se expusieron en los primeros capítulos de esta Tesis.

En el Capítulo 3 de esta Tesis se expusieron, ordenaron y elaboraron de criterios de interpretación y análisis del terreno. Los tuvieron como referencia a los suelos, en cuanto a sus características y cualidades físicas y su relación con el paisaje. De lo anterior, surge una conclusión general sobre la cual se elabora el procedimiento expuesto en esta Tesis.

Tal como ya ha sido expuesto, se puede afirmar que *la posición de los diferentes elementos del paisaje está en relación directa con la existencia de gradientes ambientales*. Por medio de los mismos es posible deducir con claridad el desarrollo de los procesos de modificación del paisaje y génesis de suelos. En consecuencia, *los gradientes naturales permiten explicar la realidad observada sobre la base de los elementos que intervienen en los procesos naturales mencionados*. Al definir tales gradientes, se define también la tendencia regional que poseen las variables que determinan el comportamiento hidrológico de los suelos.

A partir de los conceptos revisados y elaborados en esta Tesis, en el Capítulo 5 se expone la metodología propuesta para la estimación espacial de tres parámetros hidrológicos en particular: *capacidad de almacenamiento del suelo*, *conductividad hidráulica saturada del suelo* y *conductividad hidráulica saturada del substrato del suelo*.

Concretamente, la base del procedimiento propuesto en esta Tesis trata, en esencia, de analizar los gradientes más destacados en las variables principales a partir de su relación con los gradientes observados en las variables ambientales. Se insiste que *el método propuesto es, simplemente, la exposición ordenada del razonamiento que comúnmente lleva a cabo un técnico entrenado en el medio natural*. El mismo es, fundamentalmente, un medio para demostrar las hipótesis planteadas en esta Tesis. Con éstos se pretende destacar el *valor* que posee la información disponible a la luz de un análisis *sistemático* que tenga en cuenta lo que ya se *sabe* del medio y la *experiencia* propia del operador. Lo propuesto en esta Tesis no es un método automático. El grado de sensibilidad a los gradientes ambientales depende de forma directa de la información con que se cuenta y de la experiencia del operador. Sin embargo, el contar con una herramienta de trabajo que contenga bases conceptuales suficientes y cuyo desarrollo práctico es reproducible, facilita claramente la solución del problema.

Conceptualmente, el procedimiento propuesto contempla que *la variación espacial del medio natural no es aleatoria, y los suelos no son la excepción*. El mismo pone énfasis en la necesidad de analizar la realidad observable a fin de lograr *aprender* de la naturaleza, deducir el comportamiento del terreno y *reproducir* estos conocimientos en otros casos. Así, en primera instancia se puede considerar que la *variación espacial* de una característica o cualidad del suelo varía en el terreno de acuerdo a una tendencia que está determinada a partir de la presencia y orientación de los gradientes naturales, dados por los demás componentes del terreno.

El procedimiento presentado en esta Tesis propone obtener esa tendencia a partir de la *relación lineal* de las variables cuya distribución espacial se pretende analizar (denominadas aquí como “*variables principales*”), y las variables que representan a diferentes características o cualidades del suelo (denominadas aquí como “*variables ambientales*”). El procedimiento práctico se basa en el procesamiento previo, y por separado, de la información ambiental y de las variables principales, para posteriormente ser relacionadas mediante una expresión funcional. Parte de la propuesta de esta Tesis consiste en la posibilidad de *integrar en una misma ecuación a variables de diferente formato*. Así, se incluyen variables cuantitativas y cualitativas. Por otra parte, para la mejor utilización de la información y una más eficiente definición de relaciones entre variables ambientales, se introduce el concepto de *interacción*. Esto permite expresar de forma analítica lo ya mencionado en capítulos anteriores.

Así, el terreno de estudio es dividido según una malla de elementos individuales y de geometría regular. El modelo de variabilidad de las variables principales explica su tendencia regional y, al mismo tiempo, se utiliza para la estimación a escala de celda. En consecuencia, los resultados de análisis permiten, entonces, obtener valores individuales *para cada una de las celdas* analizadas.

De forma *cartográfica*, se elabora un sistema de muestreo basado en la generación de unidades cartográficas especiales a tal fin. A partir de la definición de las mismas se obtienen los valores de las variables ambientales y principales, con las cuales se elaborará un esquema de ajuste por mínimos cuadrados ponderados. El peso de ponderación lo constituye la representatividad areal de cada uno de los valores analizados. Mediante este método de ajuste se van analizando y seleccionando las diferentes variables ambientales analizadas en el estudio. El conjunto de variables ambientales que componen la ecuación de la tendencia son seleccionados en función de su grado de capacidad explicativa de la variabilidad espacial de la variable principal analizada.

7.4. La distribución espacial de las variables

El procedimiento propuesto fue aplicado en tres casos diferentes, en localidades localizadas en España y el sur de Francia. Los tres casos permiten analizar diferentes situaciones, en distintos tipos de terreno, donde la calidad y la cantidad de *la información no ha sido la misma*.

En cada caso analizado, se elaboró una descripción sintética del área de estudio. El objetivo de esta descripción fue la de definir con la mayor claridad posible las características principales de los elementos que constituyen el terreno, es decir: su estructura, su morfología y su cubierta vegetal y los suelos que se definen en él. Una vez descrito el terreno, la etapa siguiente implicó la definición de las variables principales y ambientales, sobre la base de la información disponible. Definidas las variables, se procede a la aplicación del procedimiento propuesto. Lo dicho implica no sólo calcular las tendencias regionales de los valores de las variables principales, sino también el análisis de los resultados obtenidos: precisión de ajuste y distribución espacial. La etapa final del estudio es la utilización de la estimación de las variables principales en la modelación hidrológica distribuida. Para tal fin se procedió a la calibración y validación del modelo TETIS en cada uno de los casos analizados. Esta tarea tuvo como objetivo probar el funcionamiento práctico de las estimaciones realizadas en la modelación de la respuesta hidrológica del terreno analizado.

Los resultados obtenidos reproducen la información original con precisión y permiten estimar la variabilidad interna de las unidades cartográficas de suelos de forma tal que su estructura espacial coincida con la estructura general de la información de la cual procedió. Las variables principales, en cada uno de los tres casos

analizados, fueron relacionadas con diferentes variables ambientales. Resulta muy destacado que en todos los casos analizados el grado de explicación logrados por el ajuste *supera el 80 por ciento de la variabilidad* expuesta por los valores analizados.

Más allá de las particularidades propias de cada caso analizado, el análisis muestra con claridad que *para lograr un ajuste aceptable de las variables principales, es necesario contar con variables tanto de significado regional, como local y con las interacciones entre ambas*. El conjunto de variables debe abarcar tres temas concretos: *geología, uso del suelo y relieve local*. Así, La información geológica permite definir el sentido general de los gradientes naturales que afectan a la génesis de suelos, tanto en lo que respecta al relieve de gran escala, como el tipo de materiales aflorantes y la definición del rol del subsuelo en el ciclo hidrológico de la región. Finalmente, el uso del suelo resulta de utilidad como indicador de las cualidades y características hidrológicas del terreno.

A lo destacado con anterioridad, en el análisis de la evolución del coeficiente de determinación R^2 y la reducción del error cuadrático medio de la estimación se logran precisiones adicionales. Las variables cualitativas y las interacciones entre variables cualitativas son destacan como altamente necesarias para el ajuste de las tendencias elaboradas. Así el procedimiento propuesto se destaca de otros ya desarrollados por su habilidad de incorporar variables adicionales y de representar cualitativamente el proceso de interacción, claramente destacado en la naturaleza.

Desde otro punto de vista, *la distribución espacial de los valores estimados de las variables principales fue satisfactoria*. El nivel de éxito es alto tanto si se lo analiza en forma *global* como si se analiza la distribución dentro de *sub-unidades*. Así, tal como se había observado en el caso de los valores modales, los variogramas experimentales realizados sobre las estimaciones de las variables principales señalan que cada sub-unidad hidrológica conserva su propia estructura de distribución espacial, guardando coherencia con lo observado a nivel global.

A partir del análisis de los variogramas experimentales resulta necesario destacar ciertas características de interés. Por una parte, los alcances de los variogramas de las variables principales estimadas varían normalmente entre 10 y 20 *Km.* para el caso de la cuenca del Tajo, entre 5 y 30 *Km.* en el caso del País Vasco y entre 2 y 30 *Km.* en el caso del Réal Collobrières. Por otra parte, en todos los casos se observó la presencia clara del “efecto pepita”. Estos resultados permiten afirmar que los resultados obtenidos son dependientes de la calidad de la información utilizada. Se comprueba que la estimación de las variables principales a partir de información cartográfica regional o de mediana escala no logra reproducir la variabilidad del suelo a la escala de la ladera. Lo dicho significa que la escala en la cual fueron definidas las unidades cartográficas de suelos influyen en diferente medida sobre los resultados de la estimación. Por esta razón las diferencias más grandes en el alcance de los variograma se observó en el caso donde las unidades cartográficas de suelos era radicalmente más reducida que en los casos anteriores.

En lo que respecta a la modelación distribuida de caudales, se pudo comprobar los excelentes resultados obtenidos a partir de utilizar los valores estimados de las variables ambientales seleccionadas. El índice de eficiencia de Nash-Shutcliffe representó con claridad la bondad de los ajustes. En el caso de la cuenca del Tajo, el índice superó el 0.7, en el caso del País Vasco superó en todos los casos analizados el valor de 0.7. En el caso de Réal Collobrières, los valores son variables siendo generalmente superiores a 0.5. Los resultados indican que no sólo se logra obtener una alta precisión en la calibración sino que la validación espacial permitió comprobar la bondad de los resultados. Por otra parte, los coeficientes de ajuste que con los cuales TETIS afecta a las estimaciones de las variables principales variaron entre 1.0 y 0.12 para el caso de la cuenca del Tajo; entre 1.0 y 0.02 en el caso del País Vasco y entre 1,5 y 0.7 en el caso del Réal Collobrières. Los valores menores siempre fueron los que afectaron a los valores de las conductividades hidráulicas (de suelo y substrato de suelo, respectivamente). Debe recordarse que los valores de conductividad varían según una escala logarítmica, con lo cual los valores de los coeficientes de ajuste son razonables en cuanto a las dimensiones físicas que representan. En síntesis, los resultados permiten afirmar que la modelación hidrológica distribuida, a partir de la información estimada por el procedimiento propuesto, haya sido exitosa, en los tres casos analizados.

Tanto la calibración como la validación posterior permitieron aprender respecto al funcionamiento hidrológico de la cuenca a partir de los resultados del modelo, y comprobar la calidad de la información utilizada, así como los efectos causados por su escasez o ausencia. Las preguntas que se trataron de resolver se orientaron a dos temas claves, ambos estrechamente relacionados entre sí. Por una parte, los interrogantes se concentraron respecto a la existencia o no de diferencias en la estimación de variables principales a la escala de celda o no, como la cuenca total o por subcuencas. Por otra parte las dudas se orientaron directamente a la validez y avance que significa en sí a la modelación distribuida. Ambas se relacionaron, además, con la necesidad de conocer si influye la existencia de una dependencia espacial entre los valores de la variable a lo largo del espacio en los resultados de la modelación. Lo último llevó al análisis la importancia de la varianza espacial en la distribución de una variable.

Un análisis desarrollado para estudiar los resultados que se obtienen a partir de información de diferente grado de agregación y aleatoriedad generó importantes resultados. Los resultados indican, por una parte, que *la diferente forma en que es distribuida la información en el espacio influye decisivamente en la respuesta hidrológica que puede simular un modelo*. Se advierte con claridad que la estimación espacial coherente de las variables principales en un modelo distribuido genera resultados claramente mejores y reproducibles en eventos de validación. En ningún de los demás casos analizados se produjeron estos resultados. *Es muy importante destacar que con diferentes tipos de información, en modelos agregados, distribuidos o pseudodistribuidos es posible lograr un ajuste bueno de un determi-*

nado evento hidrológico. Sin embargo dichos ajustes no son posibles de validar en eventos diferentes al de calibración.

Siguiendo en el mismo análisis se puede afirmar que *la agregación espacial de la información genera una progresiva promediación de los valores de los parámetros. Tal proceso provoca que diferencias claras en la simulación de caudales, ya que todos los puntos del terreno empiezan a tener similares cualidades, hasta que finalmente en al modelación agregada la totalidad de la cuenca se supone que funciona de la misma forma. Existe en los resultados la evidencia clara que la variabilidad espacial de los parámetros de modelación del suelo es fundamental en la modelación hidrológica.* Así, la varianza de los valores de las variables principales favorecen a que la modelación sea más realista y reproducible en tiempo y espacio. Sin embargo, tal variabilidad espacial debe responder *necesariamente* a un criterio de tendencia regional. Dicha tendencia está dada por los elementos que componen el terreno. La distribución espacial *con criterio* de los valores de las variables principales ejercen una influencia notable en la modelación. Es por esa razón que a mismas condiciones de eventos y modelo, *la utilización de una variable aleatoria espacialmente distribuida, con la misma media y varianza que la variable principal, no genera los mismos resultados que utilizando una estimación fiable de la distribución espacial de la misma.*

Una vez definida la influencia del grado de distribución en los resultados de la modelación, se analizó desde otro punto de vista la importancia de tener o no en cuenta a la variabilidad espacial en la estimación de un fenómeno hidrológico. Concretamente, en este análisis, la información aleatoria (con media y varianza calculada sobre la base de los valores distribuidos) permite mejores resultados debido a que, aunque sin respetar el patrón de distribución espacial, respeta la variabilidad *estadística* natural de la cuenca en cuanto a los valores. En función de tal, los resultados serán mejores que los anteriores. Sin embargo, como ya se aclaró, con esta distribución no es posible obtener resultados tan buenos como en el caso de información distribuida espacialmente según el procedimiento propuesto en esta Tesis. El efecto de la agregación espacial se puede observar también en este análisis. Resulta evidente en los resultados obtenidos un cambio en la distribución de los valores del error a partir 10 Km^2 de área acumulada. Tales resultados indican, que sería admisible no tener en cuenta la variabilidad espacial del terreno celda a celda a partir de dicho valor. Lo dicho indica la necesaria existencia de un equilibrio entre el grado de detalle de la variabilidad espacial y la escala del análisis que se pretende realizar.

7.5. Consideraciones finales

Para completar este capítulo, es necesario volver a lo expresado en el primer capítulo de esta Tesis. A través de la revisión de literatura y los resultados obtenidos,

queda claro que es necesario conocer el *porqué* de la particular distribución en el terreno de ciertos parámetros edafológicos, utilizados en la modelación hidrológica. La razones son tanto científicas como técnicas.

A pesar del hecho que no siempre es posible contar con todos los medios potencialmente necesarios, el esfuerzo es necesario y conveniente. No todas las formas de observación de los suelos y sus resultados están disponibles en todos los lugares y en todos los momentos en los cuales éstos son necesarios. Sin embargo, a partir de la convergencia de criterios y evidencias provenientes de fuentes diferentes e independientes entre sí permiten avanzar en el tema por la vía de la estimación y la modelación.

No debe de olvidarse que el *requerimiento básico* para que los mismos sean aceptables, además de su precisión, es que los resultados obtenidos *agreguen conocimiento* a lo que ya se cuenta en ese caso concreto. Así, durante el proceso de estimación, los resultados deben indicar qué parte de la información disponible es relevante a las necesidades de ese momento, y cómo ésta afecta a su variabilidad. Al conocer el grado de importancia de la información con la que se cuenta, el procedimiento será posible ampliar o descartar tal tipo de información a fin de mejorar la estimación y distribución de los parámetros.

En el mismo sentido de lo expresado en el párrafo anterior, se puede concluir que el procedimiento propuesto genera excelentes resultados a partir de información convencional. Los resultados, además de ser precisos, agregan conocimiento al complejo tema de la génesis de suelos y su comportamiento hidrológico. Por otra parte, la utilización de estos resultados en la modelación hidrológica generan resultados fiables y aptos para ser validados tanto temporalmente como espacialmente.

Los resultados permiten confirmar al validez de las hipótesis planteadas al inicio de esta Tesis.

Así, se comprobó, en primer lugar que *el suelo representa a un complejo de efectos superpuestos de diferentes componentes del medio, a diferentes escalas temporales y espaciales. Su distribución espacial y su respuesta hidrológica en cada punto de la superficie del terreno puede ser explicada de forma precisa a partir de su relación con el entorno del que procede.* Fue posible así describir de forma concreta las principales variables que afectan a las cualidades hidrológicas del suelo a partir de analizar el medio en el cual se desarrolla y destacar las interacciones existentes entre los elementos que componen dicho entorno.

A partir de lo anterior, se comprobó que *es posible analizar cuantitativamente y de forma distribuida el comportamiento hidrológico del terreno a partir de la información que normalmente se dispone en un estudio hidrológico.*

Apoyándose en los resultados obtenidos, se pudo comprobar también que *es posible, basándose en la información cartográfica con que normalmente se cuenta al inicio de un proyecto hidrológico, analizar y cuantificar la variabilidad espacial*

de aquellos atributos del terreno de utilidad para caracterizar su comportamiento hidrológico.

Finalmente, y completando el esquema de trabajo propuesto en esta tesis, se pudo comprobar también, que *el aprovechamiento completo de la información cartográfica disponible requiere de la incorporación de valores numéricos modales asociados a diferentes atributos del terreno sobre la base del conocimiento previo que se posee del tema y de la región estudiada.* Así, quedó claro en los resultados la utilidad práctica de los *valores de referencia.* La clave para este éxito se basa en definir tres componentes hidrológicos del terreno: *superficial, intermedia y substrato de suelo.*

Para concluir, debe destacarse que el procedimiento propuesto permitió expresar, de forma *cualitativa y sistemática,* al menos parte del *razonamiento práctico de un técnico entrenado en el análisis del medio natural.* Por esto mismo, lo propuesto en esta tesis no es un método automático. *El grado de sensibilidad a los gradientes ambientales depende de forma directa de la información con que se cuenta y de la experiencia del operador.* Sin embargo, el contar con una herramienta de trabajo que contenga bases conceptuales suficientes y cuyo desarrollo práctico es reproducible, facilita claramente la solución del problema.

7.6. Recomendaciones y futuras líneas de investigación

Las líneas de investigación comenzadas en esta Tesis no están cerradas. Las necesidades que les dieron origen no están agotadas.

Desde un punto de vista científico, existe un amplio conjunto de preguntas relacionadas al comportamiento hidrológico del terreno, y a la distribución espacial de las variables que lo describen. La causa de su existencia se encuentra en la necesaria integración de conceptos *génesis, jerarquía y escala.* Las mismas no pueden ser respondidas por la pura aplicación de métodos de interpolación óptimos o procedimientos estadísticos en el análisis caso por caso. Es necesario desarrollar alternativas integradoras en este campo. En este sentido, se plantea como una posible línea de investigación *la profundización en el análisis de correlación y causalidad entre las variables principales y ambientales analizadas en esta Tesis respecto de la génesis de los suelos que intervienen en el terreno.*

Estrechamente relacionado a lo anterior, es sumamente interesante probar el comportamiento del procesamiento propuesto en esta tesis a escalas de mayor definición. *El desafío se orienta a un necesario cambio de escala: de la regional a la de ladera.*

Por otra parte, la modelación hidrológica distribuida se presenta como la alternativa más razonable para la estimación de caudales de crecida y estimaciones de producción en cuencas hidrográficas. En esta Tesis se ha demostrado que su

implementación no es una tarea imposible, sin embargo la misma es dependiente del criterio del operador. Es posible acercar la modelación distribuida a la práctica profesional rutinaria. Para ello es necesario avanzar en el desarrollo de la estimación distribuida de parámetros hidrológicos. En consecuencia, *es necesario elaborar de nuevos trabajos en que permitan explorar los límites del procedimiento en sí. Lo dicho dará lugar a una mayor experiencia en el método, un mayor conocimiento de sus virtudes y defectos, y una mayor base para la difusión del mismo.*

Finalmente, el desarrollo de estimaciones distribuidas a partir de información disponible influye directamente en una mayor demanda de la misma. Así, *resulta imprescindible elaborar estrategias que permitan contar con mayor información, a partir de la reelaboración y la recuperación de material incompleto, en formatos obsoletos, o que por su situación física resulte inaccesible para el personal técnico.*

Apéndice A

Descripción del modelo TETIS

A.1. Introducción

Existen numerosas formas y metodologías para modelar el comportamiento del agua dentro de las cuencas naturales. Los modelos distribuidos conceptuales son una herramienta útil que permiten simular las crecidas de forma sencilla y eficiente, siempre y cuando se emplee la escala espacial adecuada. El objetivo es obtener la respuesta hidrológica ocasionada por un episodio de lluvia dentro de una cuenca natural, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual. Se ha tomado como referencia el modelo TETIS desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (DIHMA, 1996; Vélez et al., 2002a, 2002b, 2002c y 2002d) y el modelo de simulación abierta propuesto por Vélez (2001), a los cuales se le han realizado modificaciones y mejoras para involucrar procesos como la fusión de nieve, el efecto atenuador de los embalses y la variación espacio temporal de la evapotranspiración. Todos estos aspectos son tratados en este capítulo. El nuevo modelo sigue llamándose TETIS ya que la estructura original no se ha modificado, tan solo se han incluido aspectos de interés general. A continuación se describen los diferentes procesos incluidos dentro del modelo propuesto.

A.2. La producción de escorrentía

La representación de la producción de escorrentía se hace mediante esquemas conceptuales simples adaptados a la escala de la celda y al intervalo de tiempo que se considera en la modelación de eventos (entre 1 hora y 0.1 hora). En la literatura se encuentran muchos esquemas conceptuales para representar la producción de escorrentía, la mayoría de ellos coincide en una representación esquemática que incluye varios tanques de almacenamiento interconectados entre sí. Estos esquemas se han utilizado con éxito tanto en modelos conceptuales agregados de simulación continua (Stanford, Sacramento, Tank model, GR-3, etc.) como en modelos que

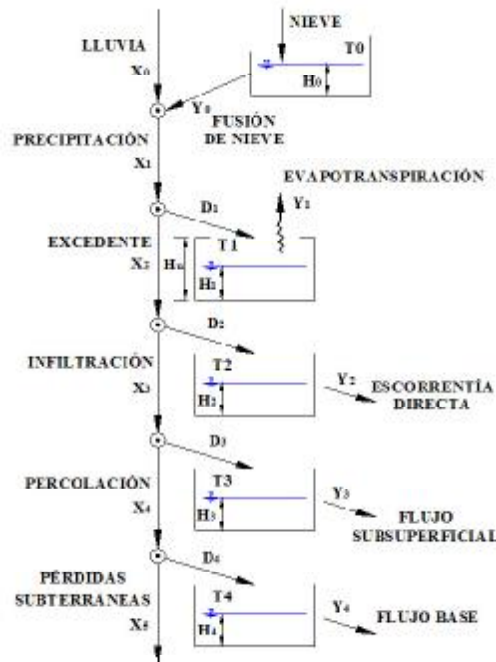


Figura A.1: Esquema conceptual del movimiento vertical en cada celda según el modelo TETIS

se pueden considerar distribuidos (Watflood, DVSM, SLURP, etc.). En TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en cinco niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí, como puede observarse en la Figura A.1.

El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada tanque. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado varía según el esquema conceptual adoptado, pero generalmente son relaciones simples que tienen en cuenta las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo. En realidad, la conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones como se puede observar en la Figura A.2. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MED, hasta alcanzar la red principal de drenaje. La longitud de interconexión máxima para cada tanque es definida por el usuario, teniendo en cuenta que para la escorrentía y el flujo subsuperficial esta longitud está asociada al tamaño de las laderas. Para el flujo base esta longitud se estima teniendo en cuenta el punto inicial del flujo permanente en el cauce.

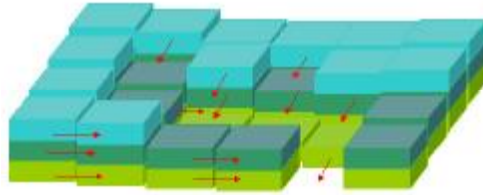


Figura A.2: Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS. (Tomado de Vélez, 2001)

A.2.1. El aporte por fusión de nieve

El primer nivel representa la zona cubierta por nieve, T0. El modelo TETIS emplea el método índice de temperatura para la estimación de la fusión de la nieve, básicamente porque no se dispone de información completa de radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva. Esta información es necesaria para la estimación de la fusión de la nieve en modelos que tienen en cuenta el balance energético (Kraijenhoff y Moll, 1986). Además hay que decir que el método índice de temperatura o grado-día es el más utilizado. Las hipótesis en las que se basa según Dingman (1994) son:

- a) La energía de radiación de onda larga se puede suponer como una función lineal de la temperatura del aire.
- b) Existe una correlación entre la radiación solar y la temperatura del aire.
- c) Durante la fusión, la temperatura de la nieve es cercana a 0 °C.

Este método es ampliamente utilizado debido a que requiere poca información y es fácilmente adaptable a los modelos lluvia escurrentía, siendo su forma general la siguiente:

$$\begin{aligned}
 M &= M_f(T - T_b) & \text{si } T &\geq T_b \\
 M &= 0 & \text{si } T &< T_b \\
 Y_0 &= \text{Min}\{H_0, M \cdot \Delta t\}
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

En donde, M [mm/d] es la tasa de fusión de nieve, T [°C] es la temperatura media del aire, T_b [°C] es la temperatura base y M_f [mm/°Cd] es el coeficiente de fusión. La temperatura base varía entre 4 °C y -2 °C.

El coeficiente M_f varía con la latitud, la elevación, la pendiente, la cobertura forestal, las condiciones atmosféricas, la época del año, las propiedades físicas de la nieve y la orientación de la ladera. Por lo tanto, debe ser calibrado empíricamente

para cada cuenca y ladera. Se ha mostrado también que el coeficiente M_f aumenta mientras avanza la época de fusión de nieve, debido principalmente a que se incrementa la densidad, aumenta la radiación solar y disminuyen el albedo y la energía interna en la capa de nieve. Existen metodologías que tienen en cuenta este factor incrementando el coeficiente de fusión.

El calor suministrado por la condensación del vapor de agua presente en la atmósfera es a menudo la mayor fuente de calor, en especial cuando se tienen temperaturas atmosféricas mayores a 0 °C. Además, el calor de la atmósfera es transferido a la nieve por procesos convectivos. Por lo tanto, la radiación, la condensación y la convección son los principales procesos de transporte de calor aportado durante el proceso de fusión (Viessman y Lewis, 2003). Otro factor a tener en cuenta dentro del proceso de la fusión de nieve corresponde al calor aportado por la lluvia, el cual hace que el factor M_f aumente. Es por ello que en el modelo de fusión desarrollado en TETIS se emplean dos coeficientes de fusión: uno para el caso que involucra la lluvia y otro para la fusión de nieve únicamente.

La temperatura y la cantidad de nieve presente en una cuenca varían fundamentalmente en función de la elevación sobre el nivel de mar (Dunn y Colohan, 1999), aunque la acumulación esté condicionada por otros factores como la cobertura vegetal, la dirección del viento, la orientación de las laderas y la topografía. Durante el proceso de interpolación espacial, la obtención de los factores de ponderación P_{0j} se realiza empleando la distancia de un punto o celda (x_0, y_0) y las estaciones (x_j, y_j) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_{0j} = \frac{\frac{1}{d_{0j}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{0i}}} \quad (\text{A.2})$$

En donde n es el número de estaciones y:

$$d_{0j} = \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2} \quad , \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{A.3})$$

El modelo TETIS realiza la interpolación de la Temperatura mediante la expresión:

$$T_i = \sum_{j=1}^n P_{0j} (T_{0j} - \frac{6,5}{1000} (z_i - z_j)) \quad (\text{A.4})$$

En donde, T_i es la temperatura en la celda i , T_{0j} es la temperatura en la estación j de las n estaciones cercanas y z_i y z_j corresponden a la altura sobre el nivel del mar en la celda i y la estación j , respectivamente. La cantidad de agua proveniente del proceso de fusión de nieve Y_0 se ingresa al modelo de producción de escorrentía como un valor adicional a la entrada por lluvia.

El caso más común dentro de las crecidas en España no incluye a la nieve, por lo que este tanque no siempre es utilizado y se continúa directamente con el siguiente almacenamiento.

A.2.2. El almacenamiento estático

El segundo almacenamiento, denominado *almacenamiento estático* T_1 representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto no hace parte de la escorrentía. Este almacenamiento representa la intercepción, la detención del agua en charcos y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares.

De acuerdo con la configuración del modelo, la lluvia X_0 es calculada en cada celda de acuerdo a los registros de las n estaciones más cercanas, empleando el método de interpolación espacial del inverso de la distancia.

Los valores de lluvia X_0 en cada celda (x_i, y_i) son estimados como la sumatoria del producto del respectivo factor de ponderación P_{0j} por el valor puntual registrado en cada una de las estaciones p_j más el efecto orográfico según el factor β , que tiene en cuenta el cambio en la lluvia debido a la altura sobre el nivel del mar, según la expresión:

$$X_0 = \sum_{i=1}^n P_{0j}(p_j + \beta(z_i - z_j)) \quad (\text{A.5})$$

El valor obtenido corresponde a la cantidad de lluvia X_0 , que añadido a la cantidad de agua proveniente de la fusión de nieve Y_0 , conforman la precipitación X_1 , la cual entra a un conducto del que se deriva una cantidad D_1 para el almacenamiento o tanque T_1 . Se supone que este tanque tiene una capacidad máxima igual a la suma de la capacidad de almacenamiento capilar en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie para almacenar agua. Esta última por lo general está relacionada con la cobertura vegetal. La capacidad de almacenamiento estático está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco (que tiene un contenido de humedad igual al punto de marchitez) hasta alcanzar el mayor almacenamiento posible sin que el agua fluya por la acción de la gravedad (en el que se tiene un contenido de humedad igual a la capacidad de campo).

La cantidad de agua que se deriva y que no ingresa al almacenamiento estático, X_2 , depende del contenido de humedad del suelo (representado por la cantidad de agua almacenada en el tanque, H_1), de las características del suelo (representado parcialmente por la capacidad máxima, Hu^*) y de la precipitación X_1 según la expresión:

$$X_2 = \text{Max}\{0, X_1 - Hu^* + H_1\} \quad (\text{A.6})$$

Durante la ocurrencia de eventos cortos el efecto de la evapotranspiración generalmente es despreciado, pero este valor puede llegar a ser importante en cuencas grandes y en grandes superficies de agua, razón por la cual se incluye dentro del

modelo TETIS. La cantidad de agua que representa la evapotranspiración Y_1 se calcula mediante una formulación simple, como función del agua disponible en el tanque H_1 , la evapotranspiración potencial ETP y el índice de cobertura vegetal $\lambda^*(t)$ que a su vez es función del tiempo

$$Y_1 = \text{Min}\{\lambda^*(t) \cdot \text{ETP}, H_1\} \quad (\text{A.7})$$

La estimación de la evapotranspiración potencial ETP cuando no se dispone de datos de campo puede ser realizada con base en los datos de temperatura media.

El índice de cobertura se obtiene según el tipo de cobertura vegetal, para diferentes tipos de cobertura la variabilidad en el tiempo es diferente, un ejemplo de este índice se puede observar en la Figura A.3, en la cual se asocia el índice de cobertura vegetal al factor de cultivo sugerido por Burman y Pochop (1994).

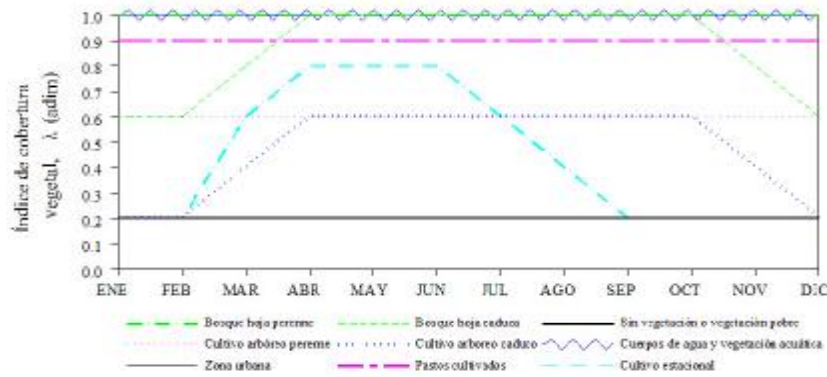


Figura A.3: Variación temporal del índice de vegetación λ , utilizado para estimar la evapotranspiración en el modelo TETIS

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T_1 , sigue su camino por la zona capilar del suelo hacia abajo.

A.2.3. Almacenamiento superficial

En el tercer nivel se representa el agua en superficie que es susceptible de moverse por la ladera (escorrentía directa) o de infiltrarse a un nivel inferior. En este almacenamiento se pretende que tanto la cantidad almacenada como el tiempo de residencia sean coherentes con las laderas reales en la cuenca. Se considera que el flujo en la ladera ocurre en una delgada capa que se va concentrando en

una pequeña red de surcos y pequeñas depresiones o canales hasta que pasa a los elementos de la red de drenaje.

Se supone que la capa superior del suelo a la escala de la celda tiene una conductividad hidráulica representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionado con la posición de la celda en la ladera, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo.

Por lo tanto, la cantidad de agua que se infiltra X_3 , está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior K_s^* (una conductividad hidráulica de la capa superior del suelo asociada a la cobertura en condiciones de saturación) y con el flujo excedente del almacenamiento capilar X_2 según la siguiente relación:

$$X_3 = \text{Min}\{X_2, \Delta t \cdot K_s^*\} \quad (\text{A.8})$$

Para el flujo superficial en cada celda se supone que la ladera se puede representar por un canal equivalente. Las características de este canal se pueden determinar en función de las características de la celda (morfológicas y de cobertura). Por lo tanto, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal:

$$Y_2 = \{\alpha \cdot H_2\} \quad (\text{A.9})$$

En donde el coeficiente de descarga α es calculado de la ecuación de continuidad de la siguiente forma:

$$S_t - S_{t-1} = \sum_j I_j - O_t \quad (\text{A.10})$$

En donde S_t y S_{t-1} representan al volumen almacenado en el tiempo t y $t - 1$ respectivamente, las variables I_j y O_t representan los flujos de entrada y salida al elemento j . Considerando que no existen controles aguas abajo, el almacenamiento se puede expresar como:

$$S_t = \frac{Q_t}{v_t} \Delta x \quad (\text{A.11})$$

Reemplazando S_t en la ecuación de continuidad A.10 y considerando $Q_t = Q_t/\Delta t$, se obtiene:

$$\frac{O_t \Delta t}{\Delta t v_t} + O_t = \sum_j I_j + S_{t-1} \quad (\text{A.12})$$

Simplificando y despejando el volumen a la salida se tiene:

$$O_t = \left[1 - \frac{\Delta t}{\Delta x + v_t \cdot \Delta t}\right] \left[\sum_j I_j - S_{t-1}\right] \quad (\text{A.13})$$

Por lo tanto, de la ecuación de continuidad en el canal que representa el almacenamiento superficial se puede obtener la siguiente expresión:

$$O_t = \alpha \left[\sum_j I_j - S_{t-1}\right] \quad (\text{A.14})$$

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta t}{\Delta x + v^* \cdot \Delta t} \quad (\text{A.15})$$

Para la velocidad del flujo en la ladera se considera: $v^* = 1,4 \cdot s_t^{0,5}$, donde el valor de 1.4 mostrado en esta expresión corresponde a una estimación previa realizada para que el rango de velocidades se encuentre entre 1 y 0.01 *m/s* para un amplio rango de pendientes. En la Figura 3.4 se observa un análisis de los posibles valores del coeficiente de descarga considerando diferentes intervalos temporales y espaciales dado un rango de pendientes. Se observa el aumento de este coeficiente a medida que se aumenta el intervalo temporal o se disminuye el tamaño de la celda.

Este tipo de gráficos es de utilidad al analista para seleccionar el tamaño de celda de acuerdo a la información temporal disponible.

El modelo considera que el almacenamiento gravitacional en el suelo se puede dividir en dos partes: una capa superior donde por lo general se tiene una mayor permeabilidad y una capa inferior donde se tienen permeabilidades más bajas (trayectorias más largas, menores gradientes) y la respuesta es más lenta.

A.2.4. Almacenamiento gravitacional

El cuarto nivel se puede entender como el agua gravitacional almacenada en el suelo. De acuerdo con lo propuesto en el modelo, durante el intervalo de tiempo t , se tiene una cantidad de agua gravitacional X_3 que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo. De esta cantidad, una parte X_4 podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial.

Se supone igualmente que la capa inferior del suelo a la escala de la celda tiene una capacidad de percolación representativa o característica y que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, lo cual está estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo.

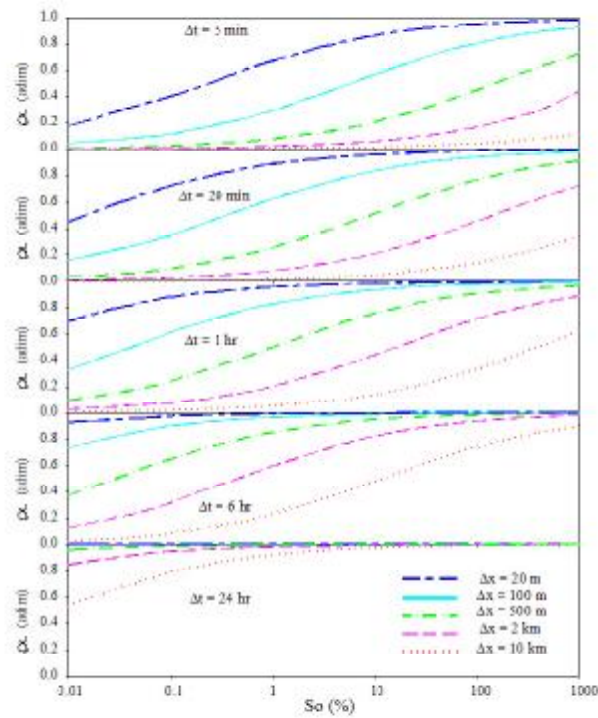


Figura A.4: Variación espacial y temporal de coeficiente α , empleando diferentes valores de pendiente s_o

Donde la cantidad de agua que puede continuar hacia la zona inferior del suelo durante el intervalo de tiempo se puede asociar con el flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera X_3 y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación que se conoce como capacidad de percolación K_p^* y que se expresa:

$$X_4 = \text{Min}\{X_3, \Delta t \cdot K_p^*\} \quad (\text{A.16})$$

Para la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T2 para obtener la siguiente relación lineal:

$$Y_3 = \alpha \cdot H_3 \quad (\text{A.17})$$

De forma análoga,

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + K_{ss}^* \cdot \Delta t} \quad (\text{A.18})$$

En donde K_{ss}^* representa la conductividad hidráulica horizontal del suelo, definida por su estructura de macro poros.

En la Figura A.5 se muestra el coeficiente de descarga y su variabilidad de acuerdo a diferentes valores de conductividad y diversos tamaños de celda e intervalos temporales. Se observa que es necesario un valor muy alto de conductividad hidráulica para obtener coeficientes altos, lo cual induce a pensar que el modelo TETIS considera la transmisividad horizontal en uno o varios órdenes de magnitud mayor que la conductividad vertical.

También se aprecia el aumento del coeficiente de descarga asociado a los tamaños de celda menor y a intervalos temporales cortos. Es decir, a medida que se disminuye el tamaño de la celda la conductividad horizontal tiende a parecerse a la vertical, lo cual se puede explicar como un problema de escala clásico en Hidrología y por este motivo es muy importante la selección adecuada del intervalo temporal y del tamaño de celda, según el buen criterio del analista.

A.2.5. El acuífero

El quinto nivel representa al *acuífero*. Este almacenamiento subterráneo se ha representado por el tanque T_4 , en donde se considera que el almacenamiento de agua gravitacional fluye a través del interior del subsuelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y de donde sale para formar el flujo base.

De un modo similar a lo planteado para los otros almacenamientos, esta representación pretende que, tanto la cantidad almacenada como el tiempo de residencia, sean coherentes con lo que en realidad ocurre en los acuíferos de la cuenca.

El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación X_4 tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas X_5 y que el resto sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T_4 . Las pérdidas subterráneas durante el intervalo temporal t se expresan como una función de la capacidad de percolación profunda de la roca, k_{pp}^* y del estado del tanque:

$$X_5 = \text{Min}\{X_4, \Delta t \cdot K_{pp}^*\} \quad (\text{A.19})$$

La cantidad de agua que se deriva para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas. Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, en cada una de las celdas se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona

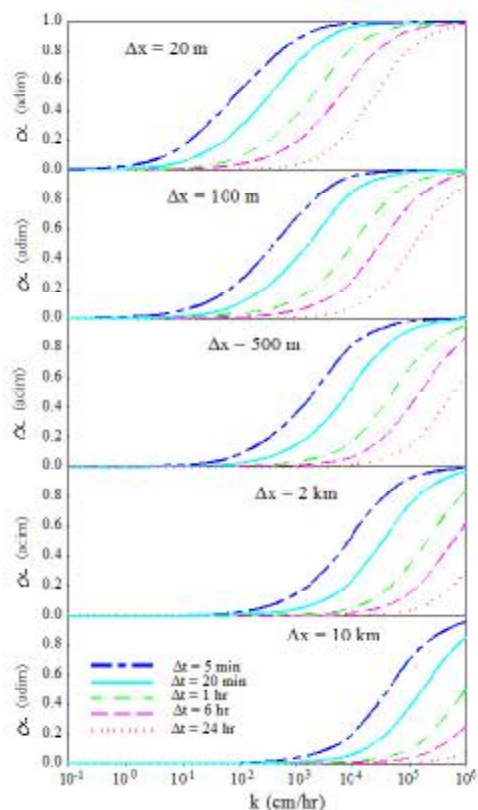


Figura A.5: Variación espacial y temporal de coeficiente α , empleando diferentes valores de conductividad hidráulica (k_{ss}^*)

la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada. El modelo TETIS emplea la siguiente relación para estimar las salidas del almacenamiento subterráneo:

$$Y_4 = \alpha \cdot H_4 \tag{A.20}$$

Análogamente,

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + K_b^* \cdot \Delta t} \tag{A.21}$$

En donde k_b representa a la conductividad horizontal del estrato rocoso o del subsuelo.

La importancia de la representación del flujo subterráneo en la modelación de crecidas está en reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y

que esto sea coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo.

El modelo TETIS presenta la evolución temporal de los diferentes almacenamientos para poder ser estudiados por el hidrólogo y verificar que no se presenten irregularidades.

A.3. Estructura de los parámetros del modelo

El modelo de producción de escorrentía descrito anteriormente tiene 8 parámetros en cada celda (excluyendo los tres parámetros globales considerados durante el proceso de fusión de nieve).

El modelo TETIS divide en dos aproximaciones la estimación de los parámetros en cada celda. En una primera aproximación se estiman los parámetros principales con base en información del paisaje o características del terreno. La segunda etapa hace uso de unos factores correctores a nivel global para estimar todos los parámetros. El uso de estos factores correctores permite corregir el error de estimación debido a las características del terreno. Los parámetros en cada celda del modelo TETIS son los siguientes:

Máxima capacidad estática o agua útil:	$H_u^* = R_1 \cdot H_1$
Índice de cobertura vegetal	$\lambda^*(t) = R_2 \cdot \lambda^*(t)$
Capacidad de infiltración:	$K_s^* = R_3 \cdot K_s$
Velocidad de escorrentía directa:	$v^* = R_4 \cdot v$
Capacidad de percolación:	$K_p^* = R_5 \cdot K_p$
Velocidad del flujo subsuperficial:	$k_{ss}^* = R_6 \cdot K_s$
Capacidad de pérdidas subterráneas:	$k_{pp}^* = R_7 \cdot K_p$
Velocidad del flujo base:	$k_b^* = R_8 \cdot K_p$

En donde R_1 a R_8 son los factores correctores que deben ser calibrados. En general, los parámetros son función de 5 características básicas del terreno. Dos de ellas son fácilmente obtenidas, la velocidad de escorrentía directa se obtiene de la pendiente del terreno que se extrae del MED y el índice de cobertura vegetal que se obtiene del mapa de usos del suelo. Las tres características del terreno restantes que son más difíciles de estimar son:

- La capacidad máxima de almacenamiento estático o agua útil para evapotranspirar, H_u .
- La conductividad hidráulica saturada del estrato superior del suelo, K_s , y,
- La conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso o parte inferior del suelo, K_p .

Los factores correctores son comunes para todas las celdas de la cuenca, lo que quiere decir que sólo es necesario calibrar 8 parámetros, en lugar de 8 veces el número de celdas. En ausencia de errores en el modelo y en los datos de entrada, los factores correctores tienen en cuenta los efectos de escala espacial y dejan a las características del terreno libres de este tipo de distorsión.

A.4. Laminación en embalses

La presencia de embalses es importante dentro de toda cuenca, principalmente debido al efecto amortiguador con respecto a las avenidas y a su efecto regulador a lo largo del tiempo. Dependiendo del tamaño relativo del embalse frente al volumen de la crecida, el efecto registrado puede ser pequeño o muy importante.

Para considerar el efecto de los embalses es necesario tener clara su localización y sus características físicas dadas por las curvas en función de la altura de la lámina de agua siguientes: Curva de embalse, que representa el volumen embalsado en función de la cota en el embalse. Curva de desagüe, que representa los valores máximo (compuertas y válvulas abiertas) y mínimo (compuertas y válvulas cerradas) de capacidad de desagüe en función de la cota en el embalse.

Adicionalmente es necesario conocer la cota del fondo del embalse.

La estimación de la cantidad de agua que sale del embalse se realiza en una primera fase empleando la ecuación de continuidad o el método del Puls Modificado, dependiendo del tipo de información disponible.

Para efectos de la modelación distribuida, y considerando que el nivel del agua varía según la cantidad de agua que contiene el embalse, el modelo identifica como embalse a una sola celda cuya localización será lo más cercana a la salida del embalse. Aunque esta simplificación del modelo puede parecer importante en embalses grandes (puesto que no involucra el efecto de la evaporación en grandes superficies ni la mayor velocidad de propagación que existe en las celdas embalse) para el caso de los eventos de crecida e incluso en simulación continua esta aproximación puede ser considerada aceptable.

A.5. La traslación del flujo por el cauce

La traslación de la escorrentía a lo largo de la cuenca se realiza considerando que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún canal perteneciente a la red de drenaje natural de la cuenca, y a partir de allí circula por la red drenaje en sí.

Se emplea la “onda cinemática”, que es una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant al despreciar los términos correspondientes a los efectos inerciales y de presión en la ecuación de conservación de la energía. Por otra parte, las

características hidráulicas de los cauces se van a obtener con base en parámetros propios de la cuenca (o regionales si no se dispone de los propios) que se extraen de la información geomorfológica de la cuenca. Por eso, esta metodología propuesta por Vélez (2001) se ha denominado Onda Cinemática Geomorfológica (en adelante OCG) y se expone a continuación.

A.5.1. La red de drenaje y la geometría hidráulica

La red drenaje se obtiene a partir de la estructura de conexión de las celdas en el modelo digital del terreno MED, con base en las direcciones de flujo. La calidad de la red obtenida depende de la resolución y calidad del MED y de los algoritmos utilizados para su procesamiento.

La forma de la sección de flujo en cada uno de los elementos que conforman la red puede obtenerse a partir de las relaciones de geometría hidráulica previa validación de sus parámetros en la región. Estas relaciones fueron propuestas por Leopold y Madock (1953), quienes relacionaron las dimensiones de la sección de flujo: profundidad y , el ancho w y la velocidad en la sección v con el caudal en el cauce Q mediante ecuaciones de tipo potencial:

$$y = b \cdot Q^\beta \quad (\text{A.22})$$

$$w = c \cdot Q^\alpha \quad (\text{A.23})$$

$$v = p \cdot Q^\lambda \quad (\text{A.24})$$

De acuerdo a fuertes evidencias empíricas se han determinado dos grupos de valores para estos coeficientes y exponentes que han sido denominados "para la estación" "para aguas abajo". Los valores para "aguas abajo" predicen las variaciones para diferentes sitios a lo largo de un canal y están basadas en caudales con un nivel de referencia geomorfológico común. La mayor evidencia empírica se ha obtenido para la sección del cauce expuesta como una cicatriz permanente en el terreno conocido como "caudal a sección llena".

Según Leopold et al. (1964) para una zona con condiciones climáticas y morfológicas homogéneas existe una relación entre el caudal a sección llena Q_b en un sitio y el área de cuenca que drena a través de este sitio Λ , según:

$$Q_b \propto \Lambda^\varphi \quad (\text{A.25})$$

$$Q_b = \kappa \Lambda^\varphi \quad (\text{A.26})$$

Los parámetros κ y φ son constantes de validez regional.

La combinación de una relación como la anterior y las ecuaciones de la geometría hidráulica permite obtener una relación entre características geométricas de la sección de flujo o la velocidad del flujo y el área drenada a través del cauce. Este tipo de relaciones puede ser de gran aplicación en la Hidrología distribuida ya que permite una caracterización muy eficiente de los cauces a lo largo de toda la red de drenaje.

Reemplazando los elementos geométricos o hidráulicos (Ec. A.22, A.23 y A.24) por los valores obtenidos de las expresiones aguas abajo en función del área de cuenca drenada (Ec. A.26), se llega a las siguientes expresiones:

$$y = b_1 \kappa^{(\beta_1 \beta_2)} \Lambda^{\varphi(\beta_1 \beta_2)} Q^{\beta_2} \quad (\text{A.27})$$

$$w = c_1 \kappa^{(\alpha_1 \alpha_2)} \Lambda^{\varphi(\alpha_1 \alpha_2)} Q^{\alpha_2} \quad (\text{A.28})$$

$$v = p_1 \kappa^{(\lambda_1 \lambda_2)} \Lambda^{\varphi(\lambda_1 \lambda_2)} Q^{\lambda_2} \quad (\text{A.29})$$

Si la cuenca se puede considerar dentro de una región homogénea, los coeficientes y exponentes que aparecen en estas ecuaciones se pueden suponer constantes para todos los elementos de la red de drenaje. Se presenta entonces una relación de validez regional para las características de geometría hidráulica en una sección del cauce ante cualquier caudal, en función del caudal y del área de cuenca que se drena a través de la sección.

A.5.2. La rugosidad

En la hidráulica fluvial se utilizan distintas expresiones para obtener la rugosidad en función de un tamaño representativo del material del lecho. Para la rugosidad n , se tienen un buen número de ecuaciones que la relacionan con el diámetro del sedimento o con la rugosidad relativa. Algunas de ellas han sido propuestas por Strickler (1923), Limerinos (1969), Hey (1979) para ríos con lecho de grava.

Otra forma de obtener el valor de n es utilizando expresiones que representan la pendiente de quasi equilibrio dinámico del perfil del cauce en función del diámetro y área drenada (Hack, 1957 y Bray, 1979).

Como conclusión, la variación de la rugosidad con la posición e incluso con el flujo, se puede proponer la siguiente ecuación general para la rugosidad:

$$\eta = \Omega \Delta^{\sigma_1} y^{\sigma_2} s^{\sigma_3} \quad (\text{A.30})$$

El valor del coeficiente y los exponentes dependen de cada caso en particular, pueden ser regionalizados y en la práctica se determinan con el criterio experto del analista.

A.5.3. La velocidad del flujo

En la literatura hidráulica se tienen distintas expresiones que relacionan la velocidad del flujo con el radio hidráulico de la sección R , la pendiente de la línea de energía s y los diferentes coeficientes empíricos de rugosidad o de resistencia al flujo.

La simplificación de la onda cinemática supone que durante todo el periodo Δt y a lo largo de todo el trayecto x la pendiente de la línea de energía es igual a la pendiente del terreno ($s = s_0$). O sea, que la velocidad y la profundidad del flujo se relacionan mediante la ecuación de Manning. Si se supone que el canal es suficientemente ancho, entonces:

$$R_t = A_t/w_t \quad (\text{A.31})$$

En el caso de tener información adecuada de la pendiente, del coeficiente de rugosidad y de la geometría del cauce, se puede configurar una expresión para estimar la velocidad en función del área:

$$v = \frac{A^{2/3} s^{1/2}}{w^{2/3} \eta} \quad (\text{A.32})$$

Reemplazando la expresión de la geometría hidráulica (Ec. A.28), la rugosidad (Ec. A.30) se obtiene:

$$v = \frac{A^{2/3} s^{1/2}}{(C_1 \kappa^{(\alpha_1 - \alpha_2)} \Lambda^{\varphi(\alpha_1 - \alpha_2)} Q^{\alpha_2})^{2/3} (\Omega \Lambda^{\sigma_1} (A/w)^{\sigma_2 \sigma_3})} \quad (\text{A.33})$$

Simplificando esta ecuación se obtiene una expresión general para la velocidad:

$$v = \frac{A^{\varpi_2} s^{\varpi_3} \Delta^{\varpi_4}}{B^{\varpi_1}} \quad (\text{A.34})$$

donde:

$$\begin{aligned} B &= \Omega (c_1 \kappa^{(\alpha_1 - \alpha_2)})^{(2/3 - \alpha_2)} \\ &\quad \varpi_1 \left(\frac{1}{1 + \alpha_2 - (2/3 - \sigma_2)} \right) \\ &\quad \varpi_1 \left(\frac{1}{1 + \alpha_2 - (2/3 - \sigma_2)} \right) \\ \varpi_2 &= (2/3 - \sigma_2)(1 - \alpha_2) \varpi_1 \\ \varpi_3 &= (\varphi(2/3 - \sigma_2)(\alpha_1 - \alpha_2) + \sigma_1) \varpi_1 \end{aligned}$$

Estas expresiones indican que a nivel regional y en las condiciones en que son válidas, es posible una estimación aproximada, razonable y representativa de los parámetros de flujo para cualquier sitio de la cuenca.

A.5.4. La ecuación de continuidad

Por tratarse de un modelo que mantiene el balance de masas, es posible plantear la ecuación de continuidad (Ec. A.10), en donde se supone que el flujo no está controlado aguas abajo y por lo tanto el volumen que se entrega aguas abajo O_t depende únicamente de esta variable de estado. Además, si se considera un canal prismático, es decir, sección constante en toda la longitud del elemento y que el almacenamiento en el cauce de la celda es constante en toda la longitud, la ecuación de continuidad queda:

$$A_t \Delta x + Q_t \Delta t = \sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \quad (\text{A.35})$$

$$A \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} + v \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right) \quad (\text{A.36})$$

Reemplazando la Ec.A.34 deducida anteriormente para la velocidad se obtiene la siguiente expresión:

$$A \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{A^{\varpi_2} s^{\varpi_3} \Lambda^{\varpi_4}}{B^{\varpi_1}} \right) = \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right) \quad (\text{A.37})$$

Esta ecuación (Ec.A.37) no es lineal, pero se puede resolver numéricamente para encontrar el área mediante un proceso iterativo. El coeficiente B y los exponentes ϖ_1 , ϖ_2 , ϖ_3 y ϖ_4 dependen de las características geomorfológicas regionales y son válidos para toda la región, ya que son independientes de las características locales del sitio de análisis y del tiempo. La pendiente y el área acumulada se conocen pero varían para cada celda dentro de la cuenca. El término de la derecha es variable en cada lugar dentro de la cuenca y en cada tiempo. Por lo tanto, una vez se ha obtenido el área se reemplaza en la ecuación de velocidad (Ec. A.34) para finalmente obtener la descarga

A.5.5. Los parámetros de propagación

El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos según las siguientes relaciones geomorfológicas de tipo potencial entre:

Área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena:

$$\Lambda = \kappa \cdot Q_b^\varphi \quad (\text{A.38})$$

Ancho de la sección transversal a sección llena y el caudal a sección llena:

$$w_b = a_1 \cdot Q_b^{\alpha_1} \quad (\text{A.39})$$

Ancho de la sección transversal w y el caudal:

$$w = Q^{\alpha_2} \quad (\text{A.40})$$

Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo:

$$d = c_d(yS_0)^\theta \quad (\text{A.41})$$

Coefficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento:

$$\eta = c_\eta d^\xi \quad (\text{A.42})$$

Según Vélez (2001) se puede asumir $\sigma_1 = 0,0$, $\sigma_2 = \xi\theta$, $\sigma_3 = \sigma_2$, $\Omega = c_p c_d \xi$. En donde κ , a_1 , c_d , y c_n son los coeficientes y φ , α_1 , α_2, θ y ξ corresponden a los exponentes. Los coeficientes y los exponentes se obtienen mediante un estudio geomorfológico regional para aquellas zonas homogéneas.

En caso de no disponer de un estudio geomorfológico en las distintas regiones homogéneas se recomienda utilizar los valores medios recomendados en la literatura.

Del mismo modo que el modelo de infiltración incluye unos factores correctores para corregir de forma global los diferentes parámetros, el modelo de traslación incluye un factor corrector que afecta directamente a la velocidad del flujo, R_9 .

La presencia de todos estos factores permite una corrección rápida y ágil de los diferentes procesos representados.

En general, si se ha calibrado adecuadamente el modelo TETIS estos valores no deben variar de un episodio a otro.

A.6. Variables de estado al inicio del episodio

El suelo saturado no causa crecidas, pero combinado con lluvias fuertes o una fusión rápida de la nieve pueden causar crecidas importantes.

Los almacenamientos del suelo o las variables de estado al inicio del proceso de simulación son las que presentan gran incertidumbre. Por lo tanto, al inicio de un episodio de lluvia se debe definir el estado inicial de los almacenamientos en el suelo, ya sea mediante la experiencia del hidrólogo o utilizando información de campo.

Se ha considerado que son seis los almacenamientos que tienen relevancia dentro de las variables de estado en la cuenca, los primeros cinco corresponden a los almacenamientos en los tanques mostrados en la Fig. A.1 y que corresponden a:

- 1) La cantidad inicial de nieve, H_0 . Está dado en *mm*.

- 2) El almacenamiento estático al inicio del episodio, H_1 . Está dado como un porcentaje de la capacidad de almacenamiento máximo, % H_u .
- 3) El agua en superficie al inicio del episodio que es susceptible de convertirse en escorrentía directa, H_2 dado en mm .
- 4) El estado de humedad del suelo al comienzo del evento, H_3 que está dado en mm .
- 5) El estado inicial del acuífero, H_4 que también está dado en mm .

El sexto almacenamiento corresponde a la red de drenaje mostrada en la Fig. A.2 o al estado en que se encuentran los cauces al inicio del episodio. Como un valor inicial es posible asociar este tanque con su respectivo caudal a sección a llena, relación que ha sido suministrada por el estudio geomorfológico. Por lo tanto, el valor para el estado inicial está dado como un porcentaje del volumen de agua que tiene con respecto al volumen cuando se tiene caudal a sección llena, H_5 es dado como porcentaje. Nótese que cuando se desea simular un estado inicial de desbordamiento en los cauces es posible incluir valores mayores a 100 %.

La zona cubierta con nieve debe ser definida previamente ya sea mediante el uso de un SIG, fotos aéreas, información de satélite u otro método. El modelo permite asociar la presencia de nieve a aquellas zonas que se encuentran por encima de un valor predeterminado de cota. Para poder realizar una estimación confiable de la zona cubierta con nieve al inicio del evento, el modelo TETIS utiliza la información proveniente de los nivómetros y realiza una interpolación para las otras celdas empleando la cota como factor importante, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$a1 = \sum_{j=1}^n [P_{0j}[a_j + \beta_0 z_j] - \beta_0 z_i] \quad (A.43)$$

Siendo β_0 el factor de interpolación de nieve, a_i y a_j el espesor de la capa de nieve en la celda i y en la estación j , respectivamente. P_{0j} es el factor de ponderación según el inverso de la distancia para las n estaciones nivométricas más cercanas, y z_i , z_j corresponden a la altura sobre el nivel de mar para la celda i y la estación j , respectivamente.

El modelo TETIS considera que las condiciones iniciales son las mismas en todas las celdas de una misma región geomorfológica, exceptuando el tanque de la nieve. Aunque también permite generar valores iniciales de las variables de estado diferentes, como consecuencia de un período de calentamiento, en cuyo caso el almacenamiento en cada celda será diferente.

A.7. Resultados del modelo TETIS

El modelo TETIS da como resultado las series temporales simuladas de:

- a) Caudales en estaciones de aforo y otros sitios de interés.
- b) Las principales características de los embalses, dadas por: nivel, volumen, caudal de entrada al embalse y caudal de salida.
- c) La precipitación media dentro de la cuenca.
- d) La evolución media en toda la cuenca de los diferentes flujos verticales, horizontales y los estados de almacenamiento en los diferentes tanques.
- e) El volumen de nieve medio de la cuenca.

Así mismo, se obtiene un valor final para las variables de estado y un mapa con la distribución espacial de la nieve al finalizar el episodio.

Al modelo TETIS se le han incluido herramientas que permiten visualizar la ubicación espacial de las estaciones empleadas en la simulación, la lluvia acumulada en la cuenca, la distribución espacial de los distintos almacenamientos en el suelo al finalizar la simulación, la variación temporal de los almacenamientos y las diferentes componentes del flujo.

La robustez y fiabilidad del modelo TETIS ha sido mostrada en aplicaciones varias en España. Por lo que se puede concluir que se dispone de un modelo robusto, eficiente y capaz de representar adecuadamente el proceso lluvia escorrentía en cuencas naturales, de tal forma que pueda ser utilizado para realizar predicciones de forma confiable.

A.8. Referencias

- Burman, R. y Pochop, L. O.** *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Developments in Atmospheric Science 22. Elsevier Science B. V., Amsterdam. Cap. 5. 105-171. 1994.
- Bray, D. I.** *Estimating average velocity in gravel-bed rivers*. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 105(HY9), 1103-1122. 1979.
- DIHMA** *Implementación de modelos distribuidos conceptuales para eventos de crecida*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Camino de Vera s/n, Valencia. Informe Técnico. 1996.
- Dingman, S. L.** *Physical Hydrology. Upper Saddle River*. Prentice Hall, New Jersey. Cap. 5, 159-181. 1994.
- Dunn, S. M. y Colohan, R. J. E.** *Developing the snow component of a distributed hydrological model: a step-wise approach based on multi-objective analysis*. Journal of Hydrology, 223, 1-16. 1999.

- Hack, J. T.** *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland.* U. S. Geological Survey Professional Paper 294-B, 45-97. 1957.
- Hey, R. D.** *Dynamic process-response model of river channel development.* Earth Surface Processes, 4, 59-72. 1979.
- Kraijenhoff, D. A. y Moll, J. R.** *River flow modelling and forecasting.* Water Science and Technology Library, Vol. 1. 1986.
- Leopold, L. B. y Madock, T.** *The hydraulic geometric of stream channels and some physiographic implications.* Profesional paper United States Geological Survey. 252, 1-57. 1953.
- Leopold, L. B. Wolman, M. G. y Miller, J. P.** *Fluvial processes in geomorphology.* W. H. Freeman, San Francisco U. S. A. 1964.
- Limerinos, J. T.** *Relation of the Manning coefficient to measure bed roughness in stable natural channels.* Profesional Paper United States Geological Survey. 650D. 1969.
- Strickler, A.** *Beiträge zur Frage des Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Strome, Kanale und Geschlossene Leitungen.* Mitteilungen des Eidgenössischer Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, Switzzeland. 1923.
- Vélez, J. I.** *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas.* Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral. 2001.
- Vélez, J. J.; Vélez J. I. y Francés, F.** *Simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas mediante el uso de la modelación distribuida.* En congreso: 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Ed. UPV.Valencia, España. Febrero 7-8. 1682-1687. 2002a.
- Vélez, J. I.; Vélez J. J. y Francés, F.** *Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas.* En congreso: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba. Octubre. Publicado en CD. ISBN 959-7160-17-X. 2002b.
- Vélez, J. J.; Vélez J. I.; Puricelli, M. y Francés, F.** *Hydrological simulation of flood events at large basins using distributed modelling.* En congreso: XXVII Asamblea General de la European Geophysical Society. Niza, Francia. Abril 21-26. Ed. Geophysical Research Abstracts en CD. POSTER. ISSN 1029-7006. 2002c.
- Vélez, J. I.; Francés, F. y Vélez J. J.** *No linealidad del flujo en los cauces de la red de drenaje y sus implicaciones en la modelación hidrológica.* En congreso: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba, Octubre. Publicado en CD. ISBN 959-7160-17-X. 2002d.
- Viessman, W. y Lewis, L.** *Introduction to Hydrology. 5th Edition.* Pearson Education Inc. Prentice Hall. New Jersey, U.S.A. Caps. 8-13, 209-591. 2003.