



Título del Trabajo Fin de Máster:

***ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN
DE UN MODELO HIDROLÓGICO
DISTRIBUIDO CON INFORMACIÓN
ESTÁNDAR EN ESPAÑA***

Intensificación:

RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

RAMÍREZ SOLANO, LINA MARGARITA

Director/es:

DR. FRANCÉS GARCÍA, FÉLIX

BUSSI, GIANBATTISTA

Fecha: JUNIO, 2012



Título del Trabajo Fin de Máster:
**ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO
HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO CON INFORMACIÓN ESTÁNDAR
EN ESPAÑA**

Autor: **RAMÍREZ SOLANO, LINA MARGARITA**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	DR. FÉLIX FRANCÉS GARCÍA	Fecha de Lectura	JUNIO, 2012
Codirector1	GIANBATTISTA BUSSI		
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

En la actualidad, el aprovechamiento sostenible, gestión y conservación de los recursos naturales son fundamentales para encarar los retos apuntados en la agenda ambiental global. Dicha agenda es un documento orientador, que se enmarca en una visión a largo plazo y a la vez propone acciones concretas y consensuadas a corto y mediano plazo estableciendo diferentes ejes temáticos entre los que se pueden destacar la Biodiversidad y los Recursos Hídricos. Para dar cumplimiento a estos retos es necesario evaluar los recursos disponibles, lo que a su vez requiere de la implementación de modelos numéricos.

El objetivo principal de este trabajo es la aplicación de un modelo hidrológico distribuido llamado TETIS desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, para predecir y analizar la respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas españolas con escasez de datos y aprovechando información estándar. El modelo integra los distintos procesos del ciclo hidrológico para generar variables útiles para el análisis de los recursos hídricos como la evaporación, infiltración, caudales superficiales y subterráneos, entre otros.

Los datos fundamentales necesarios en la modelación hidrológica incluyen series de datos meteorológicos, datos de suelo y cobertura de suelo e información sobre la hidrografía de la cuenca. Para la aplicación del modelo hidrológico distribuido TETIS en las cuencas de los ríos Ésera, Siurana y Júcar se desarrolló una nueva propuesta metodológica, que combina la hidrología con el aprovechamiento de información estándar, de libre acceso y disponible online. Entre la información estándar utilizada se destacan los mapas de suelos elaborados por la Comunidad Europea y mapas de precipitación elaborados por AEMET, como Spain02, conjunto de datos diarios de precipitación y temperaturas máximas y mínimas sobre una malla regular de alta resolución (0.2°x0.2°) para el territorio peninsular español y las Islas Baleares, interpolada a partir de un número elevado (miles) de estaciones que han sido sometidas a un estricto control de calidad.

El análisis se enfocó en la respuesta de cada una de las cuencas usando información de lluvia puntual, caracterizada por un porcentaje significativo de datos faltantes, contrastada con información interpolada. Se realizó la modelación hidrológica a escala diaria estimando los parámetros espaciales, denominados parámetros distribuidos, llevando a cabo la calibración y validación del modelo en los diferentes escenarios seleccionados.



Los resultados obtenidos fueron comparados para cada escenario simulado realizando diferentes análisis estadísticos para conocer el grado de incertidumbre asociado entre los valores observados frente a los simulados. Se determinó que los resultados óptimos se esperan de los modelos donde se tenga mayor densidad de información hidrometeorológica lo cual ayuda a distribuir mejor la entrada de precipitación. Además los resultados indican que los conjuntos de datos interpolados y mapas globales se están acercando a una resolución estándar y que pueden ser utilizados para predicciones hidrológicas en las regiones donde existen datos dispersos. Adicionalmente al final del estudio se listan los aportes y las futuras líneas de investigación consideradas por el autor.

Abstract:

Nowadays, the sustainable use, management and conservation of natural resources are essential to confront challenges pointed in the global environmental plan. This plan is a guide that focuses on a long term vision and also proposes concrete actions on the short and medium term basis by setting different issues among which stand out the Biodiversity and Water Resources. To comply with these challenges it is necessary to assess the available resources, which in turn requires the implementation of numerical models.

The main objective of this work is the implementation of a distributed hydrological model called TETIS developed in the Department of Hydraulic and Environmental Engineering at the Universitat Politècnica de València, to predict and analyze the hydrological response in Spanish rivers basins with limited data and taking advantage of standard information. The model integrates the different processes of the Hydrological Cycle to generate useful variables for the assessment of water resources such as evaporation, infiltration, underground and superficial stream flow, among others.

The basic data required in hydrological modeling includes series of meteorological data, soil data and land cover and information on the hydrography of the basin. For the application of the distributed hydrological model TETIS in the Ésera, Siurana and Júcar rivers basins, a new methodological approach was developed, combining hydrology with the use of standard information, which is available online with open access. Among the standard information used are soil maps prepared by the European Community and, from the State Meteorology Agency (AEMET), daily precipitation datasets, and maximum and minimum temperatures on a high-resolution grid (0.2°x0.2°) developed for peninsular Spain and the Balearic islands, interpolated from thousands of quality-controlled stations (Spain02).

The analysis focuses on the response of watersheds using rainfall measurement point, characterized by a significant percentage of missing data, contrasted with interpolated information. The hydrological modeling was performed on a daily scale. The calibration and validation of the model was performed on the different scenarios selected.

The obtained results were compared for each simulated scenario executing different statistical analyses to determine the degree of uncertainty between the observed values versus the simulated data. It was determined that optimum results are expected from the models which have higher density of hydrometeorological information which helps to better distribute precipitation input. In addition, the results also indicated that the interpolated datasets and global maps are approaching a standard resolution and hydrological forecasts can be used in regions where data are sparse. Additionally at the end of the study the contributions and future lines of research considered by the author are listed.

Resum:

En l'actualitat, l'aprofitament sostenible, la gestió i la conservació dels recursos naturals són fonamentals per tal d'encarar els reptes inclosos en l'agenda ambiental global. Esta agenda és un document orientador, que s'emmarca en una visió a llarg termini i que al mateix temps proposa accions concretes i consensuades a curt i mitjà termini establint diferents eixos temàtics entre els quals es poden destacar la Biodiversitat i els Recursos Hídrics. Per tal



d'acomplir estos reptes és necessari avaluar els recursos disponibles, el que fa necessari la implementació de models numèrics.

L'objectiu principal d'este treball és l'aplicació d'un model hidrològic distribuït anomenat TETIS, desenvolupat al Departament d'Enginyeria Hidràulica i Medi Ambient de la Universitat Politècnica de València, per tal de predir i analitzar la resposta hidrològica en conques hidrogràfiques espanyoles amb escassetesa de dades i aprofitant informació estàndard. El model integra els distints processos del cicle hidrològic per a generar variables útils per a l'anàlisi dels recursos hídrics com ara l'evaporació, la infiltració, els cabals superficials i subterranis, entre d'altres.

Les dades fonamentals necessàries per a la modelació hidrològica inclouen sèries de dades meteorològiques, dades dels sòls i cobertura del sòl i informació sobre la hidrografia de la conca. Per a l'aplicació del model hidrològic distribuït TETIS a les conques dels rius Ésera, Siurana i Xúquer es va desenvolupar una nova proposta metodològica que combina la hidrologia amb l'aprofitament d'informació estàndard, de lliure accés i disponible online. Entre la informació estàndard utilitzada destaquen els mapes de sòls elaborats per la Comunitat Europea i els mapes de precipitació elaborats per AEMET, com ara l'*Spain02*, conjunt de dades diàries de precipitació i temperatures màximes i mínimes sobre una malla regular d'alta resolució (0.2°x0.2°) per al territori peninsular espanyol i les Illes Balears, interpolada a partir d'un nombre elevat (milers) d'estacions que han estat sotmeses a un estricte control de qualitat.

L'anàlisi es va enfocar a la resposta de cadascuna de les conques usant la informació de la pluja puntual, caracteritzada per un percentatge significatiu de dades mancants, contrastada amb informació interpolada. Es va realitzar la modelació hidrològica a escala diària amb el model hidrològic TETIS estimant els paràmetres espacials, anomenats paràmetres distribuïts, i portant a terme la calibració i validació del model en els diferents escenaris seleccionats.

Els resultats obtesos varen ser comparats per a cada escenari simulat realitzant diferents anàlisis estadístiques per tal de conèixer el grau d'incertesa associat entre els diferents valors observats enfront als valors simulats. Es va determinar que els resultats òptims s'esperen dels models on es tinga major densitat d'informació hidrometeorològica, la qual cosa ajuda a especialitzar millor l'entrada de precipitació. A més a més, els resultats indiquen que els conjunts de dades interpolades i mapes globals s'estan arrimant a una resolució estàndard i que poden ser utilitzats per a prediccions hidrològiques en les regions on existeixen dades disperses. Addicionalment, al final de l'estudi es llisten els aportis i les futures línies d'investigació considerades per l'autor.

Palabras clave: *Modelación hidrológica/ Información estándar/ Parámetros distribuidos/ Datos distribuidos de precipitación/ TETIS.*

Key words: *Hydrological modeling/ Standard information/ Distributed parameters/ Precipitation gridded dataset/ TETIS.*

Paraules Claus: *Modelació hidrològica/ Informació estàndard/ Paràmetres distribuïts/ Dades distribuïts de precipitació/TETIS.*

A Dios, por llevarme siempre de su mano, guiándome y mostrándome el camino correcto,

A mi madre, porque el fruto de sus esfuerzos se ve reflejado en lo que soy,

A mi padre por su motivación,

& a mi hermana, por su constante apoyo.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en este estudio ha sido desarrollado dentro del *Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental- GIMHA* (http://lluvia.dihma.upv.es/index_es.html), conformado por investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia.

Deseo dejar constancia de mis agradecimientos al Dr. Félix Francés García, por su confianza y por darme la oportunidad de incorporarme a su equipo de trabajo.

A Gianbattista Bussi, por su paciencia y disposición, además su orientación constante, conocimientos y sugerencias acertadas fueron esenciales para concluir con éxito esta investigación. Giamba este trabajo es de ambos, mis más profundos agradecimientos.

A todos los miembros del GIHMA, especialmente a Sergio Salazar y Mario Hernández por sus grandes aportes en el desarrollo de este estudio. Además de brindarme un ambiente amigable durante todo el proceso, con su experiencia y apoyo hicieron que este trabajo saliera adelante.

Al proyecto SCARCE: Assessing and Predicting Effects on Water Quantity and Quality in Iberian Rivers caused by Global Change (ref.: CSD2009-00065), por ser una de las bases esenciales de esta investigación. A la Agencia Estatal de Meteorología-AEMET, por la disponibilidad de sus datos, los cuales han permitido llevar a cabo este trabajo.

Muchos amigos se merecen mi gratitud, por darme ánimo cuando más lo necesité, entre ellos: Diego, definitivamente haces parte de este proyecto de vida, gracias por darme ese empujoncito; a todos mis compañeros del Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, más que compañera de clases me hicieron sentir parte de su familia. A Jader y Juli, gracias por recibirme con los brazos abiertos, son mis hermanitos acá en España.

Finalmente, deseo dar las gracias a mi familia, a mi madre Ariela, sin su apoyo incondicional este sueño no se hubiese cumplido. Mami de todo corazón muchas gracias, te amo.



TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación y Objetivos.	1
1.2. La Modelación Hidrológica.	2
1.3. Justificación del trabajo.	3
1.4. Estructura del documento.....	5
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	9
2.1. Modelos Hidrológicos.	9
2.2. Información Estándar.	13
2.2.1. Precipitación y Temperaturas Distribuidas.....	14
2.2.1.1. Base de datos de precipitación y temperatura observadas.....	14
2.2.1.2. Modelos Climáticos.....	15
2.2.2. Topografía.	17
2.2.3. Cubierta de suelo.	18
2.2.4. Suelo.	21
2.2.5. Geología e Hidrogeología.....	28
2.2.6. Permeabilidad.....	29
2.3. Modelación hidrológica con información estándar.	32
2.3.1. HSPF (Hydrologic Simulation Program Fortran).	33
2.3.2. SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación – Aportación).	35
2.3.3. HYPE (HYdrological Predictions for the Environment).	39
3. MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO TETIS	43
3.1. Formulación del modelo.	43
3.2. Parámetros del modelo.	49
3.3. Condiciones Iniciales.....	52
3.4. Algoritmo de optimización SCE-UA para la calibración automática de parámetros del modelo TETIS.	53
4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	55
4.1. Cuenca hidrológica del río Ésera.....	55
4.1.1. Situación y características principales.	55
4.1.2. Clima.	56
4.1.3. Geología.....	57
4.1.4. Hidrogeología.	59
4.1.5. Suelos.	59
4.1.6. Usos del suelo.....	60
4.2. Cuenca hidrológica del río Siurana.....	61
4.2.1. Situación y características principales.	61
4.2.2. Clima.	62



4.2.3.	Geología.....	62
4.2.4.	Hidrogeología.....	63
4.2.5.	Suelos.....	64
4.2.6.	Usos de suelo.....	64
4.3.	Cuenca hidrológica del río Júcar.....	65
4.3.1.	Situación y características principales.....	65
4.3.2.	Clima.....	66
4.3.3.	Geología.....	67
4.3.4.	Hidrogeología.....	68
4.3.5.	Suelos.....	69
4.3.6.	Usos de suelo.....	70
5.	DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA RECOPIADA.....	73
5.1.	Series de Precipitaciones y Temperatura.....	73
5.1.1.	Series puntuales de Precipitación y Temperatura.....	74
5.1.2.	Series interpoladas de Precipitación y Temperatura.....	77
5.2.	Series de Evapotranspiración.....	84
5.2.1.	Evapotranspiración potencial.....	84
5.2.2.	Evapotranspiración de referencia.....	85
5.3.	Serie de Caudales medios diarios observados en las estaciones de aforo.....	88
5.3.1.	Régimen fluvial del río Ésera.....	88
5.3.2.	Régimen fluvial del río Siurana.....	92
5.3.3.	Régimen fluvial del río Júcar.....	93
6.	ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ESPACIALES PARA LA MODELIZACIÓN..	99
6.1.	Información disponible de las características físicas de la cuenca.....	99
6.1.1.	Modelo de Elevación Digital (MED).....	100
6.1.2.	Mapa derivado del uso del suelo.....	102
6.1.3.	Mapas derivados del suelo.....	107
6.1.4.	Mapa derivado de la textura del suelo.....	109
6.1.5.	Mapa derivado de la litología y la permeabilidad del substrato rocoso.....	111
6.2.	Parámetros espaciales para el modelo TETIS.....	113
6.2.1.	Parámetros derivados del Modelo de Elevación Digital (MED).....	113
6.2.2.	Parámetros derivados del mapa de coberturas vegetales.....	117
6.2.2.1.	Factor de vegetación para el cálculo de la evapotranspiración.....	117
6.2.2.2.	Intercepción y almacenamiento superficial.....	145
6.2.3.	Parámetros hidráulicos del suelo.....	148
6.2.4.	Parámetros geomorfológicos en la red de cauces.....	156
7.	CALIBRACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO.....	159



7.1.	Calibración y validación con información hidrometeorológica puntual.	160
7.1.1.	Calibración cuenca del río Ésera.	160
7.1.2.	Validación cuenca del río Ésera.....	166
7.1.3.	Calibración cuenca del río Siurana.	174
7.1.4.	Validación cuenca del río Siurana.....	177
7.1.5.	Calibración cuenca del río Júcar.....	179
7.1.6.	Validación cuenca del río Júcar.	184
7.2.	Calibración y validación con información hidrometeorológica interpolada.	197
7.2.1.	Calibración cuenca del río Ésera.	198
7.2.2.	Validación cuenca del río Ésera.....	200
7.2.3.	Calibración cuenca del río Siurana.	206
7.2.4.	Validación cuenca del río Siurana.....	209
7.2.5.	Calibración cuenca del río Júcar.....	211
7.2.6.	Validación cuenca del río Júcar.	213
7.3.	Comparación de resultados y Análisis Estadístico	219
7.3.1.	Comparación entre modelos usando parámetros distribuidos con información hidrometeorológica puntual e interpolada.	220
7.3.1.1.	Cuenca del río Ésera.....	220
7.3.1.2.	Cuenca del río Siurana.....	227
7.3.1.3.	Cuenca del río Júcar.....	232
8.	CONCLUSIONES.....	239
8.1.	Conclusiones del trabajo.	239
8.2.	Aportes del trabajo.	242
8.3.	Futuras líneas de investigación.	243
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	245
10.	ANEXOS.....	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de integración de los capítulos de la Memoria.....	6
Figura 2.1 Clasificación de Modelos Hidrológicos.	10
Figura 2.2 Clasificación de Modelos Hidrológicos según grado de agregación. (Modificado de Poblete, 2008)	13
Figura 2.3 Esquema de las celdas del modelo UKMO para España (Iglesias et al., 2005).	16
Figura 2.4 Celdas de cálculo del modelo PROMES (Iglesias et al., 2005).....	17
Figura 2.5 Distribución de las hojas CLC de España. (Fuente: Página Web “Instituto Geográfico Nacional”)......	20
Figura 2.6 Información de la organización en la base de datos del suelo de Europa. (Fuente. Página Web “The European Soil Database”).	23
Figura 2.7 Mapa de Atributos derivados de la ESDB para España. (Fuente: Página Web “ESDAC Map Viewer”)......	24
Figura 2.8 Pixel con tamaño de celda 1 km representado en un grid de alta resolución (ráster) de 10 km. (Fuente. Página Web “The European Soil Database”).	26
Figura 2.9 Cartografía de la permeabilidad logarítmica ($\log K \text{ m}^2$) y la incertidumbre sobre el mundo y América del Norte. Distribución mundial de la permeabilidad (a) y la incertidumbre (b). Distribución de la permeabilidad (c) y la incertidumbre (d) sobre América del Norte (excluido México). (Gleeson et al., 2011).	30
Figura 2.10 Mapa de Permeabilidad a escala 1:200.000. (Fuente: Página Web “Instituto Geológico y Minero de España -IGME”)......	31
Figura 2.11 Leyenda Mapa de Permeabilidad (Fuente: Página Web “Instituto Geológico y Minero de España -IGME”)......	32
Figura 2.12 Mascara unificada NLDAS (a); Localización geográfica de las cuencas de estudio utilizados en el modelo HSPF. (Fuente: Página Web “Land Data Assimilation System-LDAS” (a); Lee et al., 2010 (b).	34
Figura 2.13 Variables y flujos simulados en el modelo distribuido SIMPA. (Álvarez, 2004)	36

Figura 2.14 Mapa de aportación total media anual en mm (PROMES) (a); Disminución porcentual de la escorrentía (b) (Iglesias et al., 2005).....	38
Figura 3.1 Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.....	44
Figura 3.2 Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS	47
Figura 3.3 Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía (Montoya, 2008).....	48
Figura 3.4 Descripción esquemática de un parámetro efectivo para un flujo a través de un medio poroso heterogéneo (Grayson y Blöschl ,2001).....	50
Figura 4.1 Localización de la cuenca del río Ésera.	56
Figura 4.2 Esquema geológico estructural de la cuenca del río Ésera. (Fuente: CHE, 2007).	58
Figura 4.3 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.	60
Figura 4.4 Localización de la cuenca del río Siurana.	62
Figura 4.5 Esquema geológico estructural de la cuenca del río Siurana. (Fuente: CHE, 2008)	63
Figura 4.6 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.	65
Figura 4.7 Localización de la cuenca del río Júcar.	66
Figura 4.8 Agrupaciones litológicas cuenca del río Júcar. (Fuente: Pagina Web “Confederación Hidrográfica del Júcar”).....	68
Figura 4.9 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.	71
Figura 5.1 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Ésera, periodo 1997-2007. (Fuente: SAIH CHE).....	75
Figura 5.2 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Siurana, periodo 2003-2007. (Fuente: AEMET)	75
Figura 5.3 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Júcar, periodo 1999-2008. (Fuente: SAIH CHJ y AEMET).....	76
Figura 5.4 Red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (Herrera, 2011)	77

Figura 5.5 Spain02: Grid (aprox. 20 Km) de (a) Precipitación, (b) Temperatura máxima y (c) Temperatura mínima para el 10/04/2012. (Fuente: Página Web “Grupo de Meteorología de Santander”).	79
Figura 5.6 Distribución rejilla Spain02 en cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar...	82
Figura 5.7 Tendencias de la temperatura con la altitud en cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.....	83
Figura 5.8 ET media mensual calculada a partir de la ET diaria obtenida con el método de Hargreaves para cada una de las cuencas.	87
Figura 5.9 Ubicación de la estación de aforo Graus (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).	89
Figura 5.10 Ubicación de la estación de aforo Campo (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).	90
Figura 5.11 Ubicación de la estación de aforo Capella (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).	91
Figura 5.12 Ciclo anual en las estaciones de caudal.	92
Figura 5.13 Ubicación de la estación de aforo Embalse Ciurana (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 2003-2007 (b).	92
Figura 5.14 Ciclo anual en la estación de caudal.	93
Figura 5.15 Ubicación de la estación de aforo Pajaroncillo (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).	94
Figura 5.16 Ubicación de la estación de aforo Contreras (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).	95
Figura 5.17 Ubicación de la estación de aforo Alarcón (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).	96
Figura 5.18 Ciclo anual en las estaciones de caudal.	97
Figura 6.1 MED para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana, y (c) Júcar.	102
Figura 6.2 Variabilidad espacial del aprovechamiento del suelo. Cuencas hidrológicas: (a) Ésera, (b) Siurana, (c) Júcar.	105

Figura 6.3 Distribución porcentual de la superficie según el uso o cobertura del suelo. (a) Ésera, (b) Siurana, (c) Júcar.....	106
Figura 6.4 Mapas AWC_TOP y ROO derivados de la ESDB.	109
Figura 6.5 Mapa TEXT-SRF-DOM derivado de la ESDB.	110
Figura 6.6 Mapa de permeabilidades asociado a cada unidad litológica en la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.....	112
Figura 6.7 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Ésera.....	115
Figura 6.8 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Siurana.....	115
Figura 6.9 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Júcar.....	116
Figura 6.10 Rangos típicos esperados del valor de Kc para las cuatro etapas del crecimiento. (Allen et al., 2006).....	118
Figura 6.11 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.....	120
Figura 6.12 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.....	121
Figura 6.13 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Frutales.....	122
Figura 6.14 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.....	122
Figura 6.15 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Secano no arborizado.....	123
Figura 6.16 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Secano no arborizado.....	124
Figura 6.17 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Secano arborizado.....	125
Figura 6.18 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Secano arborizado.....	125
Figura 6.19 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase montaña de matorral.....	127

Figura 6.20 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase montaña de matorral.....	127
Figura 6.21 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase montaña de pino.	128
Figura 6.22 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase montaña de pino.	129
Figura 6.23 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase pastizales naturales.	130
Figura 6.24 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase vegetación escasa.	131
Figura 6.25 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase ríos, ramblas.....	131
Figura 6.26 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase urbano.	132
Figura 6.27 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Nieve.	133
Figura 6.28 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Ésera.....	134
Figura 6.29 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.....	135
Figura 6.30 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.....	136
Figura 6.31 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Siurana.....	137
Figura 6.32 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.....	139
Figura 6.33 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.....	139
Figura 6.34 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Frutales.....	140

Figura 6.35 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.....	141
Figura 6.36 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Regadío.	142
Figura 6.37 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.....	142
Figura 6.38 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase secano no arborizado.....	143
Figura 6.39 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.....	144
Figura 6.40 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Júcar.	145
Figura 6.41 Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo H_u (mm) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.	151
Figura 6.42 Conductividad hidráulica del suelo K_s (mm/h) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.....	153
Figura 6.43 Conductividad hidráulica del acuífero K_p (mm/h) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.	155
Figura 7.1 Ubicación estación de aforo Graus_013, utilizada para la calibración del modelo TETIS.....	161
Figura 7.2 Resultado del proceso de calibración manual para la cuenca del río Ésera con parámetros distribuidos e información puntual.	164
Figura 7.3 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 1998 en Graus_013, con FC_s resultantes del modulo SCEUA.	165
Figura 7.4 Estaciones de aforo Graus_013, Campo_258 y Capella_047 utilizadas para la validación del modelo TETIS.....	167
Figura 7.5 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Graus_013.....	168
Figura 7.6 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Campo_258.	171

Figura 7.7 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Capella_047.....	173
Figura 7.8 Ubicación estación de aforo Embalse Ciurana_9868, utilizada para la calibración del modelo TETIS.	175
Figura 7.9 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2004 en Embalse Ciurana_9868, con FC _s resultantes del modulo SCEUA.....	176
Figura 7.10 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2007 en Embalse Ciurana_9868.....	178
Figura 7.11 Ubicación estación de aforo Pajaroncillo_8090, utilizada para la calibración del modelo TETIS.	180
Figura 7.12 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC _s resultantes del periodo de calentamiento. . Información puntual SAIH y AEMET.....	182
Figura 7.13 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC _s resultantes del periodo de calentamiento. Información puntual AEMET.....	183
Figura 7.14 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC _s resultantes del periodo de calentamiento. Información puntual SAIH CHJ.....	184
Figura 7.15 Estaciones de aforo Pajaroncillo_8090, Contreras_8130 y Alarcón_8107 utilizadas para la validación del modelo TETIS.....	185
Figura 7.16 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual AEMET y SAIH.	186
Figura 7.17 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual AEMET.	188
Figura 7.18 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual SAIH CHJ.	189
Figura 7.19 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual AEMET y SAIH.	190
Figura 7.20 Esquema en un embalse.....	191



Figura 7.21 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual AEMET y SAIH.....	192
Figura 7.22 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual AEMET.	194
Figura 7.23 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual SAIH.	195
Figura 7.24 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual AEMET.....	196
Figura 7.25 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual SAIH.	197
Figura 7.26 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 1998 en Graus_013, con FC _s resultantes del modulo SCEUA. Información interpolada. ...	199
Figura 7.27 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Graus_013. Información interpolada.	201
Figura 7.28 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Campo_258. Información interpolada.	203
Figura 7.29 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Capella_047. Información interpolada.....	205
Figura 7.30 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2004 en Embalse Ciurana_9868, con FC _s resultantes del modulo SCEUA. Información interpolada.....	208
Figura 7.31 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2007 en Embalse Ciurana_9868. Información interpolada.....	209
Figura 7.32 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC _s resultantes del periodo de calentamiento. Información interpolada.....	212
Figura 7.33 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información interpolada.....	214
Figura 7.34 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información interpolada.	216

Figura 7.35 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información interpolada.....	218
Figura 7.36 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Graus_013. Información puntual (a), Información interpolada (b).	221
Figura 7.37 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe obtenido en la calibración y validación del modelo.	223
Figura 7.38 Diagramas boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual y periodo de validación.	225
Figura 7.39 Diagrama boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación.....	227
Figura 7.40 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Embalse Ciurana_9868. Información puntual (a), Información interpolada (b).....	228
Figura 7.41 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe obtenido en la calibración y validación del modelo con información puntual e interpolada.....	229
Figura 7.42 Diagramas boxplot correspondientes a la estación Embalse_Ciurana, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual y periodo de validación.	230
Figura 7.43 Diagramas boxplot correspondientes a la estación Embalse_Ciurana, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación.....	231
Figura 7.44 Índices de Nash obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo con información puntual.	233
Figura 7.45 Índices de Nash información puntual frente índices de Nash información interpolada obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo.	234
Figura 7.46 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Pjaroncillo_9868. Información puntual (a), Información interpolada (b).....	235
Figura 7.47 Diagramas boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual (SAIH) y periodo de validación.....	236



Figura 7.48 Diagrama boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación..... 238

Figura 8.1 Índices de Nash obtenidos de la simulación con parámetros homogéneos y parámetros distribuidos usando información interpolada. Calibración y validación del modelo del río Ésera..... 240

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Distribución superficie española en las cinco categorías del CLC.....	20
Tabla 2.2 Definición grid NLDAS (Valores de longitud/latitud representa el centro de 1/8th-grado de la cuadrícula).	34
Tabla 2.3 Base de datos globales para la predicción hidrológica a gran escala. (Strömqvist et al., 2009).....	40
Tabla 3.1 Intervalos de variación de los coeficientes y exponentes geomorfológicos (F. Francés et al, 2007).....	49
Tabla 3.2 Factores correctores y respectivos parámetros ajustados.	51
Tabla 5.1 Periodo de las series aforadas en las cuencas hidrológicas.	88
Tabla 6.1 Información cartográfica utilizada para la estimación de parámetros.	100
Tabla 6.2 Reclasificación Mapas: Capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_TOP) y Obstáculo de raíces (ROO).....	107
Tabla 6.3 Clasificación y descripción de la textura del suelo.	109
Tabla 6.4 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.....	119
Tabla 6.5 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Frutales.....	121
Tabla 6.6 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Secano no arborizado.....	123
Tabla 6.7 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Secano arborizado.....	124
Tabla 6.8 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para la clase Montaña de matorral.....	126
Tabla 6.9 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para la clase Montaña de pino.....	128
Tabla 6.10 Valores mensuales de Kc para las diferentes clases en la cuenca del río Ésera.....	133

Tabla 6.11 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.	135
Tabla 6.12 Valores mensuales de Kc para las diferentes clases en la cuenca del río Siurana.	136
Tabla 6.13 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.	138
Tabla 6.14 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Frutales.	140
Tabla 6.15 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Regadíos.....	141
Tabla 6.16 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase secano no arborizado.....	143
Tabla 6.17 Valores mensuales de Kc para las diferentes clases en la cuenca del río Júcar.....	144
Tabla 6.18 Intercepción y almacenamiento superficial para diferentes coberturas. ..	147
Tabla 6.19 Conductividades hidráulicas según la textura y profundidad del suelo....	152
Tabla 6.20 Valores de permeabilidad adoptados para las diferentes categorías cualitativas de permeabilidad del substrato rocoso.	154
Tabla 6.21 Coeficientes y exponentes utilizados en las relaciones geomorfológicas del modelo TETIS para la propagación de la escorrentía en la red de cauces.....	156
Tabla 7.1 Valores de los almacenamientos iniciales.....	162
Tabla 7.2 Factores Corrector y variables de fusión de nieve obtenidos con calibración manual.....	162
Tabla 7.3 Factores Corrector y variables de fusión de nieve resultantes del modulo de Calibración Automática (SCE-UA) del modelo TETIS.	164
Tabla 7.4 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Ésera.....	166
Tabla 7.5 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	168



Tabla 7.6 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	170
Tabla 7.7 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	171
Tabla 7.8 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	172
Tabla 7.9 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	173
Tabla 7.10 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	174
Tabla 7.11 Factores Correctores antes y después de la calibración automática.....	176
Tabla 7.12 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Siurana.....	177
Tabla 7.13 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	178
Tabla 7.14 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Siurana.....	179
Tabla 7.15 Valores de los almacenamientos iniciales resultantes del periodo de calentamiento.....	181
Tabla 7.16 Factores correctores de la calibración resultantes del periodo de calentamiento.....	181
Tabla 7.17 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.....	182
Tabla 7.18 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.....	183
Tabla 7.19 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.....	184
Tabla 7.20 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	186

Tabla 7.21 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	187
Tabla 7.22 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	188
Tabla 7.23 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	189
Tabla 7.24 Criterio de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	190
Tabla 7.25 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.	191
Tabla 7.26 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	192
Tabla 7.27 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.	193
Tabla 7.28 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	194
Tabla 7.29 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	195
Tabla 7.30 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	196
Tabla 7.31 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	197
Tabla 7.32 Valores de los almacenamientos iniciales.....	198
Tabla 7.33 Factores Corrector y variables de fusión de nieve resultantes del modulo de Calibración Automática (SCEUA) del modelo TETIS.	198
Tabla 7.34 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de calibración en la cuenca del río Ésera.....	200
Tabla 7.35 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.	201

Tabla 7.36 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	202
Tabla 7.37 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	204
Tabla 7.38 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	204
Tabla 7.39 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	205
Tabla 7.40 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.....	206
Tabla 7.41 Factores Corrector obtenidos en la calibración automática.....	207
Tabla 7.42 Criterios evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Siurana.....	208
Tabla 7.43 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	210
Tabla 7.44 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Siurana.....	211
Tabla 7.45 Valores de los almacenamientos iniciales resultantes del periodo de calentamiento.....	211
Tabla 7.46 Factores correctores de la calibración resultantes del periodo de calentamiento.....	211
Tabla 7.47 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.....	212
Tabla 7.48 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.....	214
Tabla 7.49 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	215
Tabla 7.50 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	216

Tabla 7.51 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.	217
Tabla 7.52 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.....	218
Tabla 7.53 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.	219
Tabla 7.54 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe frente al área drenada.....	222
Tabla 7.55 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual.	224
Tabla 7.56 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.....	226
Tabla 7.57 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe frente al área drenada.....	229
Tabla 7.58 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual.	229
Tabla 7.59 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.....	231
Tabla 7.60 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos en la cuenca del río Júcar.	232
Tabla 7.61 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual (SAIH)...	235
Tabla 7.62 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.....	237
Tabla 8.1 Índices de Nash obtenidos simulando con parámetros homogéneos y distribuidos e información interpolada.....	240

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Objetivos.

En la actualidad, el aprovechamiento sostenible, gestión y conservación de los recursos naturales son fundamentales para encarar los retos apuntados en la agenda ambiental global. Dicha agenda es un documento orientador, que se enmarca en una visión a largo plazo y a la vez propone acciones concretas y consensuadas a corto y mediano plazo estableciendo diferentes ejes temáticos entre los que se pueden destacar la Biodiversidad y los Recursos Hídricos. Para dar cumplimiento a estos retos es necesario evaluar los recursos disponibles, lo que a su vez requiere de la implementación de modelos numéricos.

Describir y predecir la relevancia de los impactos del cambio global sobre la disponibilidad del agua, su calidad y los servicios de los ecosistemas en cuencas mediterráneas de la Península Ibérica, así como sus impactos en la sociedad y la economía, es el objetivo principal del proyecto SCARCE. Proyecto multidisciplinar que se desarrolla en cuatro cuencas (Llobregat, Ebro, Júcar y Guadalquivir) que incluyen problemáticas muy diferentes y un amplio espectro de escalas espaciales, ecológicas y de escenarios socio-económicos. Se estructura en nueve Work Packages horizontales y temáticos que coordinan numerosas tareas como: desarrollo de modelos orientados a procesos, evaluación de los servicios ecosistémicos en las redes fluviales y los humedales, efectos de la recarga natural, artificial e inducida de acuíferos, dinámica de transporte de sedimentos, entre otros. Las cuencas hidrológicas del río Ésera, Siurana, ambas ubicadas en la cuenca del Ebro, y Júcar son los casos de estudio que se abordan en este trabajo. Puesto que las problemáticas de las cuencas mencionadas se encuentran subordinadas al comportamiento hidrológico, en este trabajo solo se analizan los procesos hidrológicos consecuentes a eventos de precipitación, antes de abordar los procesos implicados, los cuales serán objeto de estudios posteriores.

En un sentido amplio el presente trabajo tiene como objetivo la aplicación de un modelo hidrológico, conceptual, distribuido en el espacio y en el tiempo, llamado TETIS desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, para predecir y analizar la respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas españolas con escasez de datos y aprovechando información estándar. Para efectos de este trabajo se denomina información estándar a datos distribuidos en el espacio, disponibles online y de libre acceso adquiridos para un territorio determinado.

Para cumplir satisfactoriamente el objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- i. Revisión de los estudios previos o estado del arte existente donde se ha usado información estándar para la simulación en modelos hidrológicos.
- ii. Recopilación de los datos existentes y estimación de los parámetros mediante herramientas de SIG que servirán de inputs para la simulación.
- iii. Caracterización climática e hidrológica de las cuencas en estudio.
- iv. Presentación de los resultados obtenidos de la calibración automática utilizando el algoritmo SCE-UA (Duan et al, 1992) y de la validación espacio-temporal arrojados por el modelo.
- v. Contraste de los resultados del modelo con otras aplicaciones realizadas en cuencas hidrográficas.

1.2. La Modelación Hidrológica.

El interés en la modelación hidrológica se ha hecho evidente en los últimos 15 años con la llegada de los primeros ordenadores digitales y la creciente disponibilidad de información hidrometeorológica espacialmente distribuida. La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo, como lo es un modelo de cuenca, cuyos propósitos están encaminados al análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real, entre otros.

Existen modelos que representan la respuesta efectiva de una cuenca entera, sin caracterizar explícitamente la variabilidad espacial de la respuesta, es decir, los parámetros se consideran como homogéneos desde el punto de vista hidrológico. Estos modelos espacialmente concentrados o **agregados** son todavía ampliamente usados, aunque no son capaces de representar la variabilidad espacial de los procesos hidrológicos y de los parámetros de la cuenca.

A diferencia de los anteriores, existen los modelos **distribuidos**, que representan explícitamente la variabilidad espacial de las características superficiales de la cuenca y de las precipitaciones. Su representación es por división en mallas de celdas regulares (rectangulares, triangulares, etc.) de igual tamaño. Adicionalmente la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para conseguir un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y parcela (Puricelli, 2003). Requieren información detallada de la zona de estudio la cual se encuentra a disposición del público gracias al desarrollo en la cartografía digital, los sensores remotos y los sistemas de información geográfica

Hay un tercer tipo de modelos que combinan aspectos de los anteriores, llamados **pseudodistribuidos**. En estos modelos se divide la cuenca en subcuencas, agrupándolas en unidades de análisis donde los parámetros tienen similares características hidrológicas.

Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, en otras palabras un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca (Ven Te Chow, 1994).

1.3. Justificación del trabajo.

La disponibilidad de datos de entrada en estudios hidrológicos puede ser limitada debido a la falta de accesibilidad, baja fiabilidad o insuficiencia de los

esfuerzos de monitoreo. Los datos fundamentales necesarios en la modelación hidrológica incluyen series de datos meteorológicos, datos de suelo y cobertura de suelo e información sobre la hidrografía de la cuenca. La magnitud de los problemas con la disponibilidad de los datos que deben ser abordados varía entre países y regiones, y depende del tipo de datos requeridos por un modelo específico y el objetivo que se busca al aplicarlo.

La información a nivel global puede ser útil para realizar modelaciones hidrológicas en regiones donde escasean datos. No siempre está claro si el bajo rendimiento de los modelos se debe a limitaciones en los datos de entrada o a la representación de los procesos hidrológicos en el modelo, o una combinación de ambos. Por ende se necesitan más estudios para distinguir entre las fuentes específicas de los errores y las posibilidades de mejoras de ambos, bases de datos y modelos.

El interés de aplicar el modelo conceptual hidrológico distribuido TETIS, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia usando conjuntos de datos estándar globales y regionales requeridos en modelaciones hidrológicas, se basa en varias razones justificadas:

- En primera medida contribuir con investigaciones científicas enfocadas al uso de modelos hidrológicos y aportar a las diferentes cuestiones que se plantean al aplicarlos en un área de estudio, principalmente al análisis de la respuesta hidrológica de las cuencas ante eventos de precipitación.
- En segundo lugar analizar la respuesta hidrológica de las cuencas en estudio aprovechando información de precipitación estándar distribuida en el espacio, contrastando sus resultados con los logrados en modelaciones hidrológicas donde se emplean datos puntuales.
- En tercer lugar analizar el comportamiento del modelo al utilizar información estándar sobre las características del suelo.

1.4. Estructura del documento.

A continuación se describen brevemente los ocho capítulos de este trabajo, con la intención de ofrecer una perspectiva general de la estructura de la Memoria. Después de esta introducción, en el Capítulo II, se presenta un marco conceptual acerca de los modelos hidrológicos de interés y datos estándar, de libre acceso y disponibles online a escala global, regional y local. Posteriormente, se aborda los antecedentes de la aplicación en diferentes escenarios de modelos hidrológicos distribuidos usando información estándar.

El Capítulo III describe las características principales del modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual llamado TETIS, sus parámetros, condiciones iniciales y algoritmo de calibración (SCE-UA). Los escenarios escogidos para su aplicación y desarrollo de este trabajo son las cuencas hidrológicas de los ríos Ésera, Siurana y Júcar ubicadas en la península Ibérica. En el Capítulo IV se realiza una descripción breve de las características geomorfológicas de cada una de estas cuencas para enmarcar el estudio en una localización concreta y propiedades determinadas.

La descripción de la información hidrometeorológica recopilada se presenta en el Capítulo V. Se describen las series de lluvias y temperatura estándar y puntual, además de las series de evapotranspiración potencial y por último los caudales medidos en las estaciones de aforo de cada una de las cuencas que hacen parte del estudio.

En el Capítulo VI se define de forma general la estimación de los parámetros espaciales referentes a las características físicas de las cuencas que servirán de inputs para la correcta modelización, como son: modelo de elevación digital-MED, parámetros hidráulicos, mapas de cobertura vegetal para el cálculo de la evapotranspiración y parámetros geomorfológicos en la red de cauces.

El Capítulo VII integra la calibración y validación con información hidrometeorológica interpolada y puntual, de esta manera se obtienen los resultados de la modelación. Se realizan simulaciones con parámetros

distribuidos y finalmente se comparan resultados efectuando algunos análisis estadísticos.

Con base a los siete capítulos anteriores en el Capítulo VIII se sintetizan las principales conclusiones y las futuras líneas de investigación que se derivan del presente trabajo en cuanto al comportamiento hidrológico global de las cuencas en estudio.

Cada uno de los Capítulos presentados en esta Memoria está integrado con el resto y tiene relación con el objetivo general de la misma. La estructura del trabajo se esquematiza en la Figura. 1.1.

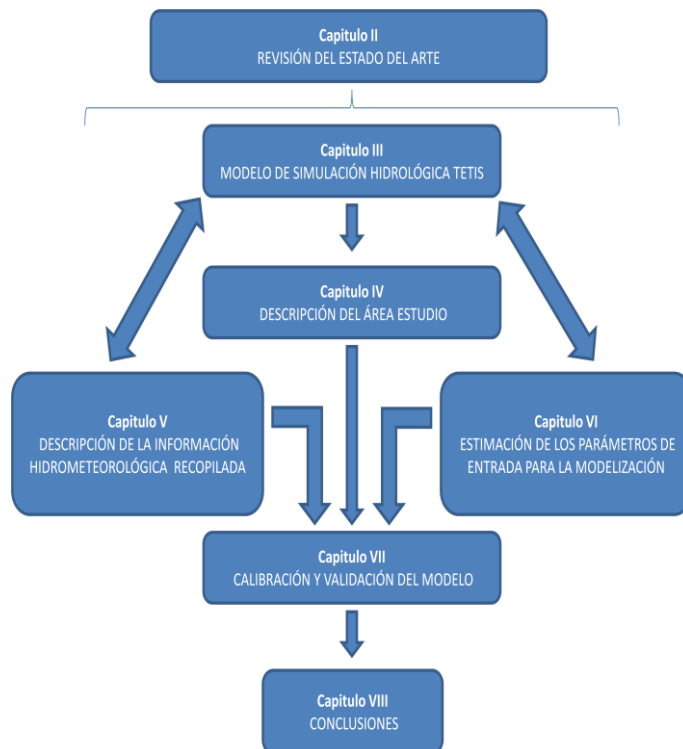


Figura 1.1 Esquema de integración de los capítulos de la Memoria.

Como se observa en la Figura 1.1, el Capítulo II provee un marco conceptual y antecedente de los procesos estudiados. El Capítulo III identifica el modelo de simulación hidrológico escogido que se aplica a las cuencas que se describen como área de estudio en el Capítulo IV. A partir de esta identificación se integran los capítulos V y VI, los cuales dependen de la información y parámetros que el modelo requiere para su correcto



funcionamiento. De esta manera se ejecuta la calibración y posterior validación del modelo generando criterios de interpretación de los resultados conseguidos plasmados en el Capítulo VII. El último capítulo de esta Memoria (VIII) presenta las conclusiones obtenidas, a su vez utiliza la base conceptual (Capítulo II) para analizar e interpretar resultados.

2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

La comunidad científica en sus recientes investigaciones ha tratado de resolver los problemas característicos de los modelos hidrológicos, entre los que se puede nombrar la dificultad humana en la observación del proceso. La ciencia actual cuenta con medios suficientes para observar sólo una pequeña fracción del proceso, que al no ser analizada u observada correctamente puede conllevar a ambigüedades que varían los resultados de forma alarmante e, incluso, conducir a errores graves.

En esta sección se presenta el estado del arte de la aplicación de modelos hidrológicos en el estudio de los procesos físicos de interés de esta tesina.

2.1. Modelos Hidrológicos.

Para evaluar la respuesta hidrológica de un sistema, regularmente es indispensable la elaboración de algún tipo de esquema, por medio del cual se pueda representar en forma simplificada, un sistema real; en otras palabras: un modelo. El mismo podrá ser utilizado para reconstruir eventos pasados y predecir los futuros (Puricelli, 2003)

Según Tucci (1998) el modelo es la representación de algún objeto o sistema, en un lenguaje o forma de fácil acceso y uso, con el objetivo de entenderlo y poder generar sus respuestas para diferentes entradas. Un modelo hidrológico es una herramienta que la ciencia desarrolló para entender mejor y representar el comportamiento de la cuenca hidrográfica y prever condiciones diferentes a las observadas.

Con la presentación del modelo agregado conceptual Stanford Watershed Model (Crawford y Linsley, 1966), se inició el desarrollo de muchos modelos, partiendo de los más simples modelos lineales con parámetros concentrados hasta los más complejos modelos no lineales con parámetros distribuidos. Por ende se puede afirmar que los modelos son de diferentes tipos y fueron desarrollados para distintos propósitos.

Los modelos en cualquier ámbito de la ciencia se clasifican en diferentes criterios: según las ecuaciones utilizadas, pueden ser modelos probabilísticos y determinísticos. Los primeros se basan en las leyes del azar o probabilidad y son de tipo estadísticos y estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales - por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. Por su parte en los modelos determinísticos las variables vienen establecidas por leyes físicas consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad.

Los modelos determinísticos pueden ser clasificados en cuatro subgrupos en función de los procesos físicos que simulan, los algoritmos que el modelo emplea para describir dichos procesos y la dependencia de datos del modelo: (1) modelos empíricos: estimación por tablas, problemas de extrapolación, (2) conceptuales: cierto grado de simplificación, (3) físicamente basados: parámetros medibles directamente y (4) "caja negra": no es posible la estimación de parámetros, calibración imprescindible y problemas de extrapolación.

Para una mejor ilustración de esta clasificación, a continuación se presenta en detalle en la Figura 2.1 la distribución de modelos hidrológicos.



Figura 2.1 Clasificación de Modelos Hidrológicos.

Adicionalmente a la anterior clasificación, existen tipos de modelos según grado de agregación, estos pueden ser concentrados o agregados y

distribuidos dependiendo del grado de discretización en la descripción de las características de la cuenca (Meijerink, 1994)

Modelos agregados ('lumped models'): Estos modelos son de naturaleza cuasi-física. Son modelos simplificados que trabajan con valores integrados espacialmente. 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 (Puricelli, 2003). Como ejemplo se pueden citar el módulo hidrológico MIKE11 (del Danish Hydraulic Institute), HEC1/HEC-HMS (del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos), el módulo RUNOFF de SWMM gestionada por el U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y respaldada técnicamente por la Universidad de Oregón, etc.

Modelos distribuidos: este tipo de modelos considera las ecuaciones de conservación de masa, energía y movimiento, para describir el movimiento del agua en superficies y en el subsuelo (zona saturada y no saturada), usando técnicas de discretización numérica tal como el método de las diferencias finitas o de elementos finitos. El cálculo se realiza para cada celda de la grilla que representa la cuenca.

Los modelos distribuidos se pueden discretizar basándose en la definición de una grilla regular donde se realiza el cálculo distribuido o teniendo como base las líneas de escurrimiento y las curvas de nivel.

Dentro del primer grupo se pueden citar los siguientes modelos distribuidos: ANSWER (Beasley et al.1980), SHE (Abbott et al.; 1986a y 1996b; Bathurst, 1986a y 1986b; Bathurst et al. 1995), en donde se concluyó que solo es posible analizar la respuesta hidrológica del terreno, en relación al cambio en el patrón de distribución de la cubierta del suelo mediante modelos distribuidos. Otros modelos que se destacan son: THALES (Grayson et al.1992^{a-b}), FLORA (Burlando et al.1994) y DBSIM (Garrote y Bras 1995^{a-b}).

Dentro del segundo grupo, el caso más notorio es un modelo hidrológico distribuido utilizado para predicción de zonas saturadas y generación de escurrimiento, TOPOG (O'Loughlin, 1986), similar al modelo TOPMODEL

(Beven y Kirkby, 1979). El TOPOG se basa en modelos topográficos, donde las líneas de flujo se obtienen a partir de tubos de escurrimiento perpendiculares a las curvas de nivel.

Con el transcurrir del tiempo aumenta la controversia y el interés respecto a las ventajas de la modelación distribuida. Éstas se basan en la estructura teórica de cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, donde cada parámetro tiene su respectiva interpretación física. Presentan significativas ventajas en su propia estructura teórica comparado a otros tipos de modelos (conceptuales y caja negra) ya que los parámetros tienen una interpretación física con valores que podrían ser determinados en campañas o en laboratorio (Rafaelli, 2003). Estos modelos permiten la variación espacial de los parámetros para cada celda de la malla que representa la cuenca.

La problemática en la aplicación de modelos distribuidos está enfocada a definir la escala de representación espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos de interés, teniendo en cuenta los datos existentes o los posibles de recopilar.

Algunas limitaciones características de los modelos distribuidos son:

- i. La representación de la heterogeneidad topográfica y climática.
- ii. La variación entre la escala espacio-tiempo de las observaciones y la utilizada en el modelo.
- iii. La definición de la escala de análisis y validez de resultados con distintas precisión.
- iv. El elevado número de parámetros, no siempre de preciso significado físico.

Por último es indispensable precisar que en los modelos distribuidos los resultados dependen de la evaluación de los parámetros que se ingresan al modelo, adicionalmente un punto clave del análisis es la calibración y validación del modelo.

La clasificación según el grado de agregación se presentan en la Figura 2.2, en donde los cuadrados superiores representan los modelos agregados y los

inferiores los modelos distribuidos. Por otro lado, los del lado izquierdo representan los modelos hidrológicos independientes del tiempo y los del lado derecho, los modelos de simulación continua, dependientes del tiempo.

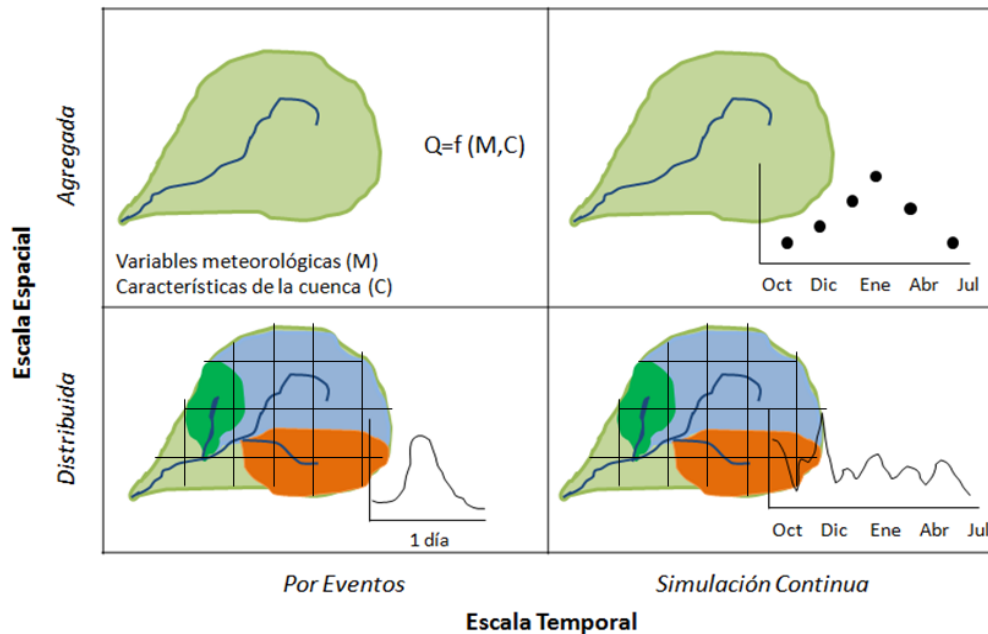


Figura 2.2 Clasificación de Modelos Hidrológicos según grado de agregación. (Modificado de Poblete, 2008)

Según este marco de análisis, en el presente trabajo se aplicará un modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual llamado TETIS (Francés et al., 2002; Velez et al., 2002), desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, con simulación continua, abordando los tres tipos de tamaño de cuencas (pequeña, mediana y extensa), sirviendo como herramienta para representar la producción de escorrentía.

2.2. Información Estándar.

El concepto de información espacializada se refiere a datos distribuidos en el espacio, de tal forma que cada punto tiene asociadas sus propias características, que no tienen por qué ser iguales que las de los puntos inmediatamente contiguos. Existen muchas formas de expresar este tipo de información distribuida, aquí se trabajará con mallas formadas por celdas

cuadradas, que representarán cada uno de los puntos que disponen de información propia.

Se va a utilizar información espacializada de datos meteorológicos, Precipitación y Temperatura, y de los siguientes parámetros: Topografía, Cubierta del suelo, Suelo, Geología e hidrogeología.

2.2.1. Precipitación y Temperaturas Distribuidas.

A continuación se presentan antecedentes relacionados con base de datos de precipitación y temperatura observados y modelos meteorológicos o climáticos que se han usado para alimentar modelos hidrológicos.

2.2.1.1. Base de datos de precipitación y temperatura observadas.

Con la creación de la Organización Mundial de la Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) en 1950 se propició el marco intergubernamental para la sistematización de los métodos de medición y el establecimiento de redes internacionales de observación.

A nivel global se cuenta con el GCOS (Global Climate Observing System¹), sistema coordinado que recopila y comprueba las observaciones registradas de variables atmosféricas y oceánicas (en superficie). A nivel nacional los diferentes centros meteorológicos disponen de su propia red de estaciones, algunas de las cuales están incluidas en el GCOS. Estas redes de estaciones son mucho más densas y registran una gran variedad de variables climáticas (precipitación, temperatura, granizo, nieve, niebla, etc.) como lo es la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Finalmente a nivel continental algunos organismos como la European Climate Assessment & Dataset² (ECA&D, Tank et al, 2002) recopilan también parte de esta información, tratando de crear bases de datos continentales pero logrando aglutinar solamente una parte de la información disponible (dada la heterogénea política de datos).

¹ <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/index.php>

² <http://eca.knmi.nl>

La mayoría de esta base de datos se encuentran alteradas por factores no climáticos, por ende es indispensable realizarles un post-proceso. La alternativa más común y con gran auge en los últimos años es la de interpolar las bases de datos observadas, definiendo rejillas regulares de alta resolución espacial y temporal. A escala global, la Unidad de Investigación sobre el Clima³ (CRU) ha creado diversas bases de datos mensuales con resolución espacial 0.5° para las principales variables meteorológicas. Para el caso de la precipitación, proyectos como *Global Precipitation Climatology Project*⁴ (GPCP, Adler et al., 2003) y *Tropical Rainfall Measuring Mission*⁵ (TRMM, Huffman, 1997; Huffman et al., 1997) han generado datos mensuales, diarios e intradiarios con resolución espacial de 1° y 0.25°. A nivel continental se cuentan con algunas rejillas de datos diarios a partir de redes densas de estaciones, en Europa (E-OBS⁶, Haylock et al., 2008), América del Norte (Maurer et al., 2002), América del Sur (Liebmann and Allured, 2005), Australia (Jeffrey et al., 2001) y Asia (Yatagai et al., 2008), con resoluciones de 25-50 km. Por la debida cobertura heterogénea en los diferentes países, también se ha desarrollado este tipo de rejillas a escala nacional, algunos ejemplos se pueden destacar como: Reino Unido (Perry and Hollis, 2005), Sudáfrica⁷ (Zucchini and Nenadie, 2006), España (Morata et al., 2006; Ninyerola et al., 2007; González et al., 2010), asimismo *Spain02* (Herrera, 2011), base de datos diaria de precipitación y temperaturas máximas y mínimas en la península Ibérica con resolución espacial de 0.2°x0.2°, la cual será usada en el desarrollo de este proyecto y se aborda con detalle en el Capítulo 5.

2.2.1.2. Modelos Climáticos.

En España, unos de los modelos MCGA-OA⁸ más conocido es el modelo UKMO (United Kingdom Meteorological Model del Hadley Centre for Climate Research de Bracknell, UK), que utiliza celdas con una resolución horizontal de

³ <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data>

⁴ <http://precip.gsfc.nasa.gov/>

⁵ <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

⁶ http://www.knmi.nl/samenw/ensembles_rt5/wp51.html

⁷ <http://134.76.173.220/rainfall/index.html>

⁸ MCGA-OA: Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmosfera

2.5°Cx3.75°C en latitud-longitud (en la Península Ibérica corresponde a celdas de 280 km de ancho por 320 km de altura Figura 2.3).



Figura 2.3 Esquema de las celdas del modelo UKMO para España (Iglesias et al., 2005).

Los datos utilizados por este modelo proceden de los escenarios de clima futuro (intervalo de tiempo 2040-2049): el clima con las condiciones de CO₂ actuales (1xCO₂) y el clima con condiciones de doble CO₂ equivalente (2xCO₂). Por otra parte, las salidas del modelo UKMO consisten en las medias mensuales de cada año de la temperatura máxima (°C), la temperatura mínima (°C), la precipitación (mm), la velocidad del viento (m s⁻¹) y la humedad relativa (%).

Para responder a las preguntas sobre el impacto de un posible cambio climático sobre los recursos hídricos de un territorio se requieren resoluciones temporales y espaciales cada vez mayores, además información sobre un número mayor de variables (evapotranspiración, temperaturas máximas y mínimas, escorrentías, etc.). Por esta razón se han desarrollado modelos climáticos regionales, un ejemplo claro es el modelo PROMES que parte de los campos de salida del MCG del Hadley Centre Prediction and Research (Had CM2).

El objetivo básico del modelo regional de clima PROMES (Pronóstico a Mesoescala) es generar los campos atmosféricos necesarios que sirvan como

entrada para los diferentes modelos de simulación de recursos hídricos o en otras áreas específicas. La resolución horizontal es uniforme, teniendo todas las celdas una dimensión horizontal de 50kmx50km. La región para España se compone de 45x39 celdas, incluyendo las de frontera, como se ilustra en la Figura 2.4.

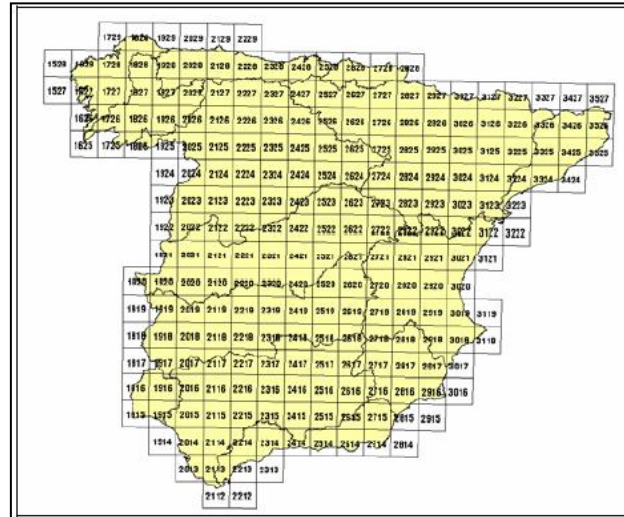


Figura 2.4 Celdas de cálculo del modelo PROMES (Iglesias et al., 2005).

2.2.2. Topografía.

Es necesario abastecerse de datos topográficos del terreno en el que se encuentran ubicadas las cuencas de estudio para posteriormente realizar su caracterización. Para esto debe cuestionarse acerca de la calidad de datos, si ésta es necesaria para el análisis hidrológico que se desea realizar, y del formato en que se requieren los archivos.

Entre las fuentes de MEDs, se destaca el proyecto *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* obtenido en conjunto por la misión de la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), el Centro Aeroespacial de Alemania (DLR) y la Agencia Espacial Italiana (ASI). Los MEDs se generaron mediante la técnica de interferometría radar de apertura sintética (InSAR-Synthetic Aperture Radar Interferometry). Los datos de la SRTM cubren todo el planeta con una

resolución de las celdas de 1 arc-segundo (30.55m) y de 3 arc-segundo (92.26m), escala 1:1.250.000 (Farr et al., 2000).

También existen los *MEDs ASTER*, generados con el subsistema VNIR con las bandas infrarrojas 3N y 3B. Los *MEDs ASTER* tienen una precisión absoluta ≥ 7 m, resolución horizontal de 30m y precisión relativa ≥ 10 m, lo cual permite su uso para obtener buenos estimativos de la pendiente y el aspecto (dirección de la pendiente). Cumplen las normas de calidad para la generación de mapas a escala 1:50.000 a 1:250.000.

El Instituto Geográfico Nacional, actualmente dependiente del Ministerio de Fomento a través del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) provee la información topográfica a nivel nacional, ésta descarga es libre y gratuita, por ende será escogido para el desarrollo de este trabajo. Entre el catálogo de productos que se puede descargar se encuentran: Archivos ráster del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 (MTN25), consta de 4123 hojas de 5' de latitud por 10' de longitud y 1:50.000 (MTN50) compuesto por 1106 hojas numeradas del 1 al 1130, Modelo digital del terreno con paso de malla de 5, 25 y 200 m, formato de archivo ASCII matriz ESRI (.asc) y con proyección UTM en el huso correspondiente, entre otros.

2.2.3. Cubierta de suelo.

Las características de la cubierta del suelo han sido analizadas globalmente, destacándose diferentes tipo de información donde se caracteriza la distribución global de los tipos de vegetación, uso del suelo y albedo superficial: Matthews' Global Vegetation DB for Climate Studies⁹ (Matthews, 1983), este proyecto se deriva de la recopilación y análisis de hasta 100 diferentes mapas e imágenes satelitales, existentes en el Goddard Institute for Space Studies (GISS; Columbia University in New York⁹) con resolución de 1°x1°. Otro ejemplo es el World Vegetation Map, este mapa global de vegetación proveniente de imágenes NOAA¹⁰/GVI¹¹, obtenidas a lo largo del

⁹ <http://geonetwork.grid.unep.ch/geonetwork/srv/en/main.home>

¹⁰ NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration; Estados Unidos.

periodo 1985-1987, donde se tienen 8 tipos generales de vegetación (Murai et al., 1990).

En Europa se encuentra el programa CORINE (Coordination of Information on the Environment), proyecto experimental para la recopilación, la coordinación y la homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad Europea. Dentro del programa cada miembro produce una serie de datos, sobre la base de una metodología unificada. Su almacenamiento y post-procesamiento es por medio de tecnología GIS. Algunos de los productos más destacados del programa son: i. *CORINAR*: desarrollado para el análisis de las principales fuentes de emisión y migración de contaminantes aéreos, ii. *CORINE bioteps*: referida a la identificación, inventario y descripción de sitios cuya protección es espacialmente importante para la preservación del medio natural europeo y iii. *CORINE land cover (CLC)*: tiene como objetivo fundamental la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la Cobertura y/o Uso del Territorio (Ocupación del suelo). Jerarquizada en varios niveles de información. La nomenclatura europea consta de 3 niveles con 44 clases diferentes. La nomenclatura española se amplió hasta 5 niveles y 64 clases para el CLC90 y 85 clases para el CLC2000 y CLC2006. La distribución de las hojas en el territorio peninsular es de 276 hojas, Islas Baleares 6 hojas, Islas Canarias 14 hojas, para un total de 296 hojas, como se ilustra en la Figura 2.5.

¹¹ GVI: Global Vegetation Index

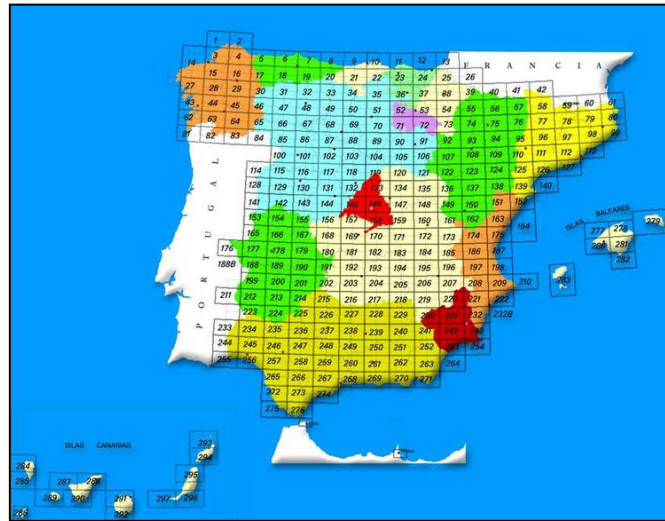


Figura 2.5 Distribución de las hojas CLC de España. (Fuente: Página Web “Instituto Geográfico Nacional”).

La información de la distribución de la superficie española en las cinco categorías principales del CLC se muestra en la Tabla. 2.1.

Tabla 2.1 Distribución superficie española en las cinco categorías del CLC.

Categoría	Área (ha)
Superficies Artificiales	676.279
Zonas Agrícolas	25.669.331
Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos	23.822.269
Zonas húmedas	97.241
Superficies de agua	295.039

También se destacan otros mapas como *The European Remote Sensing Forest/Non-forest Digital Map*, originalmente preparado por la Agencia Espacial Europea (ESA), derivado de la clasificación digital de imágenes NOAA/AVHRR¹² multiespectral de 1kmx1km de resolución, abarcando unas 70 escenas dentro del periodo 1990-1992. Además de la producción propia de la NOAA, productos provenientes del procesamiento de imágenes AVHRR/GVI, a diferentes escalas temporales (anual, mensual y semanal) y en diferente periodos de tiempo (1982-1994; 1983-1990).

¹² AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

Para este trabajo se utilizará la distribución de la cobertura de suelo propuesta en el programa CLC2006, disponibles en el Centro de Descarga del Centro Nacional de Información Geográfica¹³. Este producto posee ventajas sobre otros productos comerciales, tiene una de las mejores relaciones calidad-coste existente ya que su condición es de uso libre, además de su resolución temporal y su resolución espacial. Por otra parte se ha aplicado en anteriores proyectos presentando resultados satisfactorios.

2.2.4. Suelo.

La primera versión de un mapa de suelo en la comunidad Europea data de 1965, con escala 1:2.500.000. La segunda versión se elaboró a partir del mapa de Suelos de la FAO-Unesco, más detallado, con escala 1:1.000.000 a principio de la década del 70. Posteriormente fue digitalizado e incorporado al proyecto CORINE, con un número de clases de suelos cercano a los 350.

A escala global existen trabajos concretos con información de suelos y en diferentes sectores del planeta. Algunos se mencionan a continuación:

- i. *FAO-Unesco Soil Map of the World*¹⁴; *1992 Digital Version*. Inicialmente publicado a escala 1:5.000.000 desde 1974 a 1978. Incluye diferentes unidades cartográficas compuestas por unidades de suelos o asociaciones de suelos, con 106 tipos diferentes de unidades de suelos o asociaciones.
- ii. *Soil Water Holding Capacity*. Base de datos que indica la distribución mundial de la capacidad de almacenamiento hídrico a capacidad de campo, para los primeros 30 cm de suelo. Desarrollado por la NASA, con una resolución espacial de 1º latitud/longitud, y 180 filas por 360 columnas (Bouwman et al., 1993).
- iii. En el caso de regiones específicas se destaca la *STATSGO*¹⁵ (*State Soil Geographic Database*), desarrollada y amparada por la USDA (U.S. Department of Agriculture). Contiene información detallada de todos los

¹³ <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>

¹⁴ <http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/>

¹⁵ <http://www.soils.usda.gov/>

tipos de suelo en los Estados Unidos, tal como la textura, densidad aparente, porosidad, tamaño de partículas (arena, limo y fracciones de arcilla), capacidad de agua disponible, composición, espesor, etc, más los perfiles edafológicos.

A nivel regional también cabe destacar *The European Soil Database* (ESDB, por sus siglas en inglés), versión V2.0¹⁶, a escala 1:1.000.000, grid de 1kmx1km, es parte del Sistema de Información Europeo del Suelo (EUSIS) y es el producto resultante de la colaboración de toda la Unión Europea y los países vecinos.

La ESDB es una representación simplificada de la diversidad y variabilidad espacial de la cobertura del suelo. La metodología utilizada para diferenciar y nombrar a los principales tipos de suelos se basa en la terminología de la leyenda de la FAO para el Mapa de Suelos del Mundo a escala 1:5.000.000. Esta terminología ha sido refinada y adaptada para tener en cuenta las especificaciones de los paisajes de Europa.

La base de datos contiene una lista de unidades tipológicas del suelo (UTS). Además de los nombres de los suelos que representan, estas unidades son descritas por las variables (atributos) que especifican la naturaleza y propiedades de los suelos como la textura y el régimen hídrico. En la escala escogida no es posible delimitar la UTS, por lo tanto, se agrupan en unidades de mapa de suelo (SMU) para formar asociaciones de suelos e ilustrar el funcionamiento dentro del paisaje. Cada SMU corresponde a una parte del territorio asignada y como tal está representando por uno o más polígonos en un conjunto de datos geométricos (Figura 2.6)

¹⁶ http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/ESDBv2/index.htm

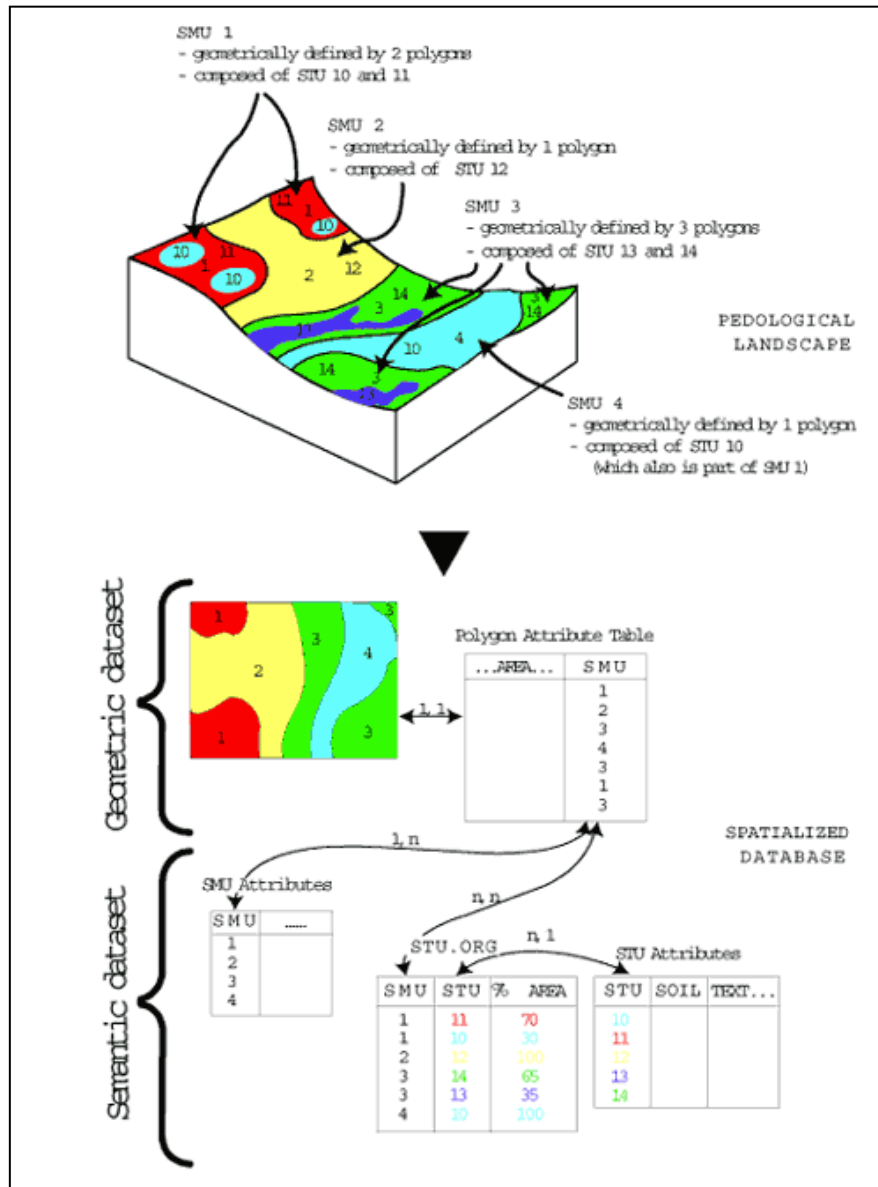


Figura 2.6 Información de la organización en la base de datos del suelo de Europa. (Fuente. Página Web "The European Soil Database").

La ESDB está descrita por 73 atributos que especifican las propiedades de los suelos, agrupadas en 14 categorías según sus características de la siguiente manera: Limitación en el uso agrícola, Clasificación de suelo de la Base de Referencia Mundial (WRB), Textura, Material Parental, Clasificación de suelo según la leyenda de la FAO, Uso de Suelo, Obstáculos-Impermeable-Régimen de Humedad del Suelo, Sistema de Gestión de Agua, Altitud-Pendiente, Propiedades Primarias, Propiedades Químicas, Propiedades Mecánicas, Propiedades Hidrológicas, Aplicaciones. Para los valores de

algunos atributos, se indica cuál es la confianza en el valor. El valor de confianza se expresa cualitativamente como alta, moderado, bajo o muy bajo, como se ilustra en la Figura 2.7.

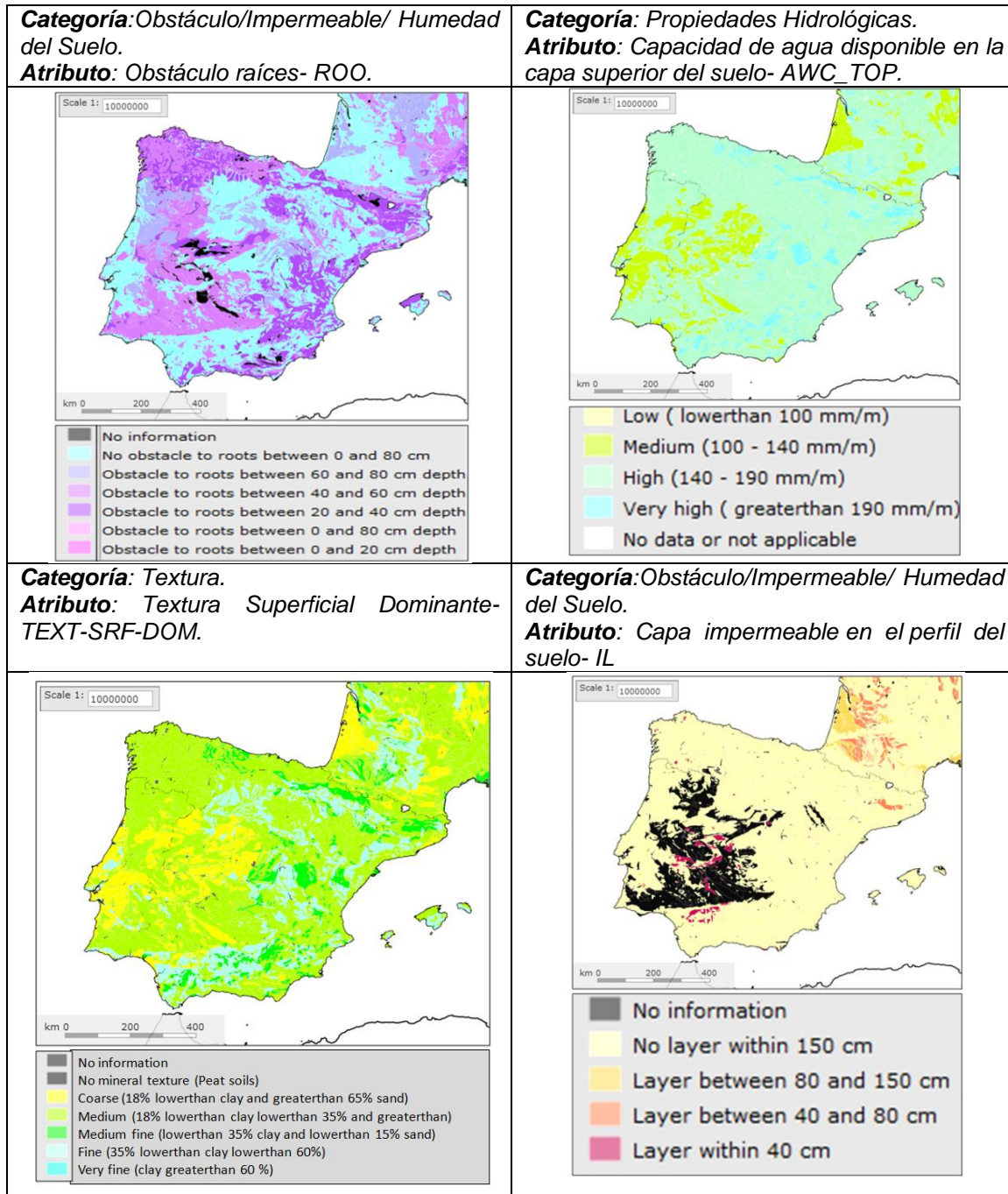


Figura 2.7 Mapa de Atributos derivados de la ESDB para España. (Fuente: Página Web “ESDAC Map Viewer¹⁷”).

¹⁷ <http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/wrb/>

Tradicionalmente, la base de datos de Suelo Europea ha sido distribuida en formato vectorial. Recientemente, se ha derivado una versión de esta base de datos en formato ráster Figura 2.8. Desde el punto de vista del Sistema de Información de Suelo Multi-Escala (MEUSIS) existen algunas ventajas, las cuales se enumeran a continuación:

- i. Cada celda tiene una identificación y su ubicación geográfica está determinada por la posición en la celda matriz. La única información almacenada es el punto de origen (en la esquina inferior izquierda) del ráster.
- ii. Es fácil almacenar y analizar datos. El concepto es adecuado para dar prioridad a los temas de correlación.
- iii. Es factible integrar datos de diferentes fuentes o diferentes tipos de datos. Como resultado, los datos sobre el suelo pueden ser integrados con otros indicadores ambientales.
- iv. La estructura es adecuada para llevar a cabo la ampliación desde el nivel local hasta el regional, nacional y europeo.

La desventaja principal del enfoque en formato ráster es que esta técnica es menos precisa en la representación del mundo real, lo que significa que no es adecuado para representar la complejidad de la cobertura del suelo, además que no es fácil convencer a la población sobre el uso de esta técnica. En la Figura 2.8 se ilustra como el pixel de celda (tamaño 1km) puede estar representado en una cuadrícula de mayor resolución (o ráster) de 10 km.

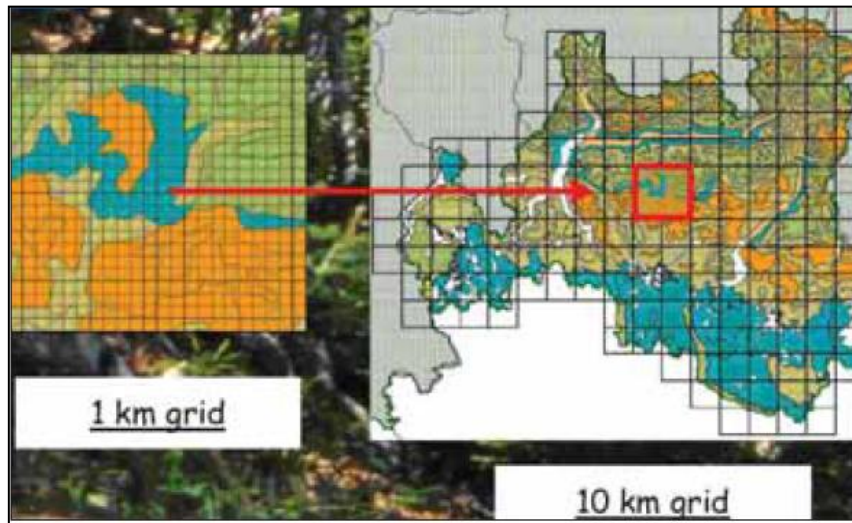


Figura 2.8 Pixel con tamaño de celda 1 km representado en un grid de alta resolución (ráster) de 10 km. (Fuente. Página Web “The European Soil Database”).

A nivel nacional, en España, se han aplicado diferentes sistemas de taxonomía edafología. Entre los casos a mencionar se acentúa el de Guerra (1968), además de información cartográfica en donde el sistema de clasificación de suelos fue el *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1975) y por último la propuesta generada por la FAO, la cual fue usada para generar los mapas de suelo desarrollados por la Conselleria D’Agricultura, Pesca, Alimentació i Agua de la Generalitat Valenciana (1995) dentro del Proyecto de Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo (LUCDEME).

El Proyecto LUCDEME surge debido a las inquietudes presentadas en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Desertificación en Nairobi (Kenia) en 1977. Como resultado de las sesiones de trabajo, se elaboró un mapa de desiertos y áreas proclives a la desertificación en donde España era el único país de Europa occidental que aparecía con importantes zonas sometidas a procesos de desertificación calificados como graves. Específicamente todo el sureste español (Almería, Granada, Málaga, Murcia, Alicante, Valencia y Castellón) estaba clasificado con riesgo de desertificación muy alto; gran parte del Valle del Ebro, la Meseta Central, Extremadura y Huelva con riesgo moderado.

La primera fase del Proyecto LUCDEME comprende una superficie de 32.622 km², abarcando las provincias Almería y Murcia y la vertiente mediterránea de la provincia de Granada, englobando las cuencas de los ríos Guadalentín o Sangonera, Almanzora, Adra, Albuñol y Guadalfeo.

El Proyecto LUCDEME está actualmente vigente y desde su aprobación en 1981, ha reunido y generado una gran cantidad de información plasmada en estudios, evaluaciones, mapas temáticos, investigaciones, formulaciones y aplicaciones técnicas acerca del proceso de desertificación en zonas áridas y semiáridas de España. Entre estos trabajos se destaca la elaboración de 132 Hojas del Mapa de Suelos y en ejecución 9 hojas más, a escala 1:100.000, publicadas en el Catálogo de Publicaciones. Estos mapas son importantes ya que pueden ser utilizados como herramientas para el diseño de las actuaciones que deben efectuarse para la restauración o rehabilitación de las áreas afectadas por la Desertificación.

Los Mapas de Suelos constan de una memoria que recoge las características generales que corresponde al territorio comprendido dentro de la Hoja y en cada unidad el color base responde al suelo consignado en primer lugar, el rayado horizontal al resto de los suelos principales y el vertical a las inclusiones. De acuerdo con FAO (1988) la diversidad de los suelos presentes en las hojas realizadas son: Arenosoles, Cambisoles, Fluviosoles, Gleysoles, Leptosol líticos, Histosoles, Phaeozems, Luvisoles, Regosoles, Planosoles, Leptosoles úmbricos, Leptosoles rendzicos, Solonchaks, Vertisoles y Xerosoles.

En este trabajo se usará la propuesta desarrollada en *The European Soil Database (ESDB)* para caracterizar los parámetros hidrológicos que servirán de input al modelo. Las ventajas de emplear este producto respecto a otras bases de datos tradicionales se sustenta en la posibilidad de acceder a él desde cualquier plataforma o sistema tanto para la edición como para la consulta de los datos disponibles.

2.2.5. Geología e Hidrogeología.

Para un adecuado uso del territorio es fundamental disponer de una información correcta sobre las características del terreno y su constitución geológica. Esta información se puede evaluar a través de un mapa geológico, que es una representación, simbolizada y proyectada sobre una base topográfica, de los diferentes tipos de rocas y materiales no consolidados que afloran en la superficie terrestre, expresando su geometría, su disposición en el espacio y su edad. Para llevarlos a cabo se obtienen datos directamente sobre el terreno y se elaboran estudios para la caracterización litológica, petrológica, bioestratigráfica y estructural de los materiales. Además de incorporar datos obtenidos utilizando técnicas geofísicas y de teledetección. Los mapas geológicos llevan bases de datos geológicos asociadas, a las cuales alimentan y de las que se nutren. Por ese motivo, tienen que mantenerse actualizadas.

A nivel global se cuenta con un mapa geológico a escala 1:1.000.000 presentado en el Congreso Internacional de Geología en Oslo, Noruega en el 2008. En esta iniciativa, llamada ONEGEOLOGY¹⁸, han participado 83 países y/o Servicios Geológicos de diversos países, además está apoyada por la UNESCO. Su objetivo es la creación de datos de mapas digitales geológicos dinámicos para el mundo. Entre sus ventajas se destaca su acceso libre y gratis a través de Internet¹⁹, creando así un punto de encuentro para el acceso a información geológica, además dispone de información general, en casi todo el mundo (cubre el 70% del globo, aunque tiene importantes huecos en la India y África), lo cual ayuda a tener una visión general de la geología de otros países. Por otro lado ayuda a comprender mejor cómo se comportan las aguas subterráneas, una fuente fundamental para adaptarse a la sequía y al cambio climático.

En la península ibérica la información geológica e hidrogeológica se encuentra expuesta, después de un proceso de mapeo y exploración geológica de larga duración, por el Instituto Geológico y Minero de España- IGME. A nivel nacional existe un mapa de Unidades Hidrogeológicas que cubre todo el

¹⁸ <http://www.onegeology.org/>

¹⁹ <http://portal.onegeology.org/>

territorio, el Mapa Geológico y Tectónico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias, mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos y un mapa del Cuaternario español. La información geológica se encuentra a escalas 1:200.000, 1:50.000 y 1:25.000, se puede obtener en formato de grid y trabajarlos mediante las aplicaciones creadas por *ESRI*.

2.2.6. Permeabilidad.

El mapa de permeabilidad tiene un carácter interpretativo ya que las unidades que se representan están basadas en una evaluación previa del comportamiento medio y general de determinados materiales rocosos. Ofrece por tanto una visión global de la permeabilidad del territorio, que permite estimar su vulnerabilidad frente a determinadas actividades. Dependiendo del material del que esté compuesto un suelo y de su función conductora, infiltrará mayor cantidad de agua (material más permeable) o menor cantidad de agua (material más impermeable). Por tanto este dato, al igual que el de los usos del suelo, es muy útil a la hora de determinar las pérdidas de precipitación y la cantidad de agua que escurrirá por la superficie de las cuencas en análisis.

Investigadores de la Universidad de British Columbia, han producido el primer mapa del mundo que delinea la facilidad del flujo a través de las rocas del planeta, superficies porosas y sedimentos. Los mapas y datos, podrían ayudar a mejorar la gestión de los recursos hídricos, la modelización del clima y eventualmente dar lugar a nuevos conocimientos sobre una serie de procesos geológicos. Utilizando recientes datos de litología (tipo de roca) en todo el mundo, los resultados de los investigadores de la Universidad de Hamburgo y la Universidad de Utrecht en los Países Bajos, hicieron posible mapear la permeabilidad de todo el mundo a profundidades de aproximadamente 100 metros. Los mapas típicos de permeabilidad sólo han tratado con la parte superior del suelo de uno a dos metros, y a través de áreas más pequeñas. Los mapas del estudio incluyen un mapa mundial con una resolución de 13000 km² y un mapa mucho más detallado de América del Norte a una resolución de 75 km² (Gleeson et al., 2011)

La Figura 2.9 muestra a escala regional, la permeabilidad en el mundo y Norte América, atribuyendo mapas litológicos con la permeabilidad de la media geométrica de cada hidrolitología.

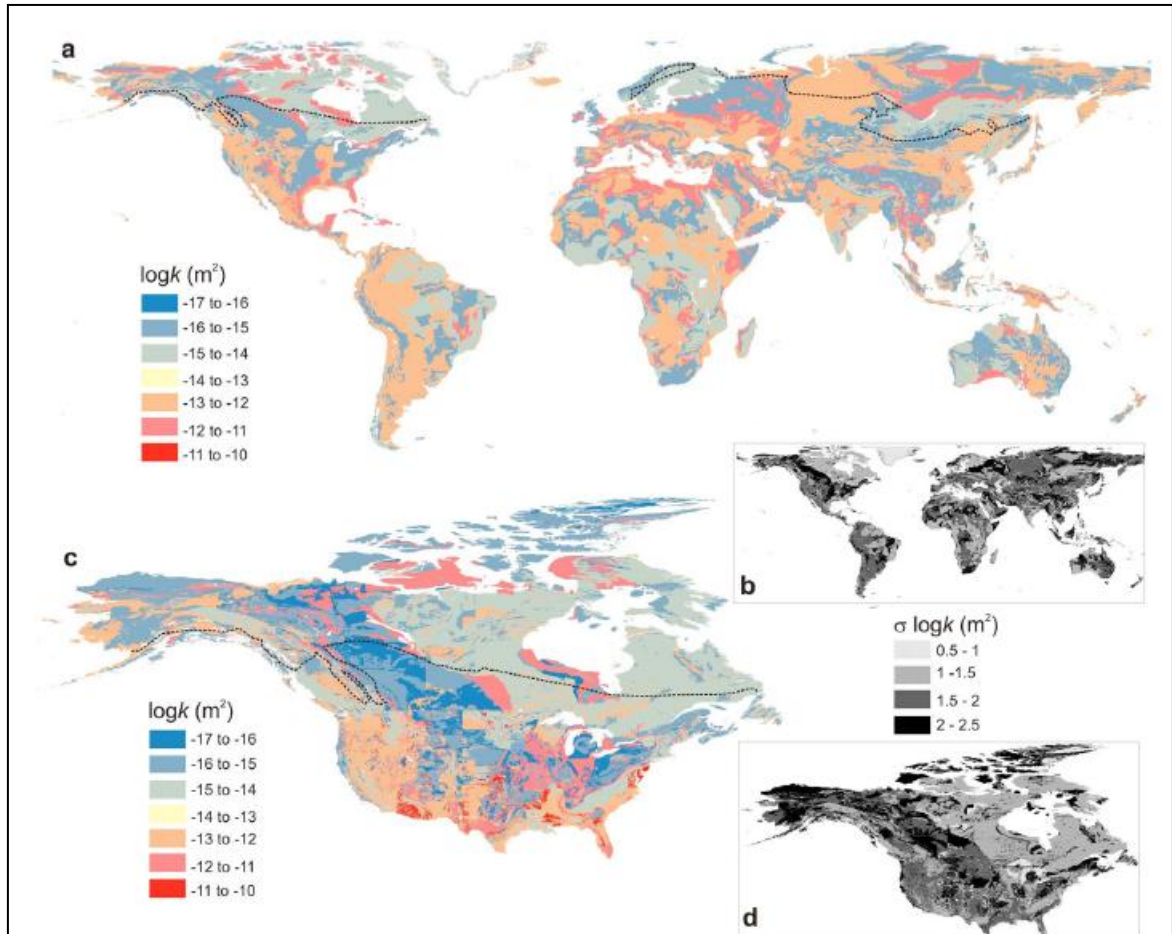


Figura 2.9 Cartografía de la permeabilidad logarítmica ($\log K m^2$) y la incertidumbre sobre el mundo y América del Norte. Distribución mundial de la permeabilidad (a) y la incertidumbre (b). Distribución de la permeabilidad (c) y la incertidumbre (d) sobre América del Norte (excluido México). (Gleeson et al., 2011).

Entre los resultados obtenidos concluyeron que el mapa global (Figura 3a) tiene una distribución espacial grosera, mientras que el mapa de permeabilidad para América del Norte es más refinado y de mayor resolución (Figura 3c). Ambos mapas de permeabilidad tienen incertidumbres inherentes representadas por la desviación estándar de la hidrolitología individual. La desviación estándar del mapa global (Figura 3b) es generalmente más grande que la del mapa de América del Norte (Figura 3d), ya que los diferentes

tamaños de granos de las categorías de sedimentos no consolidados y siliclásticos no se distinguen en el mapa mundial.

En España existe el Mapa de Permeabilidades continuo y en formato digital a escala 1:200.000, está realizado a partir del Mapa Litoestratigráfico de España continuo a escala 1:200.000 y representa los niveles litoestratigráficos cartografiados agrupados por valores similares de permeabilidad (Figura 2.10).

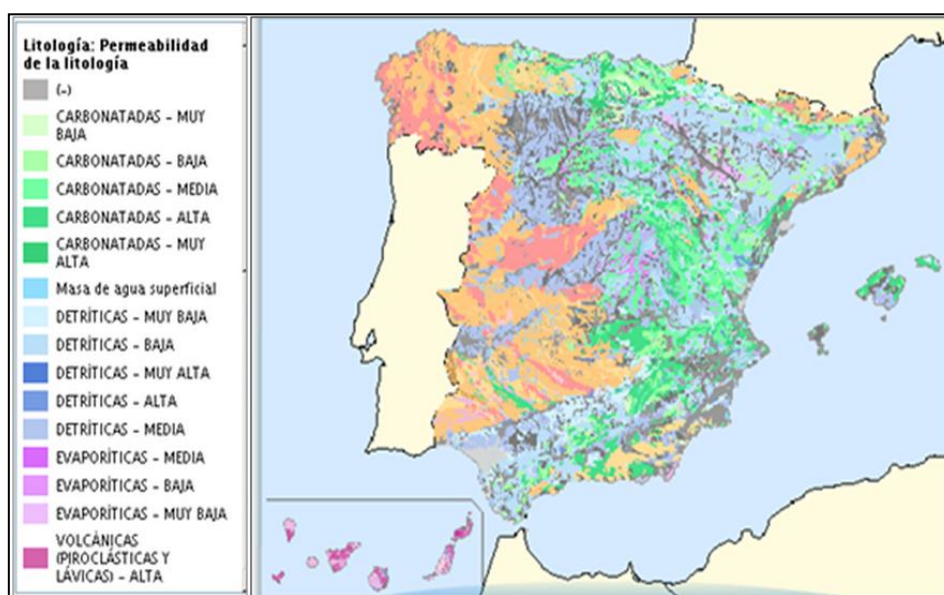


Figura 2.10 Mapa de Permeabilidad a escala 1:200.000. (Fuente: Página Web “Instituto Geológico y Minero de España -IGME”).

Se establecieron 5 tipos de permeabilidad: Muy alta, Alta, Media, Baja y Muy baja. Las distintas litologías se asociaron en 7 grandes grupos (carbonatadas, detríticas, detríticas del cuaternario, volcánicas, metadetríticas, ígneas y evaporíticas), dando lugar a una clasificación por tipos de acuíferos, establecidos según los procesos de formación de cada permeabilidad (Figura 2.11).

LITOLOGÍAS		PERMEABILIDAD					
		MUY ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MUY BAJA	
CON AGUAS UTILIZABLES	FISURABLES Y SOLUBLES	CARBONATADAS	C-MA	C-A	C-M	C-B	C-MB
		DETRÍTICAS (Cuaternario)	Q-MA	Q-A	Q-M	Q-B	Q-MB
	POROSAS	DETRÍTICAS	D-MA	D-A	D-M	D-B	D-MB
		VOLCÁNICAS (Piroclásticas y lávicas)	V-MA	V-A	V-M	V-B	V-MB
		META-DETRÍTICAS	M-MA	M-A	M-M	M-B	M-MB
	POROSAS POR METEORIZACIÓN	ÍGNEAS	I-MA	I-A	I-M	I-B	I-MB
SOLUBLES		EVAPORÍTICAS	E-MA	E-A	E-M	E-B	E-MB
	CON AGUAS NO UTILIZABLES O DE MUY BAJA CALIDAD						

Figura 2.11 Leyenda Mapa de Permeabilidad (Fuente: Página Web “Instituto Geológico y Minero de España -IGME”).

En términos generales existe un conjunto importante de organizaciones las cuales se dedican a la generación de cartografía relacionada con geología, suelos, cultivos, aprovechamiento agrícola, caracterización agroclimática, etc., en iguales y diferentes zonas a nivel mundial, lo que indica que esta variará según quien la desarrolle, bajo distintos modos de representación y escalas, por consiguiente se debe tener algo de reserva al momento de escoger la fuente de información.

2.3. Modelación hidrológica con información estándar.

En literatura existen múltiples herramientas para la realización de análisis hidrológicos. Algunos de ellos requieren información distribuida y otros no; algunos se pueden obtener de manera fácil y de forma gratuita mediante internet y otros, sin embargo, son softwares comerciales de pago.

Aquí se presentan algunos de estos modelos con una breve descripción y sus aplicaciones en diferentes escenarios de estudio.

2.3.1. HSPF (Hydrologic Simulation Program Fortran)²⁰.

El modelo HSPF fue desarrollado a inicios de los años 60 con el nombre de Stanford Watershed Model, SWM. A medida que fue avanzando el tiempo se incorporó procesos de calidad, desarrollos en versión Fortran, hasta llegar en los años 90 con una versión interactiva en entorno Windows con una interface más amigable.

HSPF requiere de series de datos de lluvia y otros datos meteorológicos para simular hidrogramas y polutogramas (registran el desarrollo de la concentración de contaminantes a lo largo del tiempo) en los cauces. Además simula la componente de humedad del suelo, escorrentía superficial, flujo base en los cauces y respuesta en caudal ante la lluvia, profundidad de nieve y contenido de agua, escorrentía procedente del deshielo, evapotranspiración, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), niveles de pH, etc. La simulación realizada por el programa puede ser en una o varias zonas de la cuenca, permeables o impermeables, descargando a uno o varios afluentes/ríos o presas. El intervalo de tiempo puede ir desde 1 min hasta de un día, dividido en intervalos iguales. Puede simularse cualquier período desde pocos minutos hasta cientos de años.

Son muchas las aplicaciones del HSPF alrededor del mundo, desde las áreas más extensas 160000 km² en la bahía de Chesapeake, mayor estuario de los Estados Unidos hasta la aplicación más pequeña 2.60 Km², cerca de Watkinsville, Georgia (Bicknell et al., 1997).

En la bahía de Chesapeake afectada por los escasos datos meteorológicos que figuran en la herramienta de soporte a la decisión EPA's BASINS²¹, se evaluó la mejora en la predicción de caudales usando 1/8th-grado de

²⁰ <http://water.usgs.gov/software/HSPF/>

²¹ BASINS (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources): Sistema multipropósito de análisis ambiental que integra un SIG, datos nacionales de las cuencas hidrográficas, estado del arte de la valoración ambiental y herramientas de modelación, perteneciente a la EPA.

precipitación por hora y evapotranspiración estimada a partir de la base de datos de alta resolución espacial y temporal *North American Land Data Assimilation System (NLDAS)*²² creada por la NASA definida como se ilustra en la Figura 2.12 y se describe en la Tabla 2.2, en siete cuencas hidrográficas : Mahantango (432 km²), Deer Creek (247 km²), Anacostia (194 km²), Patuxent (241 km²), Calfpasture (366 km²), Little River (277 km²) y Pocomoke (144 km²), (Lee et al., 2010).

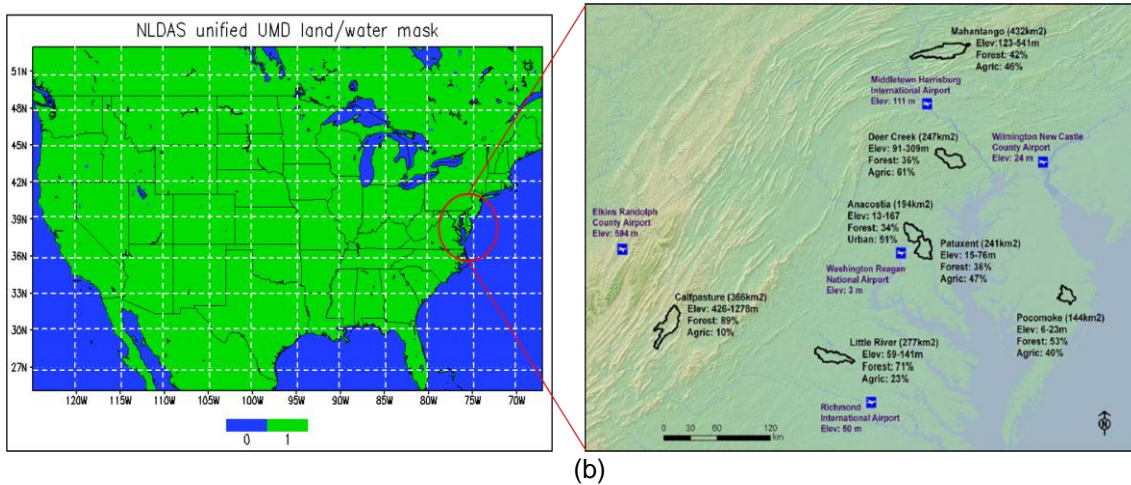


Figura 2.12 Mascara unificada NLDAS (a); Localización geográfica de las cuencas de estudio utilizados en el modelo HSPF. (Fuente: Página Web “Land Data Assimilation System-LDAS” (a); Lee et al., 2010 (b).

La rejilla NLDAS se define como sigue:

Tabla 2.2 Definición grid NLDAS (Valores de longitud/latitud representa el centro de 1/8th-grado de la cuadrícula).

Posición	Columna	Fila	Longitud	Latitud
Inferior izquierda	1	1	-124.9375	25.0625
Inferior derecha	464	1	-67.0625	25.0625
Superior izquierda	464	224	-67.0625	52.9375
Superior derecha	1	224	-124.9375	52.9375

Los resultados demuestran mejoras constantes de las predicciones de caudales diarios en cinco de las siete cuencas hidrográficas. Los coeficientes

²² <http://ldas.gsfc.nasa.gov/nldas/>

de correlación obtenidos fueron mayores de 0.8, coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) mayor que 0.6 y el error en el balance hídrico era inferior al 5%. El análisis también mostró que las mejoras de caudales fueron aportadas principalmente por los datos de precipitación y que la mejora del uso de los datos de evapotranspiración no fue significativa, en parte debido a las limitaciones de la configuración *BASINS-HSPF* actuales. Sin embargo los datos de evapotranspiración mejoraron la predicción del flujo base. Finalmente el uso de la base de datos de la NLDAS demuestra el potencial de la misma para mejorar los pronósticos de caudales, por lo tanto ayuda a la evaluación de calidad del agua.

Por último este modelo se puede descargar gratuitamente a través de internet.

2.3.2. SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación – Aportación).

El Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación – Aportación (SIMPA) fue desarrollado para gestionar y analizar la información temporal y espacial procedente de la Base de Datos del CEDEX y donde se integran las aplicaciones hidrológicas desarrolladas en este Organismo para simular diferentes procesos del ciclo hidrológico relacionados con los recursos hídricos, las crecidas o la calidad de las aguas.

SIMPA comenzó a desarrollarse a mediados de los años 90 por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y diversas universidades colaboradoras durante la elaboración del Libro Blanco del Agua en España. Un papel preferente desde el principio del proyecto fueron las investigaciones sobre simulación hidrológica distribuida de aportaciones. Se han ido incorporando nuevos módulos, bien desarrollados en el propio CEDEX o bien obtenidos mediante convenios de colaboración con el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

Utiliza el Sistema de Información Geográfica GRASS para gestionar los datos espaciales y como soporte de los modelos distribuidos implementados.

La programación de los diferentes módulos se ha realizado en los lenguajes Fortran y C, utilizando también los comandos del sistema operativo y los comandos del GIS GRASS en programas shell scripts. Los menús implementados en SIMPA permiten acceder a: visualización de capas de información, análisis de series temporales, análisis paramétricos y geomorfológicos, simulaciones de recursos, simulaciones de avenidas y simulaciones de calidad.

Trabaja con celdas de 1 km², lo que supone que en cada paso de tiempo se simulan los distintos componentes del ciclo hidrológico en más de 500.000 celdas.

Como todo modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico, SIMPA establece balances hídricos para los distintos procesos que tienen lugar desde el inicio de la lluvia hasta que el agua escurre superficial o subterráneamente, además de estimar aportaciones a partir de datos meteorológicos (precipitación, evapotranspiración potencial, etc.) y de las características físicas del territorio (vegetación, hidrogeología, edafología, etc. Álvarez, 2004). A continuación en la Figura 2.13 se presenta un esquema general del modelo distribuido SIMPA.

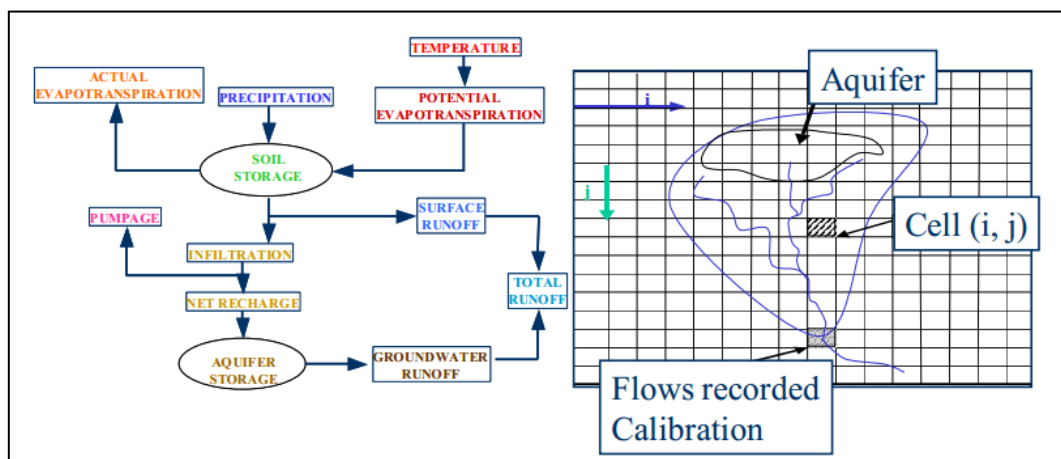


Figura 2.13 Variables y flujos simulados en el modelo distribuido SIMPA. (Álvarez, 2004)

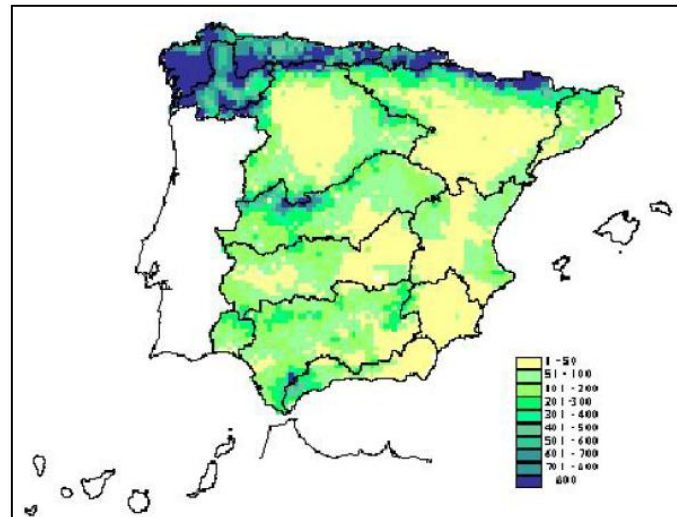
Este modelo fue empleado por el Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX (1998) plasmado en su “Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de riesgo en determinadas regiones de

España” para el Ministerio del Medio Ambiente (MIMAN 1998), usando tres grupos de escenarios climáticos para la simulación hidrológica:

- i. Análisis de sensibilidad a variaciones climáticas:
 - a. Escenario 1: Aumento de 1°C en la temperatura media anual
 - b. Escenario 2: Disminución en un 5% de la precipitación media anual y aumento de 1°C en la temperatura.
- ii. Escenarios climáticos generales. Provenientes de modelos de circulación general, modelo UKMO.
- iii. Escenarios climáticos Regionales. Resultados del modelo de clima regional PROMES, considerando aumentos en la temperatura y manteniendo la precipitación igual que la actual.

La metodología empleada consistió en la discretización de todo el territorio español en celdas de dimensiones 10 km x 10 km y en cada una de ellas se aplicó el modelo hidrológico distribuido.

Se obtuvieron mapas de escorrentías para cada escenario (Figura 2.14) y variaciones porcentuales de la escorrentía respecto a la situación actual.



(a)



(b)

Figura 2.14 Mapa de aportación total media anual en mm (PROMES) (a); Disminución porcentual de la escorrentía (b) (Iglesias et al., 2005).

Del análisis realizado se extrajeron las siguientes conclusiones:

- i. En España se originarían descensos medios en la aportación total media anual que oscilan entre un 5% para el escenario 1 hasta el 14% para el escenario 2 y el escenario regional 3.
- ii. El sureste peninsular y la España insular son las áreas donde se presentara mayor impacto sobre los recursos hídricos.
 - a. Escenario 1: Disminución de la aportación total, variaría entre un 2% (Galicia Costa y Norte I) y 11% (Guadiana y Segura).
 - b. Escenario 2: Aumento de la aportación total, variaría entre un 9% (Galicia Costa y Norte I) y más de un 25% (Canarias).
- iii. Para el escenario regional la aportación total variaría entre un 5% en Galicia Costa, y un 22% en Guadiana II, con valores similares al escenario 2, salvo en la cuenca del Júcar 15% frente a 20% para el escenario 2, y las C.I. Cataluña 20% frente a 15% para el escenario 2.

Finalmente en el citado estudio concluyen que los resultados no deben ser tomados en ningún modo como definitivos, y están siempre sujetos a las hipótesis de partida adoptados (Iglesias et al.,2005) .

Posteriormente Fernández (2002), desarrolla un procedimiento metodológico para evaluar el impacto sobre los recursos en España mediante una modelización hidrológica distribuida a escala mensual, usando campos climáticos originados por modelos regionales de cambio climático, aplicándolo en 19 cuencas distribuidas a través del territorio español.

2.3.3. HYPE (HYdrological Predictions for the Environment).

El modelo hidrológico HYPE inició su desarrollo en el 2003, es mantenido y operado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco²³ (SMHI, por sus siglas en inglés). Es un modelo conceptual semi-distribuido diseñado para evaluar a pequeña y gran escala los recursos hídricos y la calidad del agua. El modelo simula escorrentía superficial, derretimiento de la nieve, erosión, flujos a través de macroporos, salida de aguas subterráneas de las capas individuales del suelo, ciclos de nutrientes en el suelo, transporte/transformación en ríos y lagos, etc.

La aplicación del modelo hidrológico HYPE se realiza con inputs derivados de bases de datos mundiales que se utilizan como sustitutos y/o complementos de base de datos locales, en regiones donde existen datos dispersos y limitados.

El modelo HYPE fue aplicado a la Cuenca del Plata (3.2 millones de km²) en América del Sur y a Europa (7 millones de Km²), mediante la herramienta WHIST (World Hydrological Input Set-up Tool), la cual se compone de una serie de programas Fortran y Java con la función específica de organizar los datos de entrada para la aplicación del modelo hidrológico (Strömqvist et al., 2009). El conjunto de datos globales que usaron en el marco WHIST se listan en la Tabla 2.3.

²³ <http://www.smhi.se/en>

Tabla 2.3 Base de datos globales para la predicción hidrológica a gran escala. (Strömqvist et al., 2009).

Conjunto de datos Globales	Base de datos	Resolución	Fuente
Topografía	Hydro1k	1 km	USGeological Survey (USGS)
Cobertura de Suelo	ECOCLIMAP	Aprox. 1 km	Champeaux (2005)
Tipo de Suelo	Soil map of the world	10 km	UN Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
Precipitación y Temperatura			
1957-2002	ERA-40	1°	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
1989-2007	ERA-interim	0.75°	ECMWF
Descarga de agua	3700 estaciones de aforo	Diario/Mensual	Global Runoff Data Centre (GRDC), Koblenz (GRDC, 2008)

Para la aplicación en Europa los datos fueron complementados con información adicional de la Base de Datos de Suelo de Europa (ESDB) y adicionalmente la serie de datos ERA-40 fue reemplazada por ERAMESAN (Jansson et al., 2007): grid de datos meteorológicos que cubre la mayor parte de Europa con una resolución espacial de 0.1°. Los cálculos los realizaron en 8500 subcuencas y la validación se llevo a cabo en la cuenca de drenaje del Mar Báltico (Norte de Europa), con 20 estaciones independientes en comparación con 32 estaciones utilizadas en la calibración de esta región. La evaluación se llevo a cabo con valores diarios de caudal.

En la cuenca del Plata existe una gran variación hidroclimática, los cálculos se realizaron en 4000 subcuencas aproximadamente, la calibración y validación fue realizada en 11 y 10 sitios respectivamente. Muchas de las estaciones de aforo fueron excluidas del estudio por tener periodos cortos de tiempo y otras que se encontraban fuera del área definida por HYDRO1K, este fue el caso para el 31% de las estaciones. En este caso el análisis se realizo con valores mensuales de caudales.

En ambas áreas de estudio el período de simulación varió de 1980 a 2000, y los criterios de calibración utilizados fueron el error de volumen relativo (VE) y la eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE, Nash & Sutcliffe, 1970). Además realizaron un análisis de sensibilidad para investigar que tanto podría variar la

salida del modelo ante los cambios en los principales conjuntos de datos entrada.

Según los resultados obtenidos pudieron concluir, en el caso de las mayorías de las cuencas calibradas en Europa, que el modelo tiene un poder predictivo en la variación de caudales, ya que el NSE fue mayor a cero, $NSE=0.49$, y la mediana de todos los sitios igual a 0.27. Por su parte el error en el volumen en las estaciones de aforo indican que el modelo funciona bien para muchos sitios de monitoreo, mostrando errores de volumen menores al 10%. Sin embargo, hay diferencias muy grandes en los resultados entre regiones que, en cierta medida, puede atribuirse a los conjuntos de datos de entrada y también a los procesos no todavía incluidos en el modelo, como son la extracción de agua y sistemas de riego.

Para el caso del Plata obtuvieron grandes errores en el volumen simulado en la zona occidental de la cuenca, esto se atribuyó a la señal fuerte de precipitación que arrojan los datos ERA-40 en la Región Andina, que sobreestimó la escorrentía en esa área. En términos generales el error en volumen fue menor del 25%, mediana de 2.5 para los sitios calibrados y $NSE=0.11$.

Finalmente el estudio de sensibilidad mostró que para el Norte de Europa, los resultados del modelo son más sensibles cuando se fuerzan los datos meteorológicos y la cobertura de suelo.

3. MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICO TETIS

El modelo de simulación hidrológica TETIS desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia pertenece a la clase de modelos distribuidos y su objetivo es obtener de la mejor forma posible la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados.

Es un modelo complejo que representa la cuenca como una malla de celdas interconectadas por la configuración topográfica, derivada de un Modelo de Elevación Digital, de manera que cada celda tiene asociado un valor para cada parámetro necesario para una correcta caracterización.

El modelo incorpora adecuadamente la variabilidad espacial de los ciclos hidrológicos y su base conceptual, por eso necesita de partida datos observados para poder permitir su calibración, cumple con el principio de parsimonia, esto es, ante funcionamientos similares, se selecciona el modelo con menos número de parámetros y con ecuaciones lo más simples posibles, representando todos los procesos significativos (Bussi, 2010).

A continuación se realiza una descripción más detallada del modelo TETIS, presentando su estructura, los procesos internos, parámetros del modelo, las condiciones iniciales y finalmente el algoritmo de calibración automática (SCE-UA), basada en las siguientes referencias: Francés et al. (1996), Vélez (2001), Francés et al. (2007), Montoya (2008), Vélez y Francés (2009), Bussi (2010).

3.1. Formulación del modelo.

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.

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 seis

niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí (más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda), como puede observarse en la Figura 3.1.

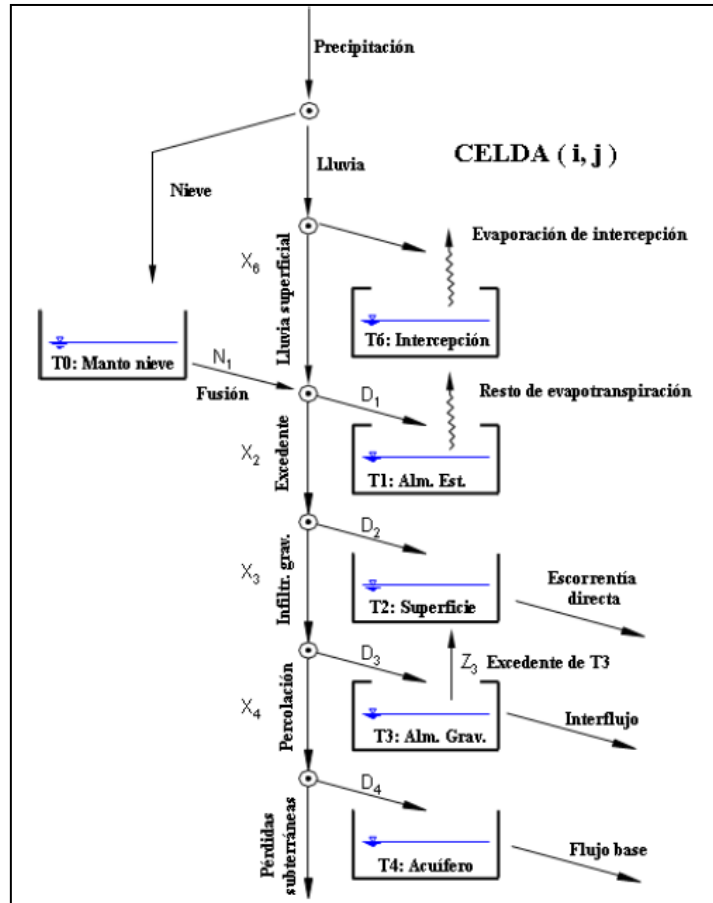


Figura 3.1 Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

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 uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

Los flujos verticales de agua entre cada tanque representan los procesos hidrológicos de: lluvia (X_1) y nieve (X_0), correspondientes a la precipitación total, lluvia directa (X_6), excedente (X_2), infiltración (X_3), percolación (X_4) y pérdidas subterráneas (X_5). Los horizontales representan respectivamente: escorrentía directa (Y_2), interflujo (Y_3) y flujo base (Y_4). También existen otros dos flujos de

salida: evapotranspiración desde el conjunto suelo-vegetación (Y_1) y evaporación de agua interceptada (Y_6).

El tanque T_0 corresponde al almacenamiento de altura equivalente de agua (SWE), producto de las nevadas. La precipitación es considerada como nieve y es añadida a T_0 , si la temperatura del aire es inferior a una temperatura crítica (T_c), según DeWalle y Rango (2008), es muy común usar entre 0°C y 2°C . La nieve y la temperatura son interpoladas en cada celda, utilizando el método IDW (Francés, Vélez et al., 2007).

Para el proceso de fusión, TETIS utiliza el método índice de temperatura o grado-día (Martinec, 1960), básicamente porque no se dispone de información completa de radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva (Vélez, 2003).

El caudal proveniente de la fusión de nieve se divide entre el tanque de almacenamiento estático y el excedente. El T_0 solo se utilizó en la modelación de la cuenca del río Ésera debido al porcentaje significativo de nieve que existe en ésta.

El T_1 representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración (Y_1), por lo tanto no hace parte de la escorrentía (Vélez, 2001). Este almacenamiento tiene en cuenta la detención del agua en charcos y el agua que retiene el suelo por las fuerzas capilares. El almacenamiento por intercepción ocurre en T_6 , cuya salida es la evaporación de intercepción (Y_6).

Se supone que el T_1 tiene una capacidad máxima igual a la suma de la capacidad de almacenamiento capilar en el suelo y el almacenamiento en depresiones en la superficie del suelo, en función de la rugosidad y la pendiente. Por su parte en el T_6 la capacidad depende de la cobertura de la superficie para almacenar agua, esta última relacionada con el tipo de vegetación.

El T_2 representa el agua que se encuentra en la superficie y es susceptible de moverse superficialmente por la ladera (escorrentía directa) o de infiltrarse al nivel inferior. La cantidad de agua que se deriva para escorrentía superficial

depende de la capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional y del estado del almacenamiento en la capa superior del suelo. La capacidad para dejar pasar el agua gravitacional se puede asociar a la conductividad hidráulica en la capa superior del suelo (en condiciones de saturación). En este caso nos referimos a una conductividad en la que se tiene en cuenta tanto la macroporosidad como la microporosidad.

Finalmente la cantidad de agua que sigue por el conducto distribuidor X_3 , se relaciona con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior K_s (conductividad hidráulica saturada del suelo asociada a la cobertura), con un intervalo de tiempo y el flujo excedente del almacenamiento estático X_2 .

El T_3 se puede entender como el agua gravitacional almacenada en el suelo. Parte de este volumen pasa al nivel inferior por percolación y otra parte produce el flujo subsuperficial. El tanque representa el flujo subsuperficial que, a través de la capa superior del suelo, se desarrolla inicialmente sobre una delgada capa que fluye lateralmente hacia abajo en la ladera y se va concentrando en pequeñas depresiones, grietas o pequeños conductos por el interior de esta capa, hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

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 puede estar estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo.

La cantidad de agua que puede continuar hacia la zona inferior del suelo durante el intervalo de tiempo determinado 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 .

Por último, el T_4 representa al acuífero. Las salidas corresponden a las pérdidas subterráneas (para la cuenca modelada) y el flujo base de los cauces.

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 la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada, del mismo modo que en los almacenamientos anteriores.

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 , que dependiendo del análisis realizado tras varias simulaciones, se pueden considerar nulas y/o mínimas, o que se derive hacia el almacenamiento subterráneo T_4 .

La conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones (Figura 3.2). Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MED, hasta alcanzar la red de drenaje constituida por cárcavas y cauces.

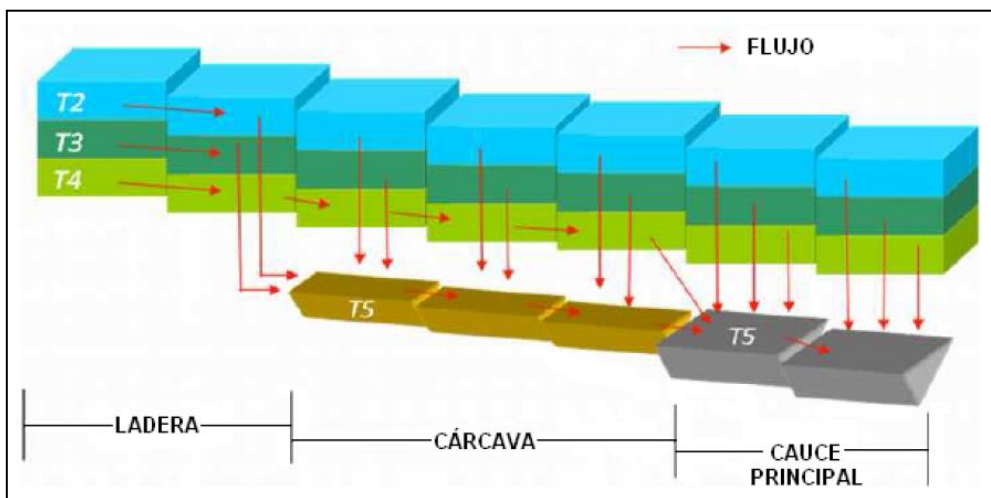


Figura 3.2 Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS

Las salidas posibles de agua para cada celda se da por los tres componentes principales de la escorrentía: la escorrentía directa (producida por escorrentía hortoniana y escorrentía por saturación), el interflujo y el flujo base. Cada proceso involucrado se simula con ecuaciones simples y con pocos parámetros para estimar (Francés et al., 1996; Vélez, 2001).

El sistema presenta tres elementos diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie: las laderas, las cárcavas y los cauces. Además, estas áreas coinciden con la presencia de una incisión permanente en el terreno en donde se concentran los flujos, ya sea en cárcavas o en cauces Montoya (2008). En la Figura 3.3 se observa un esquema de la relación entre las áreas umbrales para las diferentes componentes de la escorrentía y el área de captación.

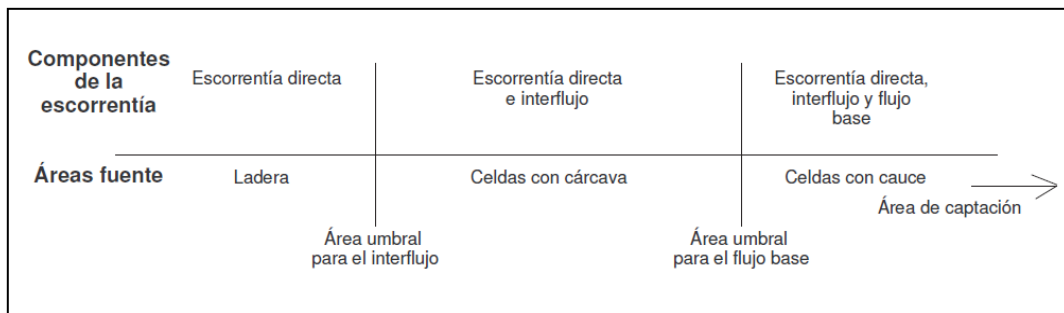


Figura 3.3 Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía (Montoya, 2008).

La formulación hidráulica para la propagación en la red de cauces utilizada en el modelo TETIS se basa en una aproximación de la onda cinemática, asumiendo un lecho fijo en cada celda en el cual se aplica una ecuación de balance. Dicha formulación se denomina Onda Cinemática Geomorfológica (Vélez, 2001). La forma de la sección de flujo en cada uno de los elementos que conforman la red de drenaje puede obtenerse a partir de relaciones de geometría hidráulica previa validación de sus parámetros. Las relaciones han sido propuestas por Leopold y Maddock (1953), que relacionan las dimensiones de la sección de flujo: profundidad, ancho, velocidad y caudal por medio de ecuaciones de tipo potencial. Las ecuaciones son las siguientes:

- i. Área de captación Λ y caudal a sección llena Q_b :

$$\Lambda = k \cdot Q_b^\varphi \quad (3.1)$$

- ii. Ancho de la sección transversal a sección llena W_b y caudal a sección llena Q_b :

$$W_b = a_1 \cdot Q_b^{\alpha_1} \quad (3.2)$$

- iii. Ancho de la sección transversal W y caudal que pasa por la sección Q :

$$W = Q^{\alpha_2} \quad (3.3)$$

iv. Diámetro del sedimento d , pendiente S y profundidad del flujo h :

$$d = c_d \cdot (Q \cdot h)^\theta \quad (3.4)$$

v. Coeficiente de rugosidad n y diámetro del sedimento d :

$$n = c_n \cdot d^\xi \quad (3.5)$$

A partir de un número pequeños de secciones transversales medidas en campo usando regresiones lineales se pueden estimar los coeficientes y exponentes de las ecuaciones anteriores. En la Tabla 3.1 se muestran los intervalos de variación habituales en cauces naturales según literatura.

Tabla 3.1 Intervalos de variación de los coeficientes y exponentes geomorfológicos (F. Francés et al, 2007).

Parámetro	Intervalo de variación
k	0.5 – 0.75
φ	0.65 – 0.8
a_1	0.5 – 5.75
α_1	0.34 – 0.55
α_2	0.05 – 0.2
c_d	0.5 – 50
θ	0.5 – 2.75
c_n	0.025 – 0.07
ξ	0.125 – 0.18

3.2. Parámetros del modelo.

Los parámetros de un modelo describen las características del sistema a modelar, en función de la estructura y conceptualización del mismo. Dado que el modelo se basa sobre una malla regular de celdas de un Modelo de Elevación Digital, es necesario caracterizar cada celda de la malla con un valor homogéneo del parámetro.

El enfoque más sencillo es asumir que un valor medido en un punto al interior de la celda es válido para toda su superficie. En la realidad, un área del tamaño de una celda (que puede variar desde algunos metros hasta un

kilómetro) se comporta, desde el punto de vista hidrológico, de manera muy distinta a un punto; por ejemplo, en el caso de un parámetro de conductividad del suelo, la medición de laboratorio se efectúa sobre un bloque de suelo del tamaño de algunos centímetros, y el valor medido no suele ser representativo de la celda entera (Grayson y Blöschl, 2001).

Otra posibilidad es ajustar el parámetro para que los resultados del modelo se acerquen a los valores observados de la variable de output (es decir, calibrar el valor del parámetro), el parámetro pierde su significado físico, y representa algo similar a un valor medio en la celda; este parámetro se llama parámetro efectivo (Figura 3.4). El enfoque del parámetro efectivo intenta superar los problemas conceptuales asociados al valor puntual de un parámetro. Los parámetros efectivos son valores que reproducen el comportamiento de un área finita o de un volumen finito. No pueden entonces ser medidos puntualmente, y no necesitan estar relacionados con mediciones puntuales (Bussi, 2010).

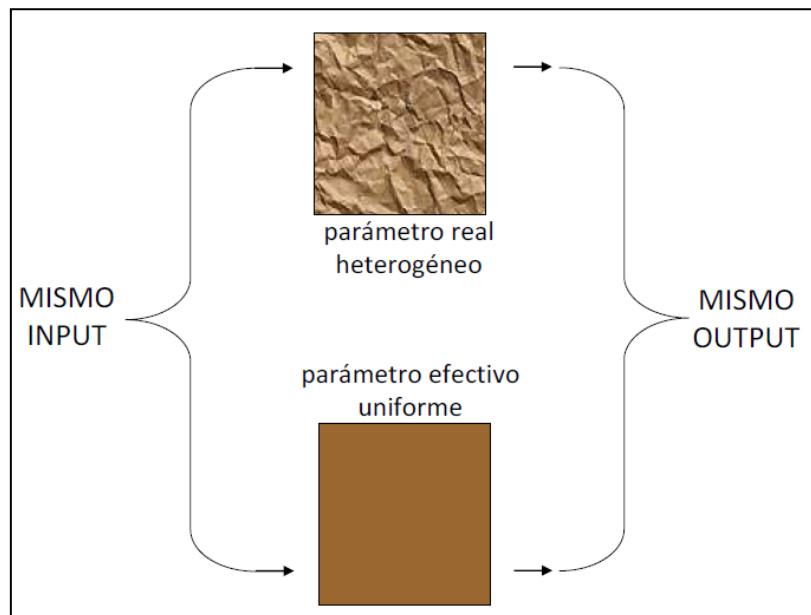


Figura 3.4 Descripción esquemática de un parámetro efectivo para un flujo a través de un medio poroso heterogéneo (Grayson y Blöschl, 2001).

El modelo TETIS utiliza una estructura de parámetros efectivos separada en dos partes (Francés et al., 2007):

- i. Las características físicas del medio natural, estimadas según la información disponible y medida a una escala espacial definida.
- ii. Los factores correctores.

Las características físicas expresan el valor medido o estimado del parámetro para cada celda de la cuenca, describen la variabilidad espacial del mismo y poseen significado físico. Los factores correctores absorben los errores provenientes de todas las fuentes citadas antes. Es razonable suponer que el factor corrector sea común para todas las zonas de la cuenca, o al menos para un número limitado de regiones dentro de la cuenca. Además, siendo todas las celdas del mismo tamaño, los efectos de escala son iguales para toda la cuenca. La ecuación que describe la estructura separada del parámetro efectivo es la siguiente:

$$\theta_{i,j}^* \approx R_i \theta_{i,j} \quad j=1,\dots,n \quad i=1,\dots,p \quad (3.6)$$

donde $\theta_{i,j}^*$ es el parámetro efectivo i -enésimo para la celda j , R_i es el factor corrector del parámetro i , común para todas las celdas, $\theta_{i,j}$ es el parámetro estimado para la celda j , n es el número total de celdas y p es el número total de parámetros por celda.

La ventaja principal de esta estructura del parámetro es que, en la fase de calibración, se reduce notablemente el número de variables que deben ser ajustadas, siendo sólo necesario calibrar los p factores correctores, en vez de np valores (número de parámetros por número de celdas).

De este modo, el modelo hidrológico TETIS podrá ser calibrado a través del ajuste de nueve factores correctores (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Factores correctores y respectivos parámetros ajustados.

Factor corrector (R_i)	Parámetro ($\theta_{i,j}^*$)	Símbolo
FC_1	Capacidad de almacenamiento hídrico	H_u
FC_2	Índice de cobertura de vegetación	λ
FC_3	Capacidad de infiltración	K_s

FC_4	Velocidad del flujo superficial	u
FC_5	Capacidad de percolación	K_p
FC_6	Velocidad del interflujo	K_{ss}
FC_7	Capacidad de percolación profunda	K_{ps}
FC_8	Velocidad del flujo base	K_{sa}
FC_9	Velocidad del flujo en canal	v

3.3. Condiciones Iniciales.

Para simular un evento es necesario definir las condiciones iniciales de las variables de estado. En el modelo TETIS, las variables de estado son las siguientes:

- i. El nivel de agua equivalente en el manto de nieve, tanque $H0$.
- ii. El nivel de almacenamiento por intercepción, tanque $H6$.
- iii. El nivel del almacenamiento estático, tanque $H1$.
- iv. El nivel del almacenamiento superficial, tanque $H2$.
- v. El nivel del almacenamiento gravitatorio, tanque $H3$.
- vi. El nivel del almacenamiento subterráneo, tanque $H4$.
- vii. El caudal en los canales, tanque $H5$.

Una posibilidad para considerar niveles distribuidos en el espacio (un valor para cada celda) es definir los valores iniciales de humedad como los producidos por una simulación anterior, por ejemplo de un periodo de calentamiento. El programa permite utilizar valores de humedad inicial definidos por el usuario o valores obtenidos de una simulación anterior.

El nivel del almacenamiento estático presenta una capacidad máxima, definida por la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo H_u . El modelo necesita como dato de entrada la condición inicial del tanque de almacenamiento estático representada por el porcentaje del total de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo.

Con respecto a los niveles del almacenamiento superficial, gravitatorio y subterráneo, el valor inicial de entrada se da como la altura de agua en

milímetros de cada tanque. Para el caudal en los canales, se define el valor inicial como el porcentaje del caudal a sección llena.

3.4. Algoritmo de optimización SCE-UA para la calibración automática de parámetros del modelo TETIS.

El algoritmo automático de optimización “Shuffled Complex Evolution - University of Arizona”, SCE-UA (Duan et al., 1992; Duan et al., 1994; Sorooshian et al., 1993; Yapo et al., 1998) acoplado al modelo TETIS (Vélez, 2003; Vélez and Francés, 2004; Francés et al, 2007), es reconocido por ser uno de los más robustos y eficientes para la calibración de modelos lluvia-escorrentía.

El objetivo de este método de optimización es buscar el conjunto óptimo de parámetros que minimicen una función objetivo, para luego comparar alguna variable observada contra la simulada por el modelo, usualmente el caudal de salida. La función objetivo se selecciona con algún criterio estadístico en función de las características que se quieran preservar en la serie simulada.

En el modelo TETIS algunas de las funciones objetivos disponibles que se usaran para la calibración automática de los parámetros y para la validación del modelo son el error cuadrático medio, RMSE, y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), NSE. Las expresiones para estos índices estadísticos son:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n}} \quad (3.7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (3.8)$$

Donde: \hat{Q}_i es el caudal simulado, Q_i el caudal observado, \bar{Q}_i el valor medio de los caudales observados y n el número de observaciones.

El RMSE es el criterio empleado durante el proceso de calibración, mientras que el índice NSE es más comúnmente usado para la evaluación de modelos,



dado que involucra estandarización de la varianza residual y su valor esperado no depende de la longitud del registro o de la magnitud de la variable (Kachroo y Natale, 1992, citado en Kothyari y Singh, 1999).

Más información sobre la aplicación del algoritmo SCE-UA a la calibración automática del modelo TETIS se puede encontrar en Vélez et al. (2002a), Vélez et al. (2002b), Vélez et al. (2005), Vélez y Francés (2005), Francés et al. (2007) y Vélez y Francés (2009).

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se presenta una descripción de las principales características físicas de las cuencas en estudio, específicamente las que determinan su comportamiento hidrológico y geomorfológico. A partir de esta caracterización se estimarán los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo.

4.1. Cuenca hidrológica del río Ésera.

4.1.1. Situación y características principales.

La cuenca del río Ésera está situada en el Pirineo Central español, con una superficie total del 1532 km², una longitud de unos 98 km y una anchura media de 16 km aproximadamente (Figura 4.1). El nacimiento real del río Ésera tiene lugar entre el Forao de Aigualluts y el Hospital de Benasque, a partir de pequeñas surgencias y la conjunción de vario arroyos procedentes de la vertiente derecha. Sin embargo, su cuenca topográfica se extiende varios kilómetros aguas arriba, incorporando gran parte de la vertiente septentrional del macizo de la Maladeta.

Drena uno de los sectores mas escarpados de todo el Pirineo, con altitudes que frecuentemente superan los 3000 m en los macizos de Maladeta, Posets, Eriste y Perdiguero, con fuertes pendientes, afiladas crestas y gran energía de relieve. A la altura de Villanova, con una cuenca de drenaje de 323 km², la proporción de superficie situada por encima de 2500 m representa el 26.4% del total, que pasa a ser un 65.6% en el caso de la superficie situada por encima de 2000 m. En Graus, donde el río Ésera drena 889.5 km², esos valores alcanzar el 9.5 y el 27.6% respectivamente.

Las elevadas altitudes se mantienen de forma persistente hasta bien entrado el curso medio, donde el río Ésera drena las laderas de Cotiella y del Turbón. Finalmente, después de recibir el caudal del río Isábena (425.9 km²), desemboca en el río Cinca, aguas abajo del embalse de Barasona.

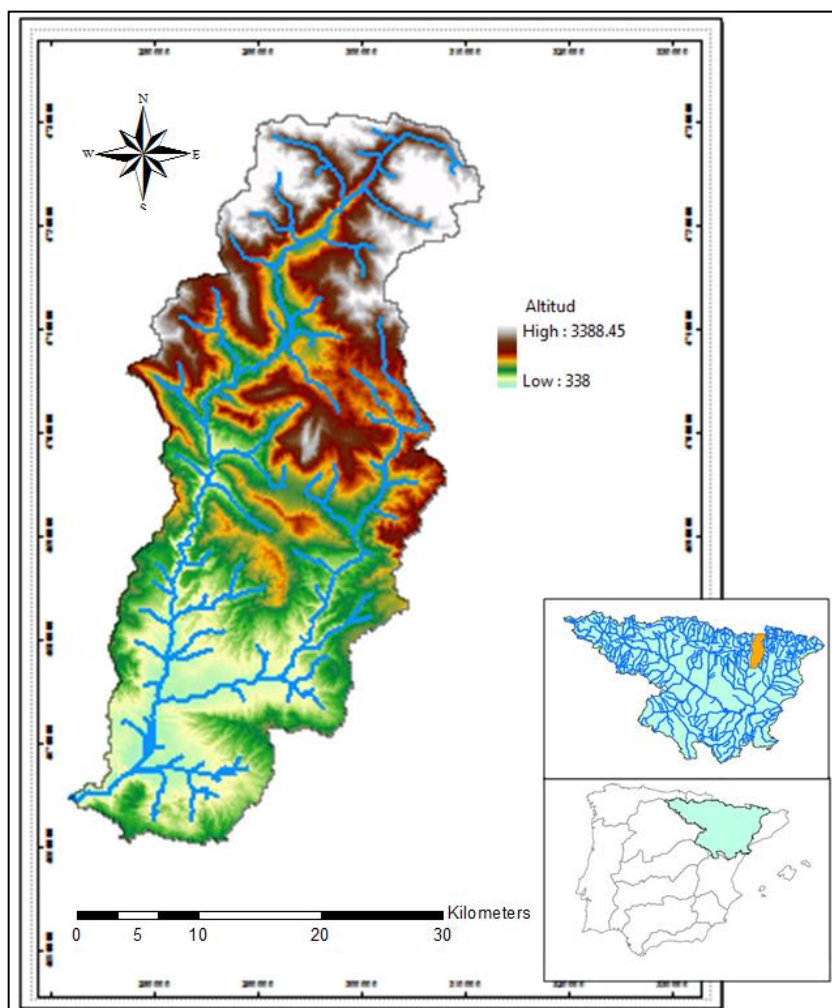


Figura 4.1 Localización de la cuenca del río Ésera.

4.1.2. Clima.

La zona donde está situada la cuenca del río Ésera se encuentra en la confluencia de dos grandes dominios climáticos: el clima oceánico y el mediterráneo. El clima oceánico predomina en el Pirineo Occidental, mientras que el Mediterráneo, con su variante continental, se sitúa sobre el Pirineo Central. La cuenca del Ésera se encuentra dentro de este último dominio, siendo la característica principal un gran contraste térmico, con un invierno seco y con gran insolación (entre los periodos de nevadas), y un verano más tormentoso, con gran numero de lluvias de carácter torrencial.

Desde el punto de vista climático, el área de estudio puede subdividirse en dos grandes mitades, una al sur del macizo del Turbón, más cálida y seca, de

clima mediterráneo seco, y otra al norte, típicamente pirenaica, con las características climáticas propias de la vertiente sur de los Pirineos (Verdú, 2003). Con la influencia latitudinal fruto de la variabilidad del relieve, el clima para de tener carácter submediterráneo, en la parte sur, a tener rasgos subalpinos a partir de 1600 m.s.n.m.

Uno de los problemas a la hora de caracterizar el clima de esta área es la escasez de estaciones meteorológicas, que, aparte de no tener una distribución homogénea en el espacio, tienen registros deficientes (periodos de tiempo cortos y/o con faltas de datos).

4.1.3. Geología.

La cuenca del río Ésera se encuentra estructuralmente situada en el dominio geológico de los Pirineos. De norte a sur se diferencian las siguientes unidades litológico-estructurales y su distribución se ilustra en la Figura 4.2:

Pirineo Axial. Macizo paleozoico levantado por el movimiento alpino. Es la zona más montañosa con granitos en las zonas más elevadas y pizarras, esquistos y calizas, en áreas de menor elevación. Corresponde a las máximas elevaciones del Pirineo: Aneto, Maladeta, Posets. Esta zona estuvo afectada por el glaciario cuaternario que ha marcado su morfología actual: valles “colgados” en los laterales de los principales, circos glaciares, ibones.

Sierras Interiores. Constituidas por calizas mesozoicas y terciarias en dirección oeste-este. En esta zona aparecen relieves importantes ligados a materiales calizos y que constituyen las sierras de Cotiella, Turbón.

Depresión Media. Paralela a la anterior unidad y constituida por materiales blandos alternando las margas y areniscas, correspondientes al denominado sinclinal de Tresp. El núcleo de esta formación está ocupado por bancos de molasas, resistentes a la erosión, sierras de Formigales, Perarrúa, Campanué.

Sierras Exteriores Prepirenaicas. Corresponden con calizas del Cretácico superior y Eoceno. La incisión de la red fluvial en estas zonas calcáreas ha

creado profundos cañones y gargantas muy característicos como el Congosto de Olvena en el Ésera.

Como aspecto geomorfológico más relevante de la cuenca destaca la presencia de glaciares, heleros y un gran número de ibones formados en la época glacial y que se sitúan en el sector más septentrional ligados a las zonas graníticas.

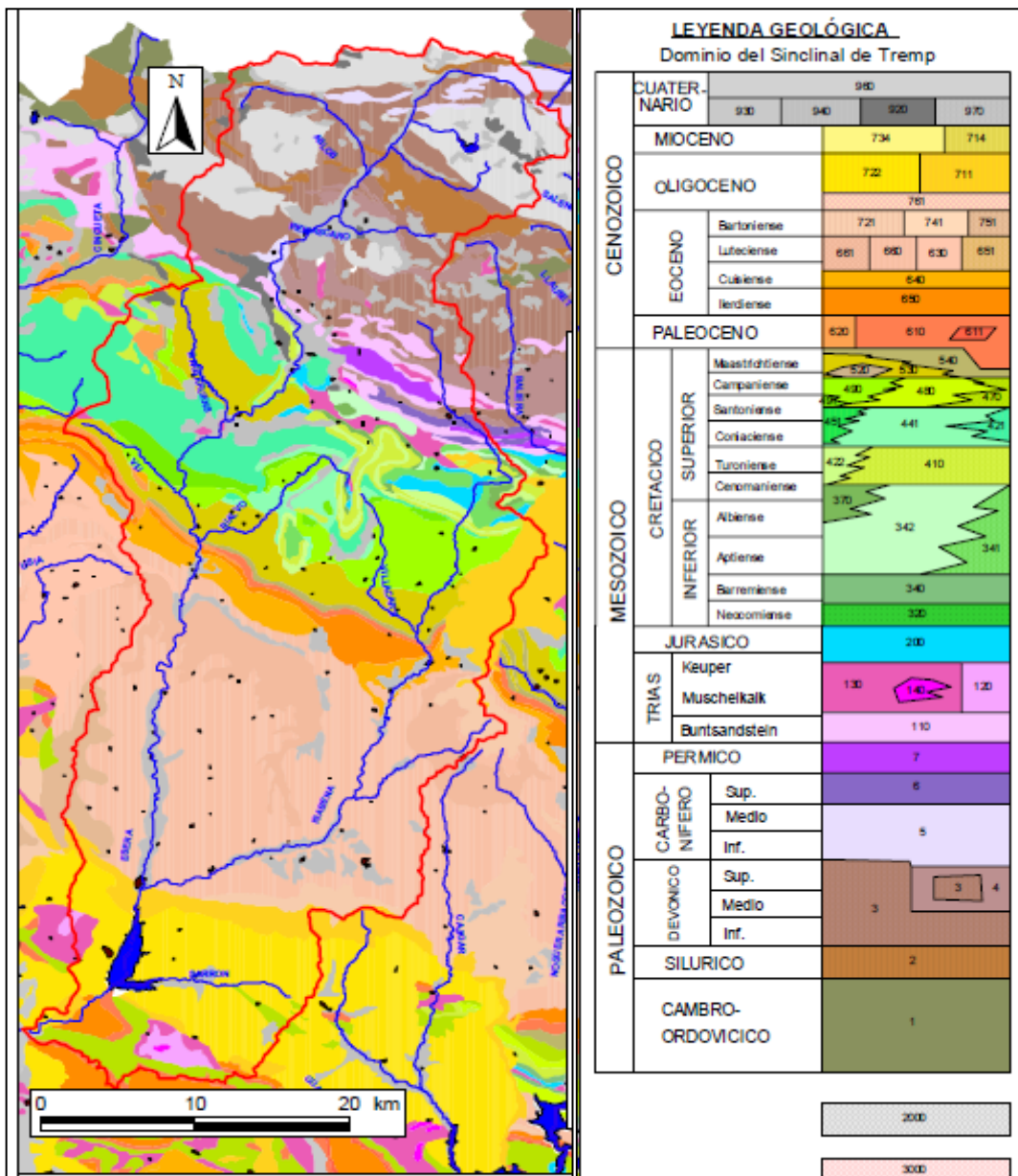


Figura 4.2 Esquema geológico estructural de la cuenca del río Ésera. (Fuente: CHE, 2007).

4.1.4. Hidrogeología.

Los principales acuíferos de la cuenca del río Ésera son las calizas del Devónico, Jurásico, Cretácico y Eoceno, y los materiales detríticos de recubrimientos aluviales en el sinclinal de Graus.

Para la aplicación de la Directiva Marco del Agua en la cuenca del Ebro se han definido 105 masas de agua subterránea. Dentro de la cuenca del río Ésera se encuentran 4 masas, cuyas principales características se presentan a continuación:

Masa de agua subterránea Macizo Axial Pirenaico (34), con un predominio de materiales graníticos poco permeables.

Masa de agua subterránea Cotiella-Turbón (37), formada por las calizas del Cretácico, Devónico y Jurásico inferior. La recarga se produce por infiltración directa del agua de lluvia en los materiales permeables y las descargas se producen hacia los cauces de los ríos Ésera e Isábena por distintas surgencias.

Masa de agua subterránea Sinclinal de Graus (40). El acuífero principal son las calizas del Cretácico y del Eoceno que drenan la zona de Graus al río Ésera.

Masa de agua subterránea Litera Alta (41). El principal acuífero son las dolomías y calizas del Cretácico y Eoceno. La recarga se produce por infiltración del agua de lluvia y las descargas se producen hacia el cauce del río Ésera en el tramo aguas abajo de la confluencia con el Isábena. Fundamentalmente drena hacia al río Ésera a través del Congosto de Olvena.

4.1.5. Suelos.

Los suelos de la cuenca del Ésera están desarrollados sobre calcilutitas, rocas calizas, areniscas y conglomerados eocenos, dispuestos en estratos buzados al sur-sudoeste.

En términos generales, los suelos se caracterizan por su escaso desarrollo (Martínez-Casasnovas y Poch, 1998). Esto se traduce en la ausencia de horizontes de diagnósticos. En su mayoría, se clasifican como Xerorthents (Soil Survey Staff, 1996). Corresponden a Xerorthents líticos en las laderas con calizas a poca profundidad (perfiles A-R), y Xerorthents típicos cuando están desarrollados sobre calcilutitas o coluvios de ladera en posiciones más estables (perfiles A-C o A-Bw-C). Suelen ser suelos básicos, de textura franco-limosa y, excepcionalmente, franco-arenosa en los desarrollados sobre coluvios de areniscas. En general, son poco profundos y con contenidos de materia orgánica bajos (<2%). Ambas características aumentan en las zonas de umbría, que son las que gozan de un recubrimiento vegetal mayor. Son suelos bien drenados, con capacidades limitadas de retención de agua y con estabilidad estructural moderada y/o baja.

4.1.6. Usos del suelo.

La cuenca del río Ésera presenta una ocupación del terreno dominada por la superficie de bosque (34 % de toda la cuenca), matorral (27%), prados y pastizales (12%), secano (10%), y el (17%) restante es un conjunto de usos que incluye: ramblas con poca o sin vegetación, embalses, tejido urbano continuo y discontinuo, turberas, entre otros (Figura 4.3).

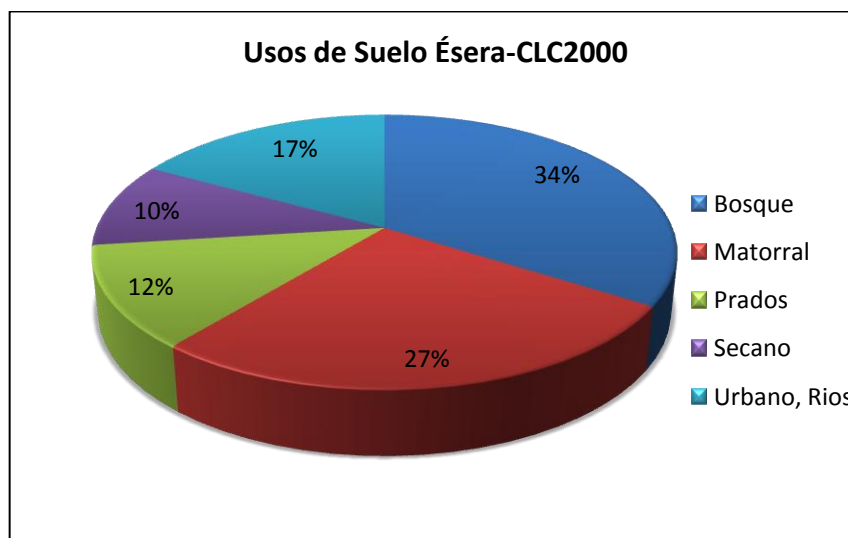


Figura 4.3 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.

En la cabecera se localizan afloramientos rocosos y canchales con gran número de ibones y heleros, con bosques de coníferas y matorrales boscosos de frondosas y coníferas. Los prados y praderas se localizan siguiendo el curso del río, allí donde las laderas por su pendiente y substrato lo permiten. Los prados y praderas, en la parte intermedia del río Ésera, se unen a los de la cabecera del río Isábena. En la parte baja de la cuenca, y en especial en la del río Isábena, se ubican las tierras de labor de secano, principalmente, y de regadío con aguas superficiales (CHE, 2007).

4.2. Cuenca hidrológica del río Siurana.

4.2.1. Situación y características principales.

La cuenca del río Siurana tiene una extensión aproximada de 615 km², su río es el último afluente de entidad del río Ebro por su margen izquierda (Figura 4.4). Aunque recibe los aportes de tres afluentes principales, los ríos Cortiella y Asma por su margen izquierda y el río Monstant por su margen derecha, sus caudales suelen ser escasos salvo en momentos de crecida.

El nacimiento de este río se encuentra en las cimas de la Cordillera Costero Catalanas, específicamente en la sierra de Prades, ya muy cercana al mar Mediterráneo cuya influencia marca en buena medida su régimen. El inicio del cauce se ubica a unos 1.000 m.s.n.m y su desembocadura en el río Ebro se produce tras 58,1 km de recorrido a unos 23 m.s.n.m aguas arriba de la localidad de Mora de Ebro. La red de drenaje de la cuenca del Siurana tiene tres embalses: Siurana, Margalef y Guiamets. Estos pueden liberar un caudal bastante constante, disminuyendo los periodos en que el río tradicionalmente se seca.

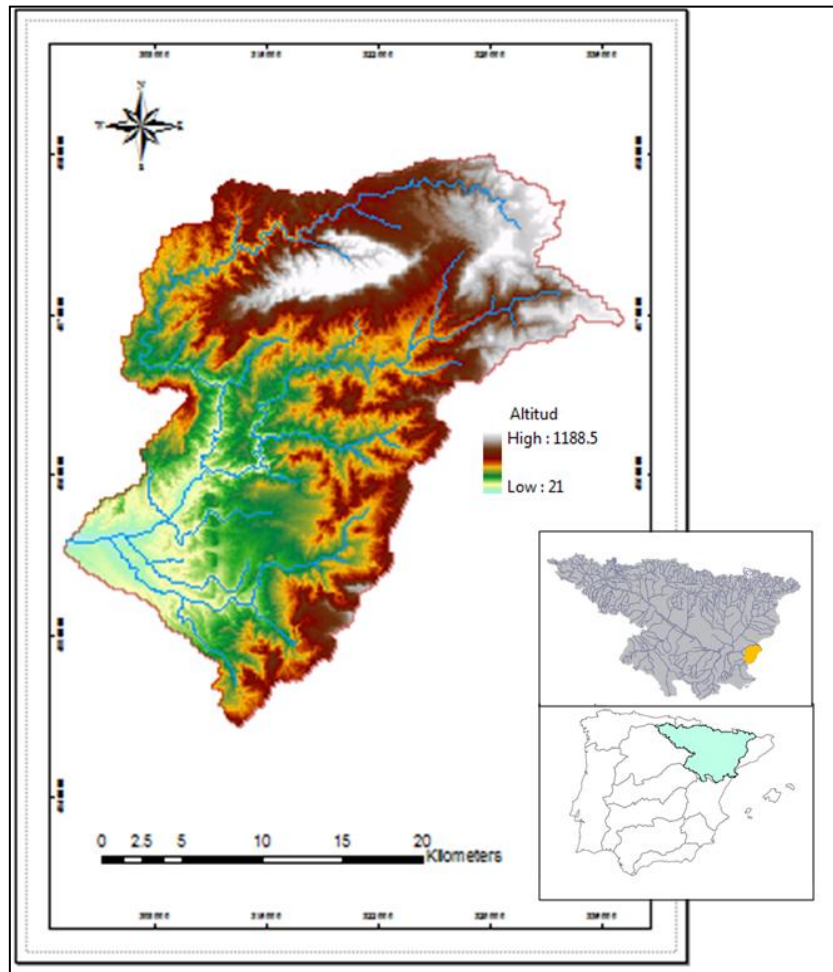


Figura 4.4 Localización de la cuenca del río Siurana.

4.2.2. Clima.

Los datos sobre la climatología de la región son escasos y fragmentarios. Existen series termométricas de algunos años aunque de periodos no coincidentes. Se identifica un clima mediterráneo de clara tendencia continental, con elevadas oscilaciones día-noche, fuerte calor en verano, temperaturas bajas en inviernos, con episodios frecuentes de inversión térmica, heladas que se inician en octubre-noviembre y se extienden hasta marzo-abril y una frecuencia de nieve de uno o dos días/año como promedio.

4.2.3. Geología.

En el plan hidrológico del eje del río Ebro desde el río Martín hasta su desembocadura (CHE, 2008), se analiza la zona de ubicación de la cuenca del

río Siurana. De su geología se menciona que forma parte de dos grandes dominios geológicos: el dominio de la Depresión del Ebro al norte y el dominio Maestrazgo-Catalánides al sur (Figura 4.5).

El dominio de la depresión del Ebro, está representado por conglomerados, areniscas, lutitas, arcillas y calizas. Por su parte el Dominio Maestrazgo-Catalánides se compone de materiales que abarcan desde el paleozoico del Priorato (pizarras, cuarcitas y areniscas) pasando por el Triásico (calizas y dolomías del Muschelkalk y arcillas y yesos del Keuper), el Jurásico de la sierra de Montsant, de los puertos de Beceite y Tortosa (calizas y dolomías) y el Cretácico (calizas y areniscas) de la sierra de Montsia.

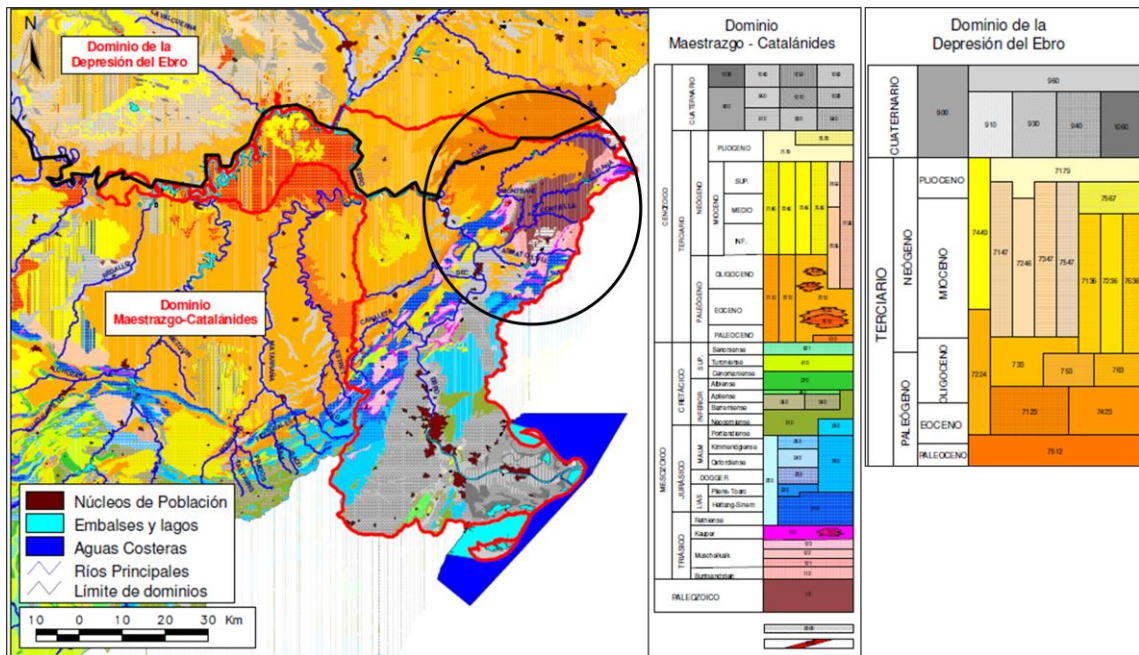


Figura 4.5 Esquema geológico estructural de la cuenca del río Siurana. (Fuente: CHE, 2008)

4.2.4. Hidrogeología.

El principal acuífero de la cuenca del río Siurana se localiza dentro del dominio del Maestrazgo –Catalánides cuya característica se describe a continuación:

Priorato (098), se localiza al noreste de la Fosa de Mora (Masa de agua subterránea, 097). Está constituido por los materiales paleozoicos del Priorato,

los plutones graníticos de Falset-Marsà y los mesozoicos de la sierra del Montsant al oeste y Mussara y Envestida al este. El principal acuífero corresponde a las calizas y dolomías del Muschelkalk inferior de 130 m de espesor, y con menor relevancia, a las calizas jurásicas en el extremo noreste de la masa de agua. Los materiales graníticos también forman un acuífero debido a los procesos de alteración y fisuración a los que han sido sometidos. Forman un acuífero de carácter libre, de permeabilidad de media a baja en función del grado de fracturación y cuya zona de alteración puede alcanzar los 25 m de espesor en los fondos de valle. Se recarga por infiltración de las precipitaciones y retornos de riego y descarga hacia la red fluvial, por bombeo o por transferencias subterráneas hacia otras cuencas. El acuífero de las calizas mesozoicas también es drenado por numerosos manantiales localizados en el contacto de las calizas con las series de baja permeabilidad del Muschelkalk.

4.2.5. Suelos.

En la cuenca del río Siurana se pueden distinguir principalmente tres tipos de suelos: *Suelos compactos*, de carácter calcáreo, donde predominan los materiales sedimentarios provenientes de la acción de la erosión y de la sedimentación de los ríos. También terrenos rojizos, con un alto contenido de arcilla, situados en la periferia de la denominación. *Suelos disgregados* formados por arenas graníticas que provienen de la erosión de masas de conglomerados. Se encuentran principalmente en la zona de Falset. Son terrenos con baja proporción de materia orgánica y poca capacidad de retención de agua. Finalmente *suelos pedregosos* formados por pizarras silíceas que en la zona se conocen como “llicorella”. Son terrenos pobres en materia orgánica. De la erosión de estas piedras también se identifican tierras rojas de arcillas más compactas.

4.2.6. Usos de suelo.

En términos generales la cuenca del Siurana tiene un porcentaje de agricultura del 35%, el área urbanizada no supera el 1%, mientras que la vegetación natural baja llega hasta un 64% (Figura 4.6).

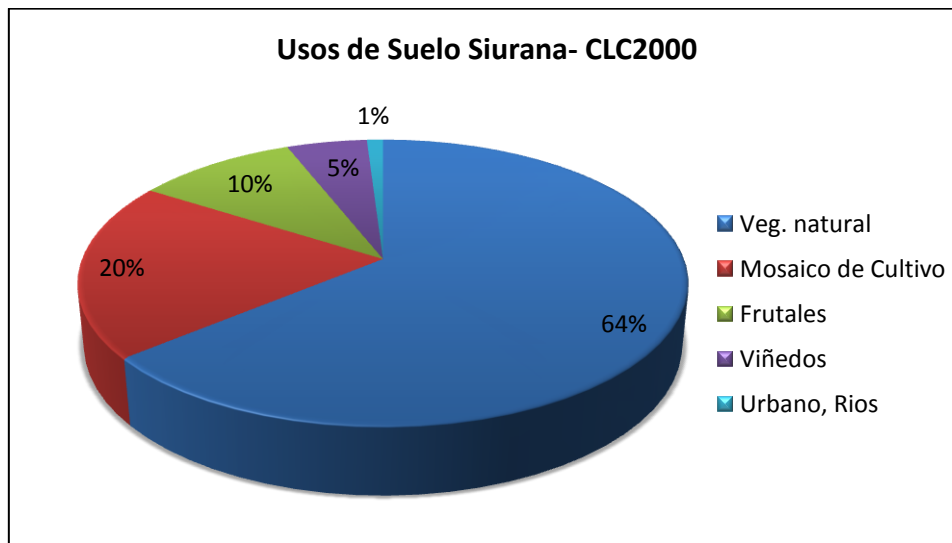


Figura 4.6 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.

En la cuenca del río Siurana se encuentra una alta diversidad de cubiertas naturales, que se reparten entre bosques de coníferas, matorrales, vegetación esclerófila y una destacada presencia de mosaico de cultivos y espacios naturales. La categoría agrícola más abundante en el Siurana es la de mosaico de cultivos, aproximadamente el 20%. Cabe resaltar el 10% de Frutales y 5% de Viñedos (CHE, 2008).

4.3. Cuenca hidrológica del río Júcar.

4.3.1. Situación y características principales.

La cuenca hidrológica del río Júcar se encuentra ubicada al este de España con un área de 21.430 km² e incluye parte de las provincias de Albacete, Cuenca y Valencia (Figura 4.7). El río Júcar tiene aproximadamente 500 km de longitud, nace a 1585 m.s.n.m, en la vertiente meridional del cerro de San Felipe en la Cordillera Ibérica y desemboca en Cullera (Valencia) en el Mar Mediterráneo.

Por la margen derecha sus principales afluentes son el río Belomontejo, canal de Maria Cristina, que forma parte del Trasvase Tajo-Segura, río Cantabán, río Escalona, río Sellent, río Albaida; y por la margen izquierda los ríos Huéscar, Gritos, Valdemembra, arroyo de Abengibre, río Cabriel, como

principal tributario; río Verde, que podría considerarse en su nacimiento como un efluente subterráneo del Júcar y Magro.

Los embalses más importantes en la cuenca del Júcar son: Alarcón, Contreras, Forata, La Toba, El Molinar, Cortes II, La Muela, El Naranjero, Tous, Escalona, Bellús y Embarcaderos.

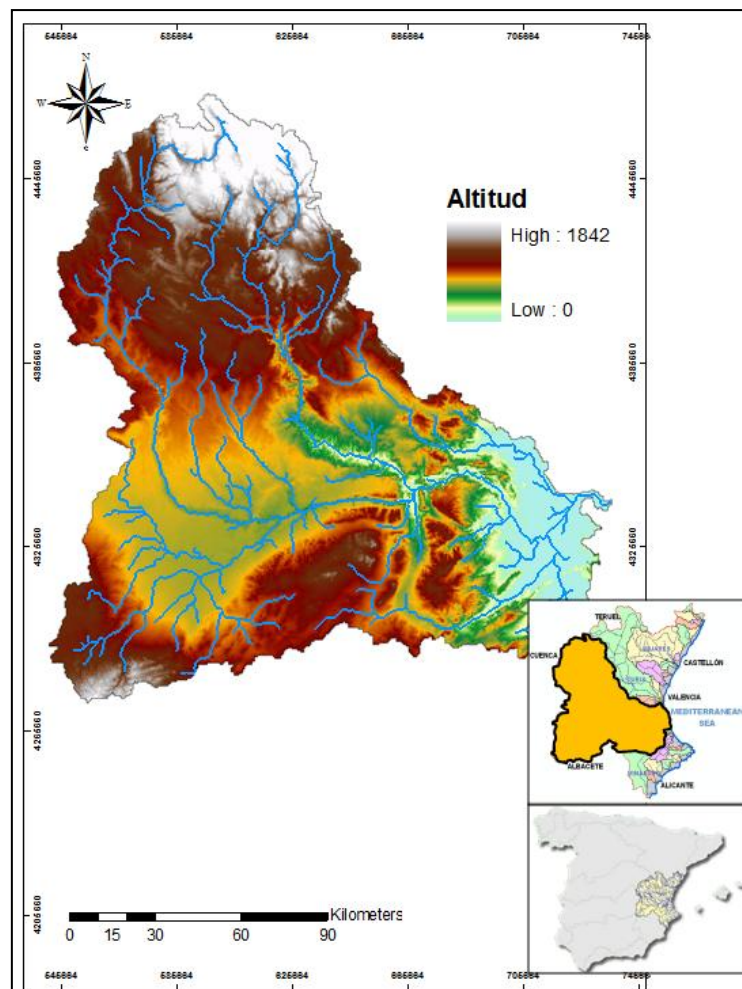


Figura 4.7 Localización de la cuenca del río Júcar.

4.3.2. Clima.

En el sistema Júcar se diferencia tres zonas geográficas climatológicamente distintas: las cuencas del Alto Júcar, incluyendo la Mancha Oriental, y el río Cabriel, hasta su confluencia en el embalse de Embarcaderos, de clima continental, que se acentúa o suaviza según predominen o no las condiciones del interior, las zonas de los ríos Magro, Albaida y Sellent, y la cuenca del río

Júcar entre los embalses de Embarcadores y Tous, con un clima intermedio entre los tipos continental y litoral, con importantes fluctuaciones tanto pluviométricas como termométricas en sentido Este-Oeste; por último, la zona localizada aguas abajo del embalse de Tous, caracterizada por un clima de tipo litoral mediterráneo.

4.3.3. Geología.

El ámbito territorial de la cuenca del río Júcar, está inscrito en un área de cobertura mesozoica fracturada durante la orogénesis alpina y tapizada de materiales neógenos.

El río Júcar en su recorrido hacia el sur atraviesa la Serranía de Cuenca, dominio calizo frecuentemente karstificado. Una vez dentro de la Mancha conquense, el recubrimiento pasa a ser detrítico terciario, finalizando en el embalse de Alarcón. A partir de este punto, el río sigue discurriendo por materiales cretáceos hasta llegar a la central de Picazo, donde estos se introducen bajo materiales terciarios para no aflorar más. Pasado Batanejos, el río gira hacia el oeste, discurriendo en su mayor parte por terrenos miocenos que, a partir de la central de Tranco del Lobo, presentan alternancias del Cretácico y Jurásico, hasta llegar al Trías. Este tramo finaliza en el embalse de Embarcadores, donde se produce la confluencia con el río Cabriel, y predominan los materiales poco permeables. A partir del embalse de Embarcadores, el río discurre por arcillas y dolomías del cretácico, cortando el nivel freático, pasando luego por el embalse de Tous. A partir de este se abre dando paso a la zona de la Plana de Valencia, para finalizar su recorrido en cercanías de Cullera.

En la Figura 4.8 se presentan las diferentes litologías existentes en la zona conforme a su naturaleza y su comportamiento hidrodinámico.

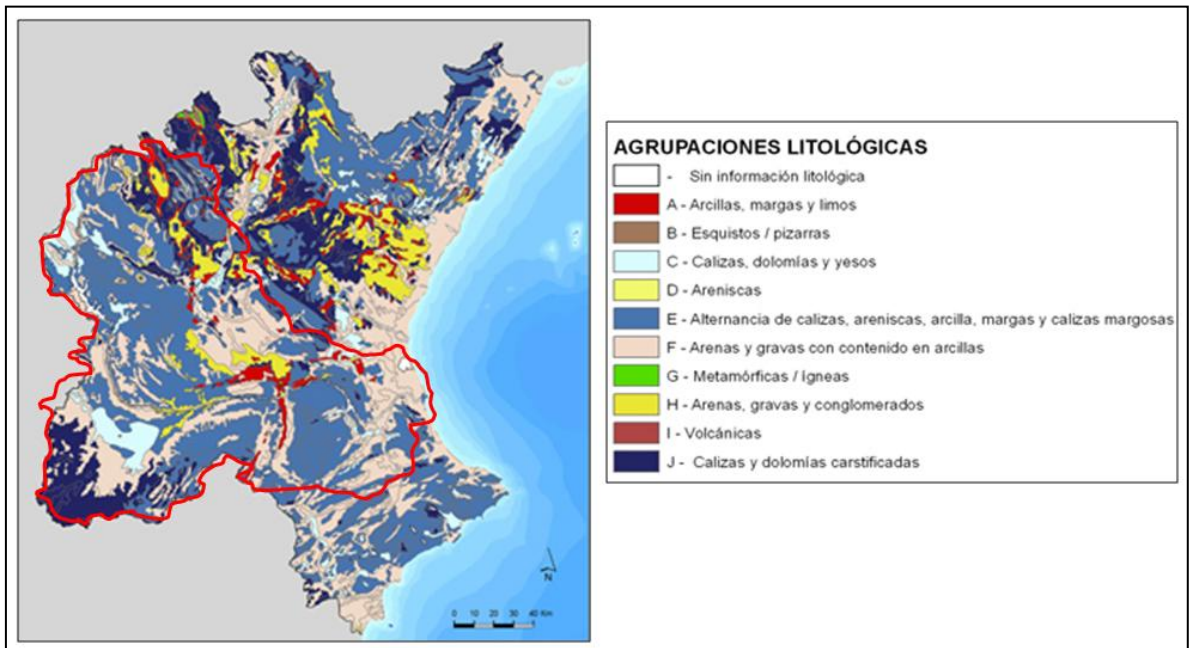


Figura 4.8 Agrupaciones litológicas cuenca del río Júcar. (Fuente: Pagina Web “Confederación Hidrográfica del Júcar”)

4.3.4. Hidrogeología.

Las unidades hidrogeológicas (U.GH.) que se adscriben al Sistema de Explotación Júcar son las siguientes:

Buñol-Cheste (023), cuenta con una superficie aflorante de alta permeabilidad de 450 km², de formaciones acuíferas de variada edad. La alimentación del sistema procede de la infiltración del agua de lluvia y aportes laterales de la U.GH. 18. La descarga se produce a través del cauce del Turia, transferencias a la U.GH. 25 (Plana de Valencia-Norte) y bombeos.

Plana de Valencia-Sur (026), superficie aflorante de alta permeabilidad de 500 km², se sitúa al sur de la Albufera. La formación acuífera está constituida por formaciones del Mioceno-Cuaternario. Las entradas de agua proceden de infiltración de lluvia, infiltración de excedentes de riego y transferencia de otras unidades, principalmente la 27 (Caroch norte) y 31 (Sierra de las Agujas).

Mancha Oriental (029), con una superficie aflorante de alta permeabilidad de 3300 km², se sitúa en el extremo oriental de la llanura manchega. La

formación acuífera está constituida por materiales de edades diferentes (Jurásico, Cretácico y Mioceno). Las entradas de agua proceden de la infiltración de lluvia y de los ríos Jardín, Quéjola, Lezuza y Cañada del Quintanar; La infiltración de excedentes de riego y transferencias de otras unidades. Las salidas se producen fundamentalmente por drenaje de los ríos Júcar y Cabriel y extracciones para la dotación de regadíos y bombeos urbanos e industriales.

Sierra de las Agujas (031), cuenta con una superficie aflorante de alta permeabilidad de 90 km², con formaciones acuíferas pertenecientes al Júrasic. La alimentación se da por infiltración de agua de lluvia y cauces. Las salidas se realizan por el drenaje uniforme a lo largo de todo su curso, a los ríos Jardín, Quéjola y Lezuza.

Sierra Grossa (032), con 430 km² de superficie aflorante de alta permeabilidad, con formaciones acuíferas pertenecientes al Cretácico-Mioceno. La alimentación es por infiltración de agua de lluvia. Las salidas naturales se realizan por el drenaje a los ríos Albaida, Jaraco y Cañoles, transferencias a la unidad 38 (Plana de Gandía-Denia), y manantiales dispersos por la unidad.

Yecla-Villena-Benejama (36), superficie aflorante de alta permeabilidad de 325 km², y formaciones acuíferas de variada edad, se sitúa entre las provincias de Valencia y Alicante. La alimentación del sistema procede de la infiltración del agua de lluvia e infiltraciones de excedentes de riego. La descarga se produce fundamentalmente por extracciones, concentradas en el campo de pozos del Alto Vinalopó.

4.3.5. Suelos.

El mayor porcentaje del territorio por donde discurre el río Júcar pertenece a suelos de dominio mediterráneo dentro de la división de suelos en zonales. Estos suelos son más complejos, bastantes problemáticos por su diversidad y porque no suelen parecer en el entorno natural, muy alterados por el hombre, que ha producido procesos de erosión. Uno de los tipos y predominante en la zona es el suelo rojo mediterráneo, que aparece en zonas calizas y silíceas, y

en su horizonte B presenta un horizonte de acumulación de arcillas, denominado argiluvación, dando lugar a ese tono rojizo, su perfil es A/B/C y son excelentes para cultivos.

Dentro de los suelos azonales se distinguen suelos Redziniformes, son suelos muy jóvenes, que se localizan en zonas de calizas, la característica más importante es que tienen alto contenido de humus, pH elevado y presentan tonalidades oscuras, se localizan en zonas de terrazas fluviales y en las llanuras de las huertas valencianas.

Es importante enfatizar que la cuenca del río Júcar es una de las zonas con mayor riesgo de erosión y desertización. La deforestación progresiva causada por un abusivo uso del suelo y los continuos incendios que inciden en la zona, acompañada por las lluvias torrenciales y las condiciones edáficas, han provocado unas grandes pérdidas de suelo que en muchos casos no son recuperables.

4.3.6. Usos de suelo.

En la cuenca del Río Júcar la superficie total cultivada asciende a 1.063.260 Has, de las cuales el 11% corresponde a regadíos, mientras que un 85% restante son de secano, bosques y zonas seminaturales. Del total de superficie en regadío, más de la mitad (58%) se encuentra en la provincia de Valencia, mientras que el 37% pertenecen a la provincia de Albacete y tan solo el 5% a Cuenca. Las grandes zonas de regadío corresponden a la cuenca baja del Júcar, con porcentaje aproximado al 80%. Los cítricos constituyen el cultivo predominante en la cuenca baja del Júcar, con un porcentaje del 61% de la superficie en regadío de la citada zona, mientras que los cultivos de tipo herbáceo ocupan un 31% de la superficie en regadío, siendo en su mayor parte arrozales. En la zona de la Mancha Oriental, si bien la superficie de regadío es importante, representa únicamente el 10% de la superficie total cultivada en dicha zona; el cultivo de regadío predominante es de tipo herbáceo (97%). En la zona de los ríos Albaida y Sellent, la superficie destinada a secano es superior a la de regadío (74% frente a 26%); los cítricos son el cultivo

predominante (49%), seguido por los cultivos de tipo herbáceo (6%) y frutales 20%. En la cuenca alta del Júcar, la superficie cultivada representa el 28% del total de dicha zona, siendo la ocupada por el regadío únicamente el 3%, frente a un 97% ocupado por el secano, del regadío supone tan solo el 3% del regadío total y se destina fundamentalmente a cultivos de tipo herbáceo. En la cuenca del río Magro, la superficie destinada a secano es superior a la de regadío (91% frente a 9%), con un reparto muy igualado de cultivos (32% cítricos, 25% herbáceos y 20% frutales). Finalmente en la cuenca media del Júcar, la superficie cultivada representa el 28% del total de la zona, mayoritariamente de secano (95%) y destinándose la de regadío a cultivos de tipo herbáceo (59%) y barbecho de regadío (21%) (CHJ, 2007).

En términos generales el uso de suelo predominante es bosque y zonas naturales, que ocupa alrededor del 50%, a este uso le sigue el de zonas agrícolas de secano, cubriendo un 35% del territorio y el de zonas agrícolas de regadío con un 11%, siendo éstos los usos predominantes en áreas costeras y en la zona de la Mancha. Las zonas urbanas e industriales cubren un 3%, y finalmente, un 1% está cubierto por humedales y cuerpos de agua como se ilustra en la Figura 4.9.

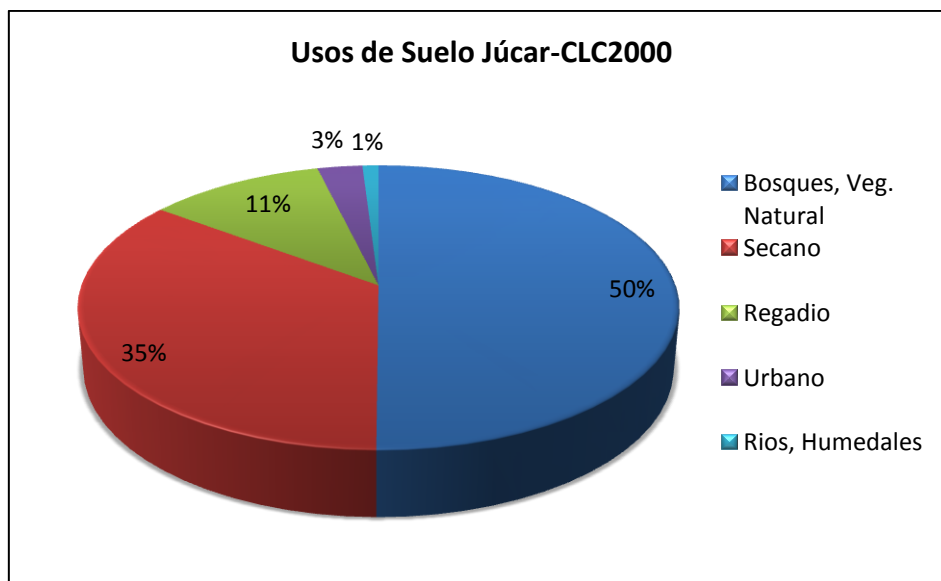


Figura 4.9 Usos del Suelo según Corine Land Cover 2000.

5. DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA RECOPIADA

En los capítulos precedentes se ha realizado la descripción del modelo de simulación hidrológica TETIS, presentando su estructura, procesos internos, parámetros del modelo, condiciones iniciales y finalmente el algoritmo de calibración automática. Además se ha detallado la elección del área de estudio, describiendo las principales características de las cuencas, que servirán como escenario para la aplicación del modelo hidrológico.

En el presente capítulo se aborda la descripción de la información hidrometeorológica recopilada requerida por el modelo distribuido para el inicio de la simulación hidrológica.

5.1. Series de Precipitaciones y Temperatura.

Una alteración de la temperatura y de la precipitación a causa del cambio climático repercutiría sobre los recursos hídricos de un territorio, pues a largo plazo, sus recursos renovables son iguales a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

En España, según los escenarios climáticos disponibles, las precipitaciones anuales disminuyen ligeramente y las temperaturas aumentan, por consiguiente se puede tender en un futuro muy cercano a la disminución de los recursos hídricos. Además, las tendencias que se apuntan para España son de una mayor irregularidad temporal de las precipitaciones, lo que repercutiría negativamente en el régimen de las crecidas y en las regulaciones de los ríos.

Para el modelamiento del comportamiento hidrológico de las cuencas analizadas se utilizarán series de precipitaciones y temperaturas adquiridas en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH), esto para el caso de las series puntuales. Para las series interpoladas, basándonos en el objetivo principal de este trabajo, se ha recurrido al proyecto *Spain02*, rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España.

5.1.1. Series puntuales de Precipitación y Temperatura.

La obtención de los datos puntuales de lluvia se ha conseguido a través de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)²⁴ y del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de las respectivas confederaciones hidrográficas por su parte la información de temperatura fue adquirida por medio de la AEMET.

En el caso de la lluvia, se basa en la utilización de datos de precipitación procedentes de registros puntuales realizados con pluviómetros distribuidos en el espacio. Las características de éstas estaciones se presentan en el Anexo I, entre ellas el porcentaje de datos faltantes, el cual se ilustra en las Figuras 5.1, 5.2, 5.3, para cada una de las estaciones pluviométricas y en cada cuenca hidrográfica.

El objetivo básico de la AEMET es el desarrollo, implantación y prestación de los servicios meteorológicos de competencia del Estado y el apoyo al ejercicio de otras políticas públicas y actividades privadas, contribuyendo a la seguridad de personas y bienes, y al bienestar y desarrollo sostenible de la sociedad española. La Agencia ostenta la condición de autoridad meteorológica del Estado, así como la condición de autoridad meteorológica aeronáutica.

²⁴ <http://www.aemet.es/es/portada>

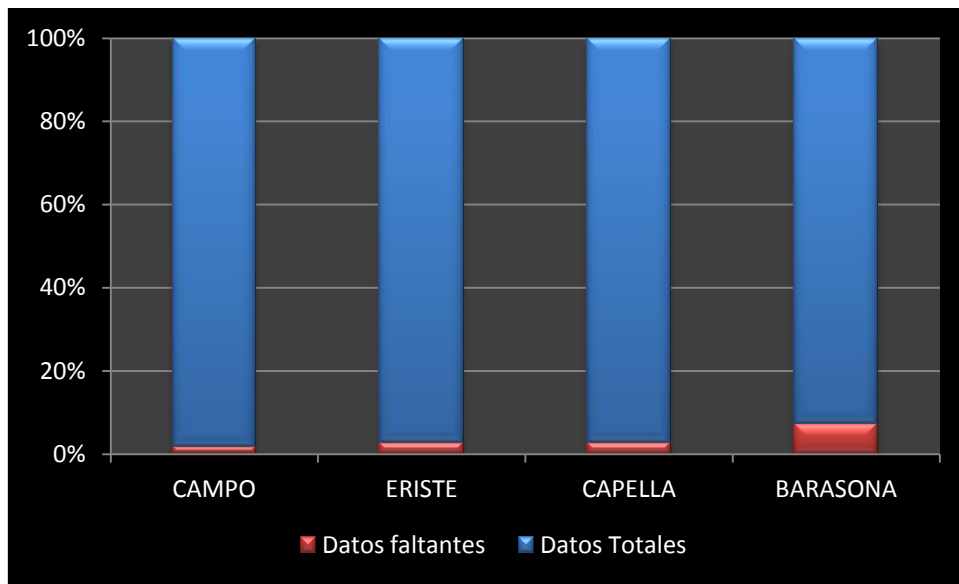


Figura 5.1 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Ésera, periodo 1997-2007. (Fuente: SAIH CHE)

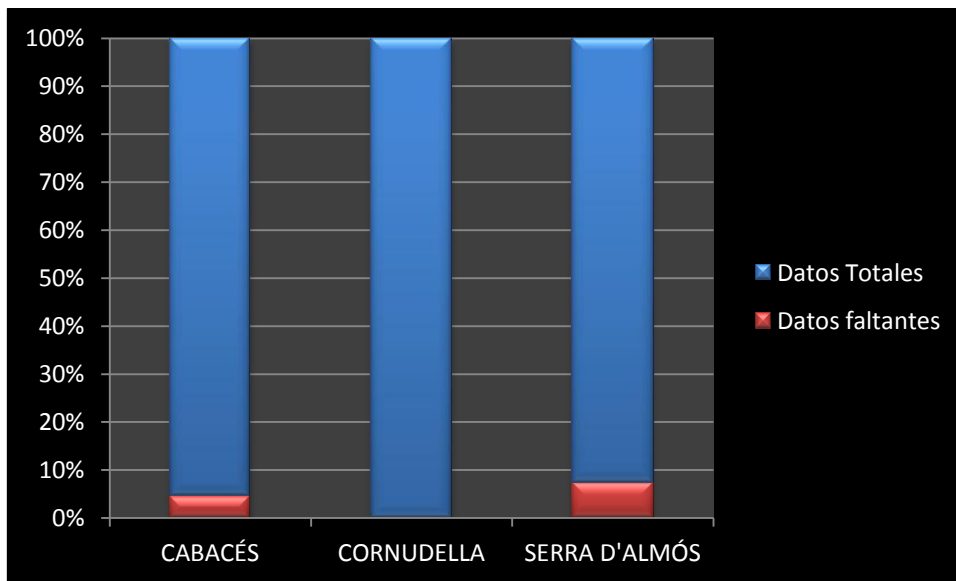


Figura 5.2 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Siurana, periodo 2003-2007. (Fuente: AEMET)

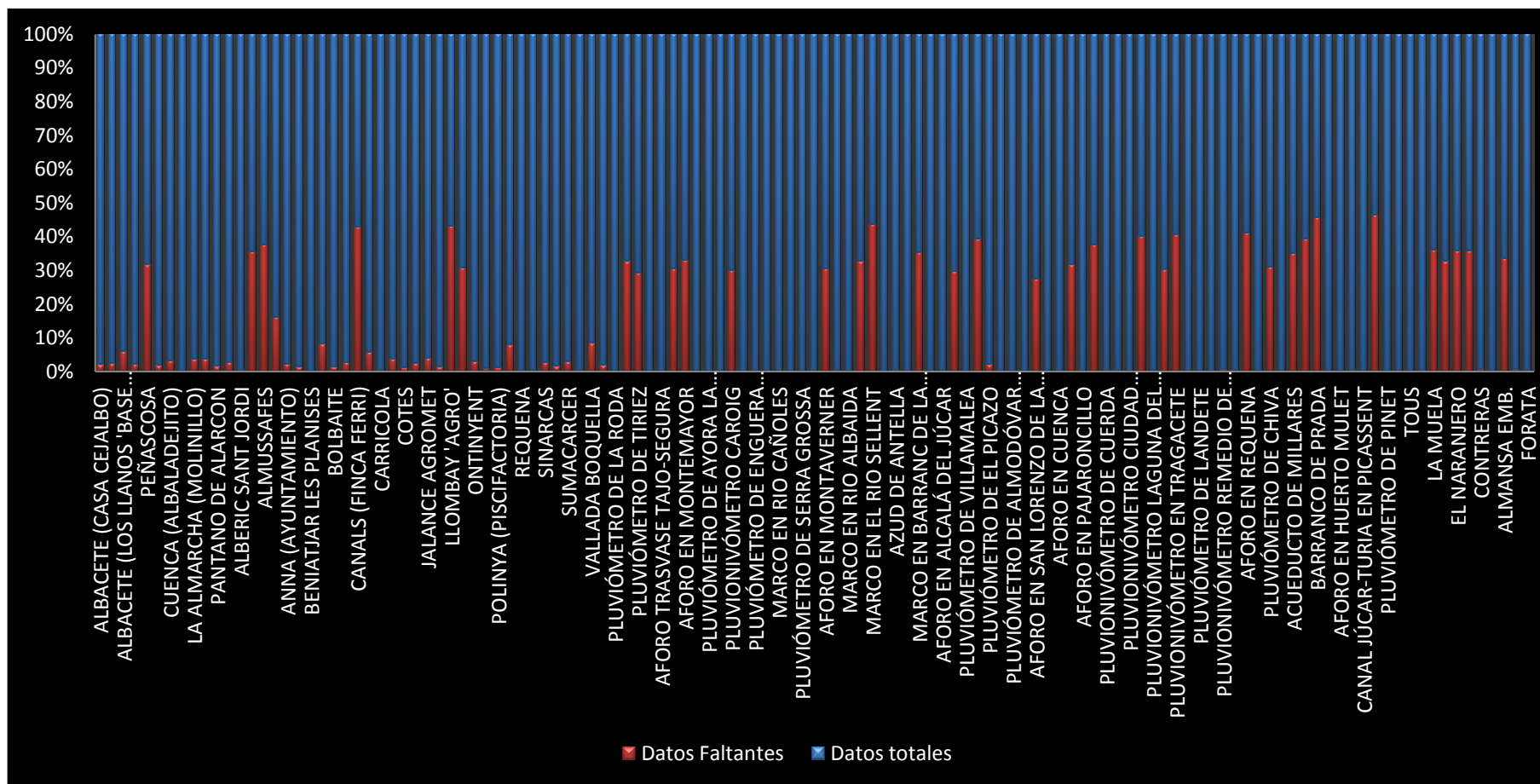


Figura 5.3 Porcentaje de datos faltantes en cada Estación Pluviométrica. Cuenca del Júcar, periodo 1999-2008. (Fuente: SAIH CHJ y AEMET).

La AEMET consta de más de 11000 estaciones de las cuales aproximadamente 9000 forman la red pluviométrica (codifican al menos precipitación), 4000 la termométrica (codifican al menos temperatura máxima y mínima) y 3500 la termopluviométrica (codifican al menos precipitación y temperaturas) como se muestra en la Figura 5.4.



Figura 5.4 Red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (Herrera, 2011)

Es importante subrayar que los registros de estas bases de datos suelen verse alterados por factores no climáticos (cambios en el entorno, en los aparatos de medición, etc.) que afectan al proceso de medición y pueden modificar la señal climática de las series de datos observados, por lo que para cualquier estudio climático han de ser sometidas a un post-proceso para corregir estos errores (eliminación de valores anómalos, homogeneidad relativa y absoluta de las series, etc.). Por otro lado, la distribución espacial de las estaciones suele ser muy heterogénea, existiendo regiones en las cuales no hay observaciones (Herrera, 2011).

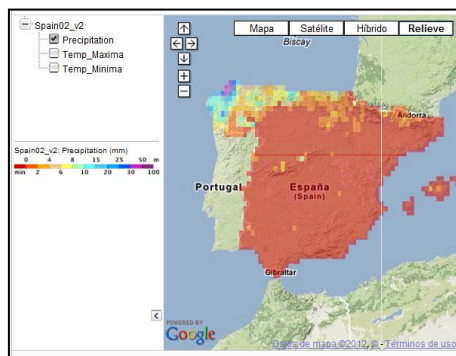
5.1.2. Series interpoladas de Precipitación y Temperatura.

Una alternativa frecuente a estas bases de datos observados son las bases de datos interpolados, definidas en rejillas regulares de alta resolución espacial y temporal, permitiendo análisis espacialmente homogéneos. Este tipo de bases de datos son de gran utilidad en diferentes sectores (hidrología,

agricultura, salud, etc.) por lo que en los últimos años se han ejecutado un gran número de investigaciones en este campo.

Spain02, proyecto desarrollado dentro del Grupo de Meteorología de Santander²⁵, conformado por investigadores y profesores de la Universidad de Cantabria, el Instituto de Física de Cantabria y la Agencia Estatal de Meteorología; es una base de datos diaria de precipitación y temperaturas máximas y mínimas sobre una malla regular de alta resolución ($0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$) para el territorio peninsular español y las Islas Baleares, Figura 5.5, interpolada a partir de un número elevado (miles) de estaciones que han sido sometidas a un estricto control de calidad. Además ha sido utilizada en el marco de los proyectos EXTREMBLES y ESTCENA para distintos estudios del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC).

Spain02 es una base de datos de libre acceso y disponible online²⁶, se ha puesto a distribución pública para ser aprovechada por los científicos que se encuentran al frente de las diferentes investigaciones relacionadas con el impacto que genera los cambios en la precipitación y las temperaturas. Esta rejilla ha sido validada frente a las observaciones y ha sido utilizada para la validación de modelos globales y regionales del clima.



(a)

²⁵ <http://www.meteo.unican.es/en/main>

²⁶ <http://www.meteo.unican.es/es/datasets/spain02>

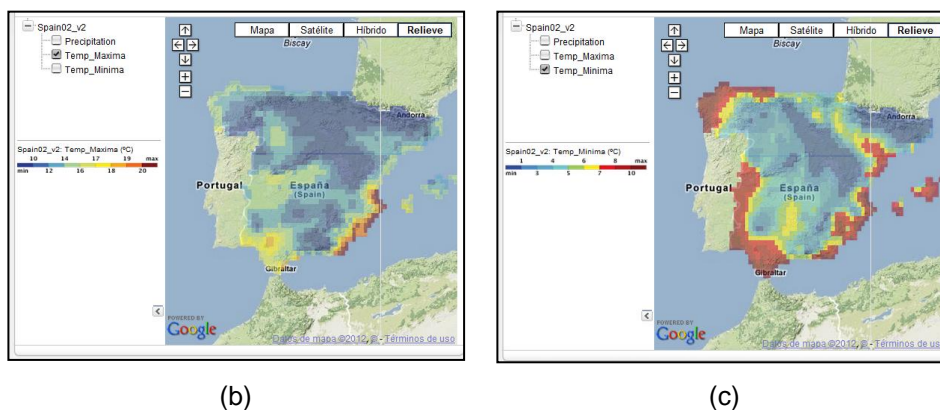


Figura 5.5 Spain02: Grid (aprox. 20 Km) de (a) Precipitación, (b) Temperatura máxima y (c) Temperatura mínima para el 10/04/2012. (Fuente: Página Web “Grupo de Meteorología de Santander”).

La base de datos observados para el desarrollo de Spain02 es la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los primeros registros de esta red de observaciones datan del 1 de septiembre de 1859 (estación 3195Z ubicada en el Astronómico de Madrid) y abarcan hasta nuestros días. El periodo considerado en este proyecto fue desde 1950 a 2003, ya que se encuentra contenido entre los dos periodos utilizados usualmente para calcular promedios climáticos (1961-1900 y 1971-2000).

El control de calidad de la serie fue realizado en tres etapas consecutivas:

- i. Eliminación de errores puntuales: en esta etapa se detectaron los valores anómalos (outliers) y se eliminaron de la serie.
- ii. Porcentaje de datos registrados en el periodo de 1950-2003.
- iii. Análisis de la homogeneidad de la serie mediante tests de hipótesis (Alexandersson, 1986; Alexandersson and Moberg, 1997a,b; Khaliq and Ouarda, 2007).

Seguidamente se escogieron dos conjuntos de estaciones: *i)* Conjunto de estaciones de precipitación donde las series observadas tienen más de 15 años con un porcentaje de datos superior al 90%, y han superado los test de homogeneidad relativa y absoluta con una confianza del 5%. Este conjunto de estaciones fue el utilizado para realizar la primera versión de la rejilla *Spain02*. *ii)* Conjunto de estaciones cuyas series de datos observados tienen más de 40

años con un porcentaje de datos superior al 90%. En este caso fueron consideradas las dos variables, precipitación y temperatura, y el objetivo fue reproducir las tendencias ocurridas en el periodo de estudio. (Herrera, 2011).

Tras haber escogido los dos conjuntos de estaciones procedieron con el proceso de interpolación, usando los métodos más utilizados en la actualidad, cuyo objetivo es determinar cada una de las variables en la forma en las que se pueden reproducir y cómo afectan al resultado, además de estimar el valor de una variable en una localización, en la cual no existe observación, a partir de los valores observados de esa variable en un entorno de esa localización.

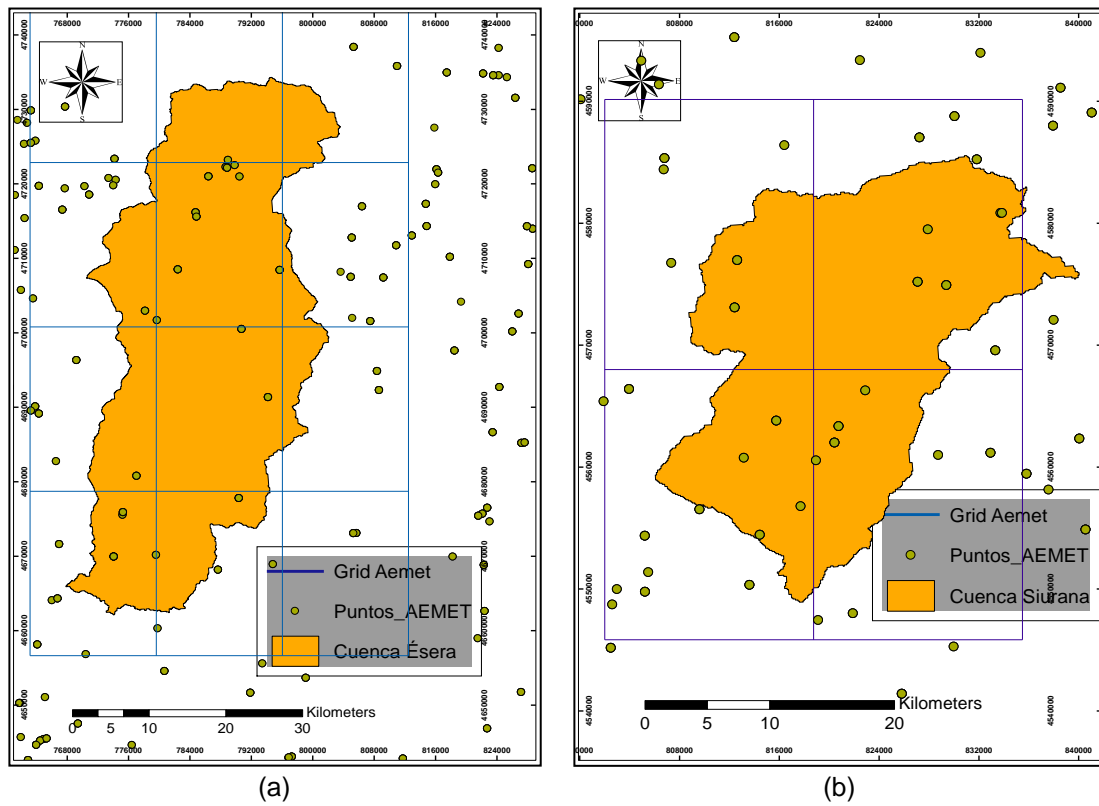
Para las variables climáticas existen numerosos métodos de interpolación, entre los que se pueden destacar: Promedios ponderados con la distancia, Métodos de Kriging y Splines. El comportamiento de estos métodos depende principalmente de las escalas espacial y temporal, y la densidad de la red de estaciones escogidas (ver, p.e. Hofstra et al., 2008). Para la interpolación de los datos de *Spain02* se utilizó el método *Angular Distance Weighting* (ADW), el método geoestadístico *Kriging Ordinario* (OK) y *Thin Plate Splines* (TPS); para el caso de la precipitación el método de interpolación para variables binarias, *Indicator Kriging* (IK).

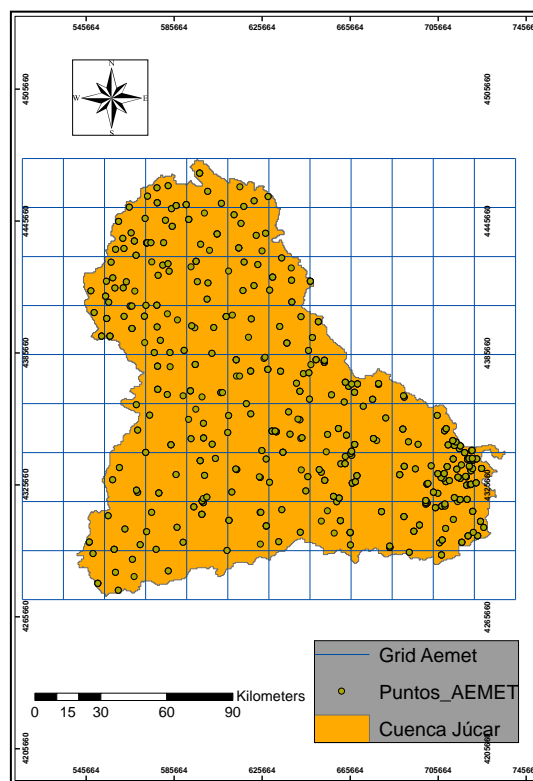
Posteriormente analizaron el comportamiento de los diferentes métodos de interpolación realizando una validación cruzada, usando como medida de validación la diferencia media entre la serie observada y la interpolada (bias), raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado (RMSE) y el coeficiente de correlación de Pearson (r). Tomando como referencia el método de OK realizaron comparaciones con los otros dos algoritmos, concluyendo que éste sería el método seleccionado para producir la base de datos diaria de precipitación.

La base de datos interpolada ha sufrido modificaciones y actualizaciones, además de incorporar nuevos métodos en su desarrollo. Las versiones van desde *Spain02_v1* donde el periodo es desde 1950 a 2003 y únicamente se dispone de precipitación, hasta la más reciente versión *Spain02_v3* donde se

describe una nueva rejilla de datos de precipitación interpolados a partir de una red de unas 500 estaciones con al menos 40 años con el 90% de los datos en el periodo 1950-2011, apropiada para el estudio de tendencias y considerando la orografía como covariable.

Para el desarrollo de nuestro trabajo se usará la última versión de *Spain02*, con fecha de actualización de 15 de Marzo de 2012, en la Figura 5.6 se ilustra la distribución de la rejilla para las cuencas de interés.





(c)

Figura 5.6 Distribución rejilla Spain02 en cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

A partir de la serie de datos interpolada de lluvia de *Spain02* se determinó que la precipitación de la cuenca del río Ésera varía entre 990 mm/año, en la zona de cabecera, y 570 mm/año en la zona más al sur de la cuenca. En la cuenca del río Siurana la lluvia varía entre 370 mm/año y 465 mm/año en la parte alta y baja respectivamente. Finalmente en la cuenca del río Júcar se registra una precipitación promedio anual 580 mm/año en cabecera y 440 mm/año en zona de desembocadura.

Además se pudo establecer las tendencias de temperatura con la altitud en las cuencas, analizando la relación que existe al graficar estas dos variables, tomando como temperatura la media entre la temperatura máxima y mínima de la base de datos de *Spain02* (Figura 5.7).

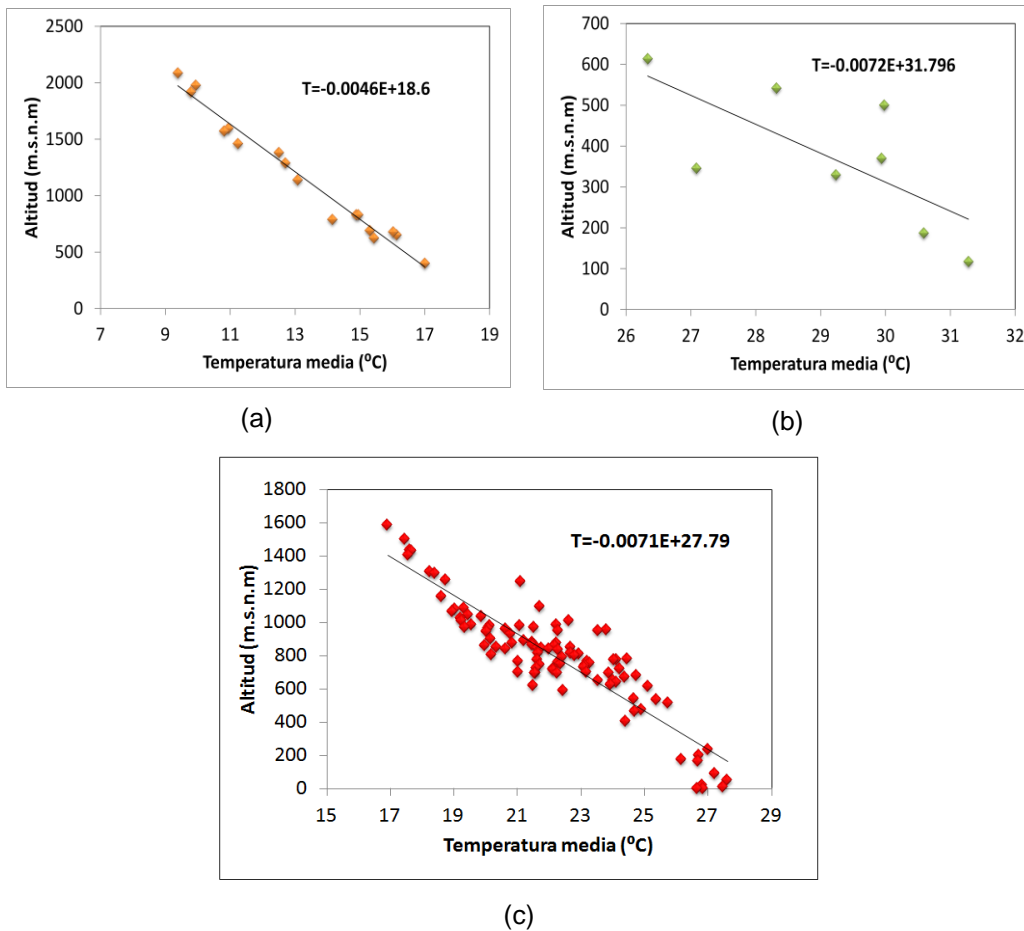


Figura 5.7 Tendencias de la temperatura con la altitud en cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

Se evidencia que la temperatura muestra una tendencia única con la altitud en las tres cuencas en estudio, refiriendo un gradiente de $-0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m de disminución en la altitud y coeficiente de correlación $r=0.97$ en el caso de la cuenca del Ésera; en la cuenca del Siurana el gradiente es de -0.72°C por cada 100 m de disminución en la altitud y correlación $r=0.51$; y en la cuenca del Júcar un gradiente de -0.71°C por cada 100 m de disminución en la altitud con una correlación $r=0.82$.

Con el anterior análisis se pudo determinar que en la cuenca del río Ésera la temperatura media varía entre 9.7°C en cabecera y 15.3°C en desembocadura; en la del Siurana en cabecera la temperatura media es alrededor de 28.2°C y 30.3°C en la salida de la cuenca y por último en la

cuenca del río Júcar se tienen temperaturas medias de 18.4°C y 26.2°C en cabecera y en zona litoral respectivamente.

5.2. Series de Evapotranspiración.

La evapotranspiración (ET) se refiere a todos los procesos mediante el cual el agua en estado líquido o sólido, cerca de la superficie de la tierra se transforman en vapor atmosférico. La ET incluye la evaporación desde masas de agua, el suelo húmedo y las superficies vegetales, así como la transpiración desde las hojas de las plantas y la sublimación desde las superficies de hielo y nieve.

5.2.1. Evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial (ETP), es la pérdida de humedad que ocurriría en un sistema, si en ningún momento existiera una deficiencia de agua en el suelo para uso de la vegetación; para ello es necesario agregar agua continuamente al sistema.

El concepto de ETP clásico ha sido criticado por diversos autores. Según Thornthwaite (1948) la ETP no solo depende de la temperatura, sino también de otros factores como la radiación solar, la humedad relativa y el viento. Penman (1956) define la ETP como la cantidad de agua transpirada por un cultivo corto de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin ninguna falta de agua. Por su parte para Papadakis (1980) la ETP es la cantidad de agua que es necesario suministrar, sin restricciones, bajo condiciones ideales de cobertura y crecimiento, para tener un rendimiento o un desarrollo vegetativo cercano al óptimo. Estos autores junto con Turc utilizan en sus formulaciones el concepto de evapotranspiración potencial (ETP).

En posteriores investigaciones se observó que el valor de la ETP no representa la capacidad evaporativa máxima, se ha comprobado como en zonas áridas y semiáridas la evapotranspiración en algunos cultivos de mayor porte como el maíz, girasol, alfalfa, sorgo, etc., es superior a la estimada con la

ET medida en un césped, lo que aconsejaba utilizar otro concepto. Esto llevó a introducir el concepto de evapotranspiración de referencia.

5.2.2. Evapotranspiración de referencia.

La evapotranspiración de referencia (ET_0), es la pérdida de humedad que ocurre en un sistema sin manipular la cantidad de agua disponible y como su nombre lo indica, para un cultivo específico.

Hay razones prácticas para la definición de la evapotranspiración para un cultivo específico de referencia. Sys (1985) define la ET_0 como la evapotranspiración de una superficie de cultivo de pradera o alfalfa (superficie extensa con césped de altura uniforme y crecimiento activo) que cubre completamente el suelo y sin ninguna restricción de agua. Doorenbos y Pruitt (1976) definen el concepto de ET_0 como la correspondiente a un cultivo de pradera de bajo porte (7-15 cm), que cubre completamente el suelo y no sufre limitación de agua. El modelo de Penman-Monteith define la ET_0 como la correspondiente a un cultivo hipotético que tiene una altura de 12 cm, una resistencia de cubierta de 69 s/m, una resistencia aerodinámica de $208/U_2$ s/m, donde U_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura; y un albedo de 0.23.

Ejemplos de métodos empíricos que estiman la ET expresada como ET_0 son: Penman-Monteith (Monteith, 1965), Thornthwaite (1948), Hargreaves (Hargreaves, 1985 citados por Neitsch et al., 2002) y FAO56, basados en fórmulas que han sido obtenidas en diferentes condiciones climáticas y sin la disponibilidad de datos meteorológicos.

La ecuación de Hargreaves (Allen et al., 2006) para calcular la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_0) solamente necesita datos de temperaturas y de radiación solar, y fue la escogida para evaluar la ET en el presente trabajo.

La expresión general es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0135 * KT * (T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} * R_a \quad (5.1)$$

donde:

ET_0 = evapotranspiración de referencia, mm/día

T_{med} = temperatura media diaria, °C

T_{max} = temperatura diaria máxima, °C

T_{med} = temperatura diaria mínima, °C

KT = coeficiente

R_a = radiación solar extraterrestre, convertida en mm/día (tabulada)

Es recomendable verificar la validez de los resultados obtenidos con la ecuación (5.1), comparándolos con estimaciones de la ecuación de FAO Penman-Monteith en estaciones meteorológicas donde se dispone de datos de radiación solar, temperatura del aire, humedad, y velocidad del viento. Además si es necesario, la ecuación de Hargreaves se puede calibrar mediante la determinación de coeficientes empíricos, de tal forma que $ET_o^* = a + b ET_o$, donde ET_o es la calculada mediante la ecuación (5.1). Los coeficientes a y b se pueden determinar por análisis de regresión.

El coeficiente KT de la expresión (5.1) es un coeficiente empírico, Hargreaves (citado en Samani, 2000) recomienda un valor de $KT=0.162$ para regiones del interior y $KT=0.19$ para regiones costeras. En TETIS este coeficiente es calibrado por medio del FC_2 , que multiplica directamente el valor de la ET_0 , uno de los inputs del modelo.

Para el cálculo de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); y aparece según los autores como R_0 ó R_a , utilizaremos la “Tabla de Radiación solar extraterrestre”, esta tabla está en $MJ/m^2/día$ (para pasar a mm/día de agua evaporada multiplicar por 0.408) en función de la latitud del lugar y del mes. En este documento nos referiremos a ella como R_a .

Tomando la serie interpolada de temperatura del proyecto *Spain02*, y aplicando la ecuación de Hargreaves se calculó la serie diaria de ET ,

asumiendo como T_{med} el promedio entre la T_{max} y la T_{min} . Las series de ET mensual para cada una de las cuencas hidrológicas se presentan en la Figura 5.8.

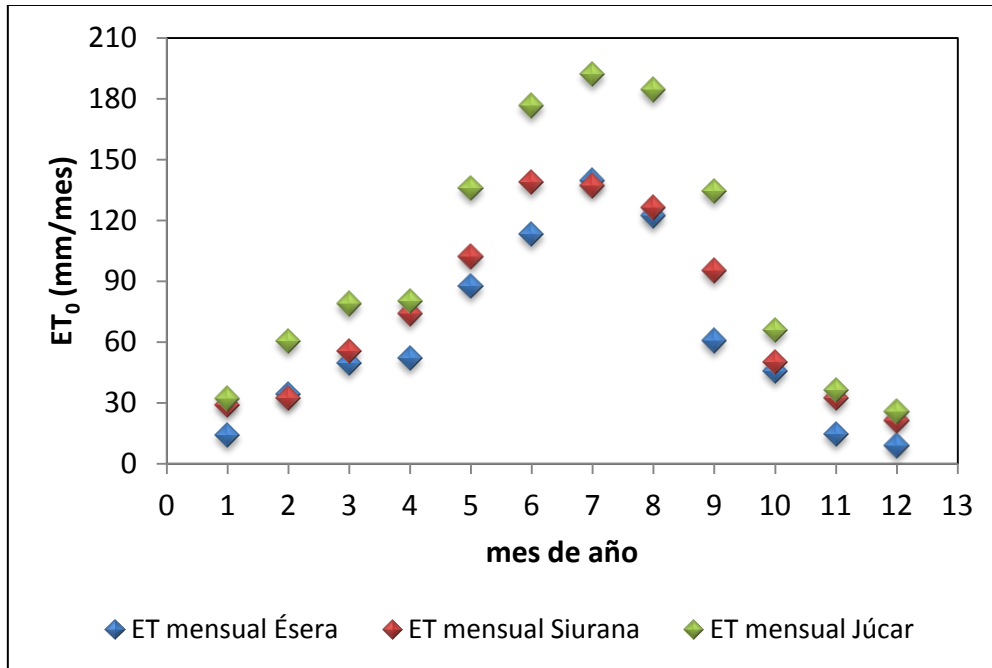


Figura 5.8 ET media mensual calculada a partir de la ET diaria obtenida con el método de Hargreaves para cada una de las cuencas.

En los tres casos la ET promedio máxima mensual se da en el mes de Julio con un valor entorno a los 140 mm/mes para el Ésera y Siurana y 190 mm/mes para el Júcar. La ET media adopta valores ligeramente inferiores a 700 mm/año en cabecera y superiores a 900 mm/año en desembocadura en la cuenca del Ésera. En la cuenca del Siurana en cabecera la ET media se encuentra alrededor 840 mm/año en la parte alta de la cuenca y 900 mm/año en la parte baja. Para la cuenca del Júcar los valores de ET media son de 1200 mm/año y 1040 mm/año en cabecera y desembocadura respetivamente.

Comparando los valores de evapotranspiración con la precipitación, se pone de manifiesto el carácter excedentario de recursos hídricos de la cabecera de la cuenca y deficitario en la zona baja, esto en el caso del Ésera. Para las cuencas del río Siurana y del río Júcar existe un carácter deficitario de recursos hídricos tanto en cabecera como en la zona baja.

5.3. Serie de Caudales medios diarios observados en las estaciones de aforo.

Para la obtención de la serie de caudales medios diarios observados en las estaciones de aforo se recurrió a el Sistema Automático de Información Hidrológica-SAIH de la Confederación Hidrográfica del Ebro-CHE (Cuenca río Ésera) y Confederación Hidrográfica del Júcar-CHJ (Cuenca del río Júcar), para la cuenca del río Siurana los datos fueron adquiridos a través de la Agencia Catalana del Agua-ACA; después de haber revisado y rechazado periodos de tiempo con incongruencias, se cuenta con una serie en cada una de las estaciones de aforo relativamente continua y con el periodo que se indica en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Periodo de las series aforadas en las cuencas hidrológicas.

Cuenca Hidrológica	Periodo
Ésera	1/10/1997-30/09/2007 (10 años)
Siurana	1/10/2003-30/09/2007 (4 años)
Júcar	1/10/1999-30/09/2008 (9 años)

A continuación se describe el régimen fluvial de cada una de las cuencas según la serie de caudales medidas en las estaciones de aforo.

5.3.1. Régimen fluvial del río Ésera.

- i. *Estación de aforo Graus_013*: ubicada en el municipio de Graus, termino municipal de la provincia de Huesca, concretamente en las coordenadas UTM (X: 776.307, Y: 4.678.241), con una cuenca receptora de 889.5 km², respecto a los 1532 km² del total de la cuenca (Figura 5.9).

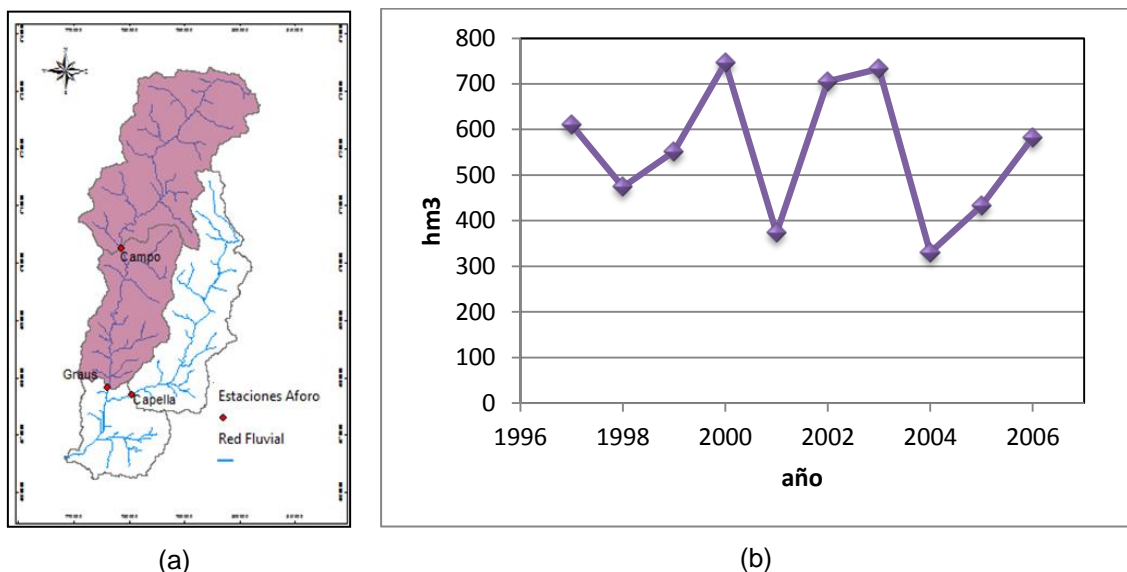


Figura 5.9 Ubicación de la estación de aforo Graus (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).

La Figura 5.9 muestra la evolución de las aportaciones para la serie 1997-2007 de la estación de aforo de Graus (Confederación Hidrográfica del Ebro), se observa que los años 2000, 2002 y 2003 fueron más húmedos comparados con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante.

Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHE, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 18/12/1997 a las 4:00 y 9:30 con un caudal pico instantáneo $Q_{pi}=351 m^3/s$ y caudal pico diario $Q_{pd}=330.75 m^3/s$.

- ii. *Estación de aforo Campo_258*: ubicada en el municipio de Campo, termino municipal de la provincia de Huesca, concretamente en las coordenadas UTM (X: 778.816, Y: 4.702.708), con una cuenca receptora de $564.5 km^2$, respecto a los $1532 km^2$ del total de la cuenca (Figura 5.10).

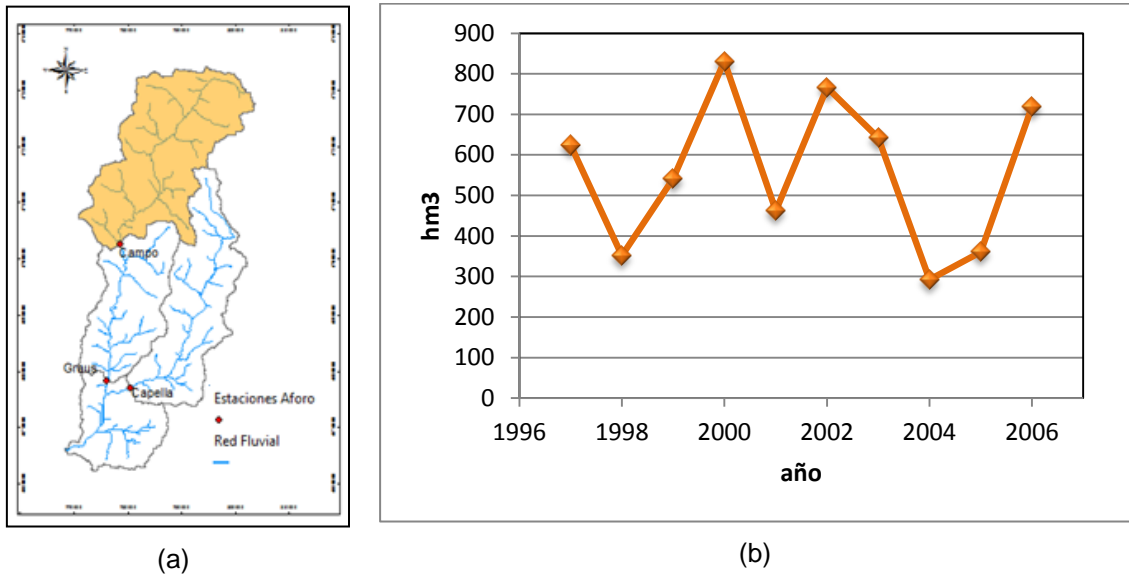


Figura 5.10 Ubicación de la estación de aforo Campo (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).

La Figura 5.10 muestra la evolución de las aportaciones para la serie 1997-2007 de la estación de aforo de Campo (Confederación Hidrográfica del Ebro), se observa que los años 2000, 2002 y 2007 fueron más húmedos comparados con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante.

Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHE, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 18/12/1997 a las 13:15 con $Q_{pi}=426.2 m^3/s$ y $Q_{pd}= 294.5 m^3/s$.

- iii. *Estación de aforo Capella_047*: ubicada en el municipio de Capella, termino municipal de la provincia de Huesca, concretamente en las coordenadas UTM (X: 780.464, Y: 4.677.088), con una cuenca receptora de $425.9 km^2$, respecto a los $1532 km^2$ del total de la cuenca (Figura 5.11).

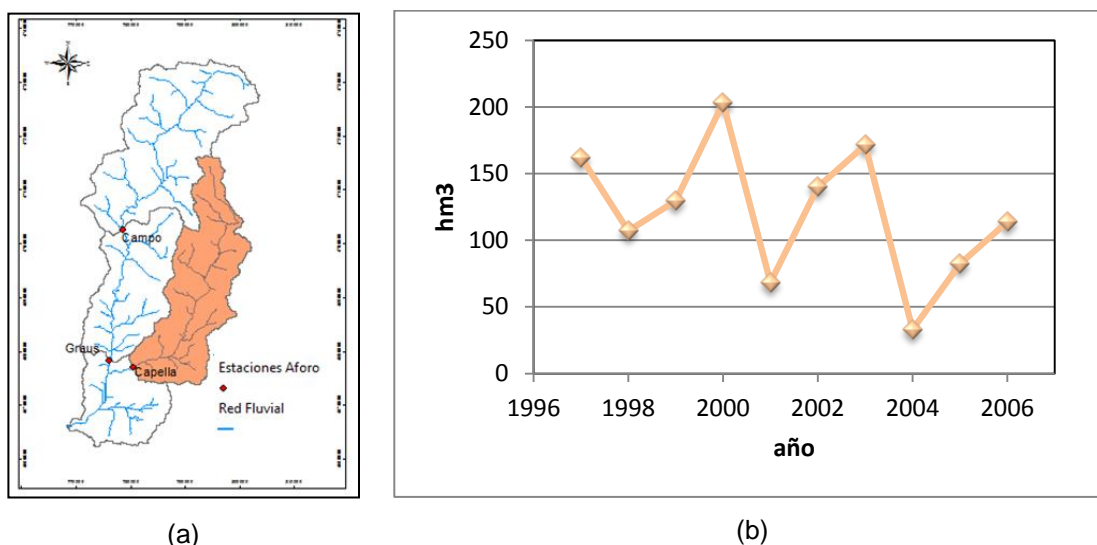


Figura 5.11 Ubicación de la estación de aforo Capella (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1997-2007 (b).

Finalmente en la estación de aforo Capella, Figura 5.11, se observa que los años 2000 y 2003 fueron más húmedos comparados con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante. Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHE, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 18/12/1997 a las 14:15 con un $Q_{pi}= 211.55$ y $Q_{pd}=192.2$ m^3/s .

El análisis en la comparación de los caudales picos más altos registrados en las estaciones de aforo y su desfase temporal nos puede dar una idea de la dirección de procedencia de la tormenta, pero también puede ser indicativo de diferencias en la respuesta hidrológica de las cuencas, debido en parte a la diferencia de tamaño, pero también a la importancia relativa del flujo base en la respuesta total.

El régimen hidrológico del río Ésera se caracteriza por un régimen fluvial de carácter bimodal, Figura 5.12, con un marcado periodo seco en los meses de julio a octubre, febrero, marzo y húmedo el resto del año teniendo en cuenta los deshielo que se presentan en la cabecera de la cuenca.

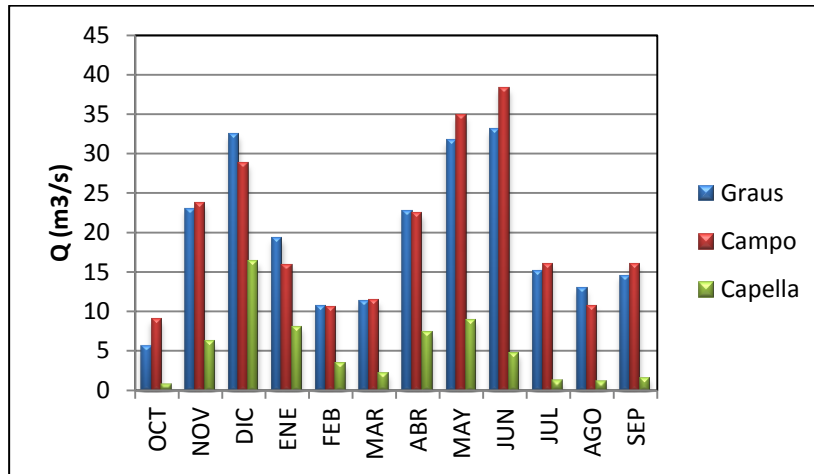


Figura 5.12 Ciclo anual en las estaciones de caudal.

5.3.2. Régimen fluvial del río Siurana.

Los datos de caudales en el río Siurana los proporciona la estación ubicada en el Embalse de Ciurana (9868), situada en las coordenadas UTM (X: 828.042, Y: 4.574.070), término municipal de Cornudella de Montsant, con una cuenca receptora de 62.41 km², respecto a los 614.9 km² del total de la cuenca (Figura 5.13).

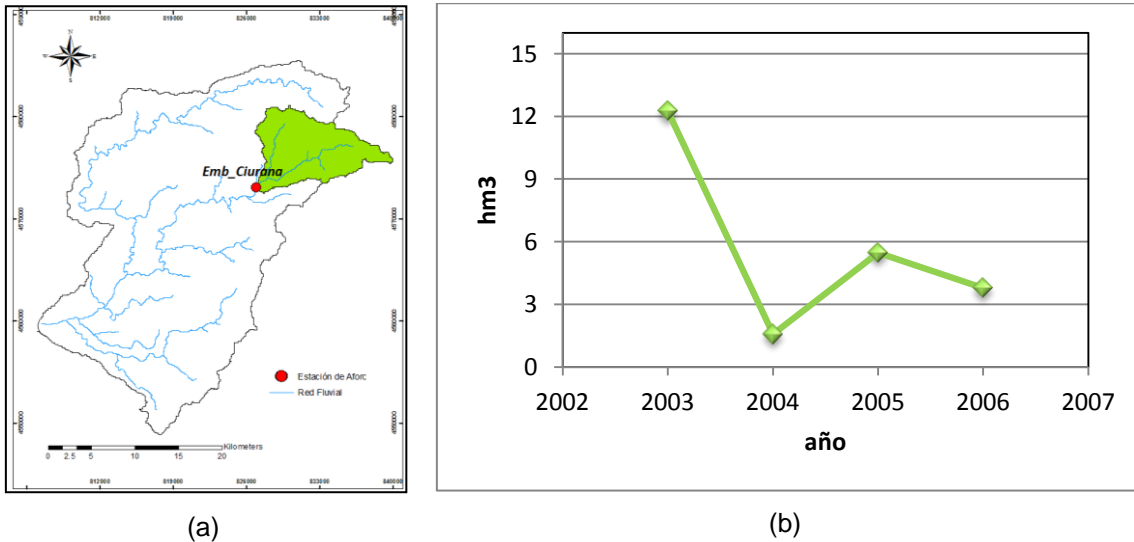


Figura 5.13 Ubicación de la estación de aforo Embalse Ciurana (a) y Evolución de la aportación media anual (hm³) para la serie 2003-2007 (b).

Se observa en la Figura 5.13 que el año 2003 fue el más húmedo comparado con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante. Por otra parte esta serie de caudales tiene un 12% de datos faltantes, pero fue la escogida de la serie total ya que presentaba varios eventos importantes y se considero como una de las más continuas.

Según los datos de la red de estaciones SAIH de la ACA, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 20/03/2007 con un $Q_{pd}= 9.4 \text{ m}^3/\text{s}$.

El régimen hidrológico del río Siurana es de tipo pluvial con un periodo húmedo en los meses marzo, abril y mayo y un marcado periodo seco el resto del año, como se muestra en la Figura 5.14, la ilustración de este ciclo anual es del año hidrológico de 2004, pero en términos generales es un río con caudales por debajo de los $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

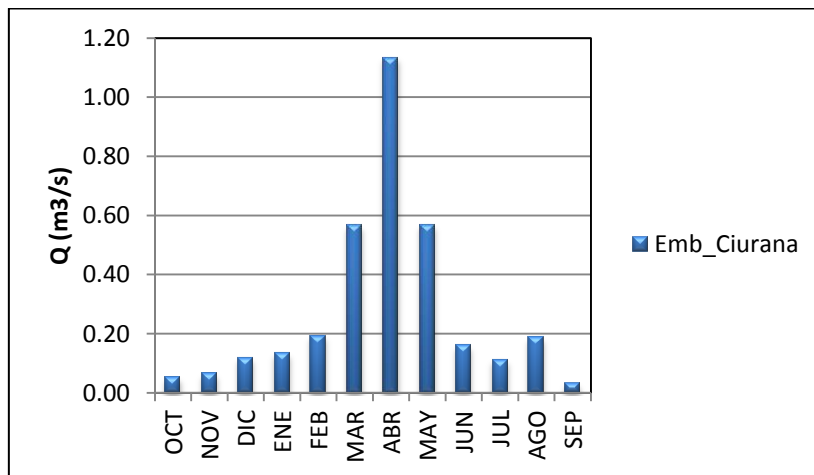
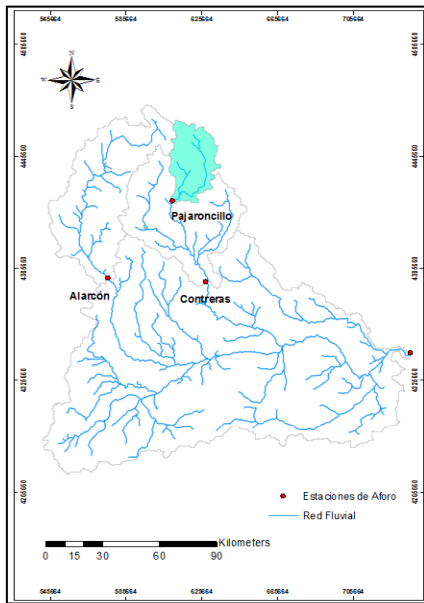


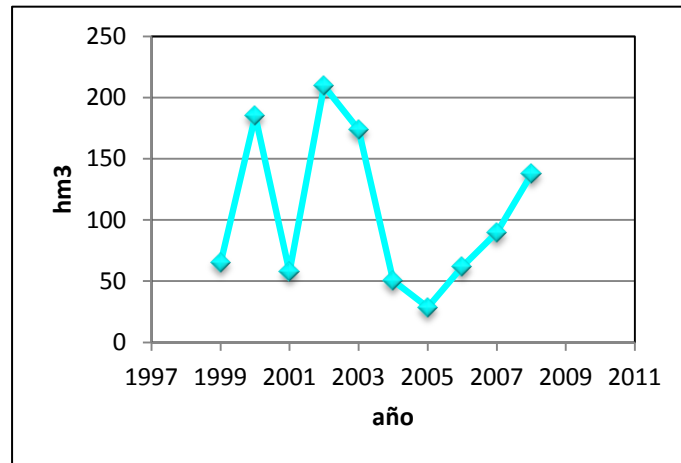
Figura 5.14 Ciclo anual en la estación de caudal.

5.3.3. Régimen fluvial del río Júcar.

- i. *Estación de aforo Pajarocillo_8090*: ubicada en el municipio de Pajarocillo, termino municipal de la provincia de Cuenca, concretamente en las coordenadas UTM (X: 610.230, Y: 4.422.140), con una cuenca receptora de 860.75 km^2 , respecto a los 21430 km^2 del total de la cuenca (Figura 5.15).



(a)



(b)

Figura 5.15 Ubicación de la estación de aforo Pajaroncillo (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).

La Figura 5.15 muestra la evolución de las aportaciones para la serie 1999-2008 de la estación de aforo Pajaroncillo (Confederación Hidrográfica del Júcar), se observa que los años 2000 y 2002 fueron más húmedos comparados con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante.

Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHJ, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 03/03/2001 con un caudal pico diario $Q_{pd} = 64.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

ii. *Estación de aforo Contreras_8130*: ubicada en el municipio de Villagordo del Cabriel, termino municipal de la provincia de Valencia, concretamente en las coordenadas UTM (X: 628.530, Y: 4.376.910), con una cuenca receptora de 3426.75 km^2 , respecto a los 21430 km^2 del total de la cuenca (Figura 5.16).

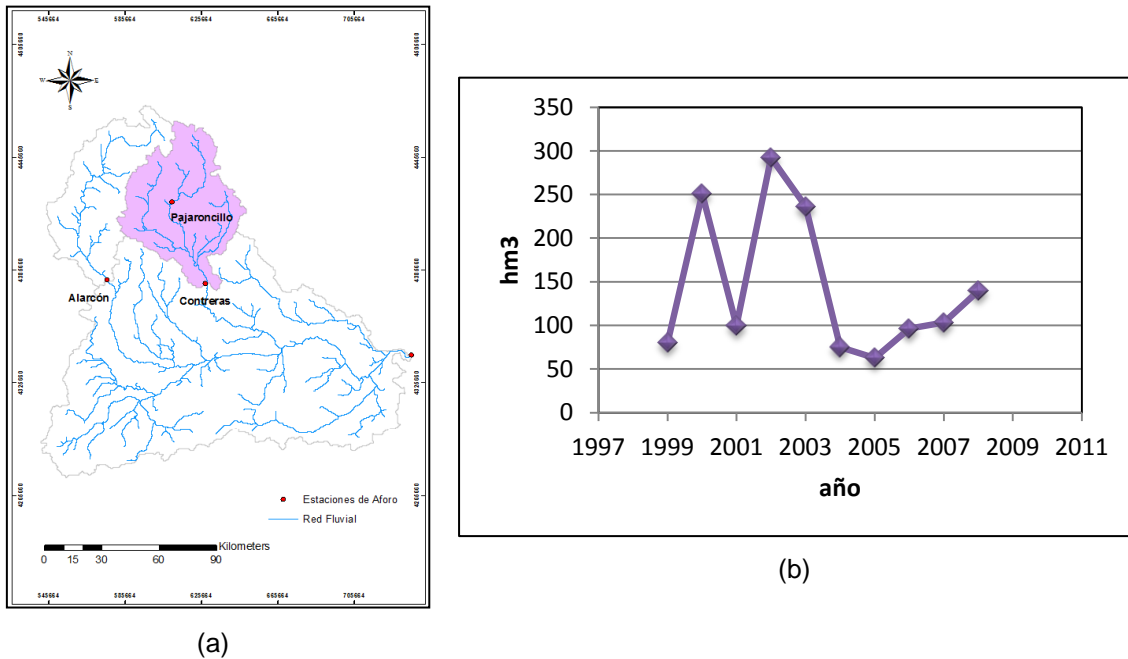


Figura 5.16 Ubicación de la estación de aforo Contreras (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).

La Figura 5.16 muestra la evolución de las aportaciones para la serie 1999-2008 de la estación de aforo de Contreras (CHJ), al igual que en la estación de Pajaroncillo los años 2000 y 2002 fueron más húmedos comparados con el resto de la serie donde la aportación de agua fue menos importante.

Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHE, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 27/02/2003 con $Q_{pd} = 73.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

iii. *Estación de aforo Alarcón_8107*: ubicada en el municipio de Alarcón, término municipal de la provincia de Huesca, concretamente en las coordenadas UTM (X: 576.128, Y: 4.379.647), con una cuenca receptora de 2882.5 km^2 , respecto a los 21430 km^2 del total de la cuenca (Figura 5.17).

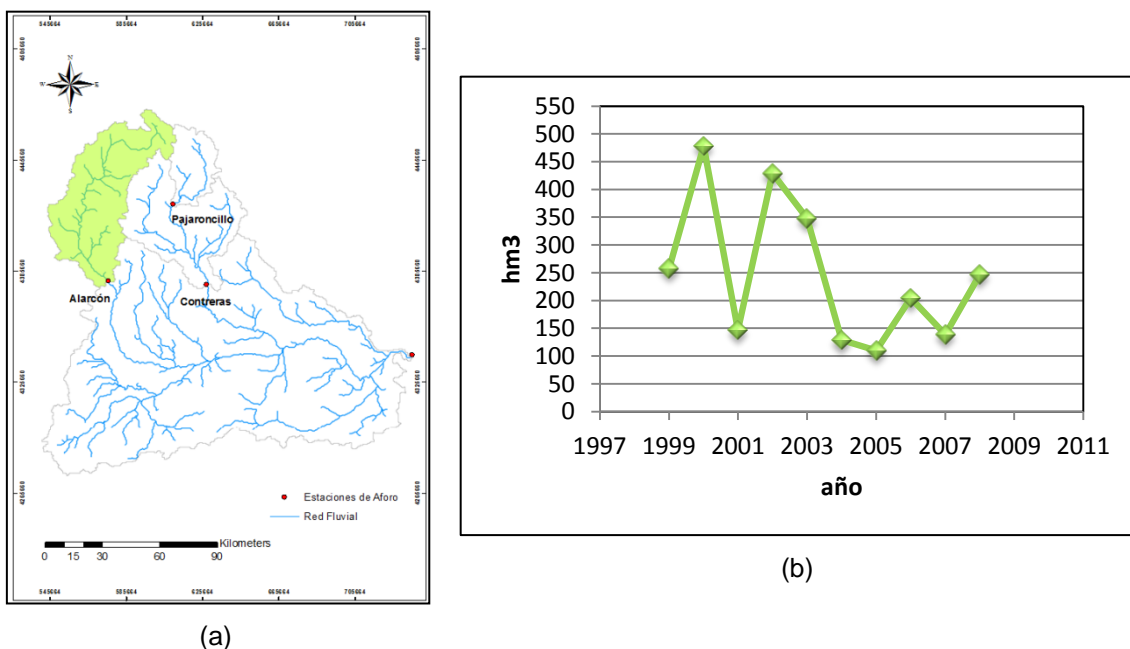


Figura 5.17 Ubicación de la estación de aforo Alarcón (a) y Evolución de la aportación media anual (hm^3) para la serie 1999-2008 (b).

Finalmente en la estación de aforo Alarcón, Figura 5.17, se observan los mismos años de humedad que en las estaciones anteriores (2000 y 2002). Según los datos de la red de estaciones SAIH de la CHJ, el valor pico más alto registrado en este episodio en la estación se presentó el 05/03/2001 con $Q_{pd}=107 m^3/s$.

El régimen hidrológico del río Júcar se caracteriza por un régimen fluvial de carácter pluvio-nival, Figura 5.18, con un máximo primaveral y fuertes estiajes. En su curso medio y bajo depende más de las lluvias estacionales, alcanzando un máximo otoñal coincidiendo con la "gota fría", característica de las tierras valencianas.

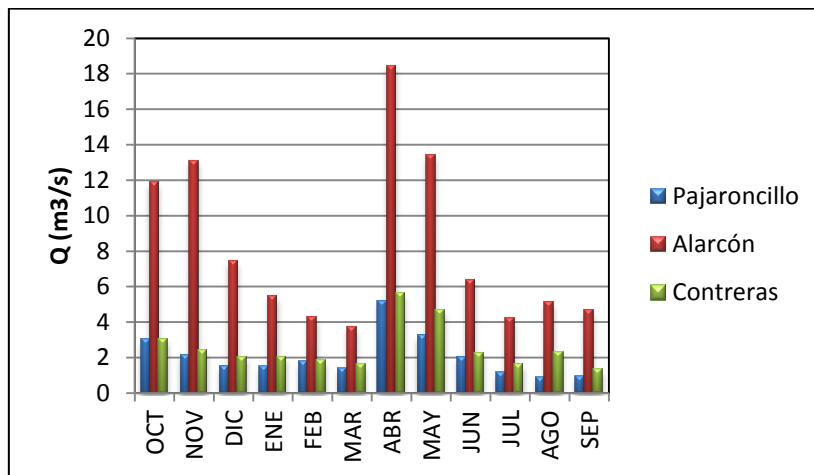


Figura 5.18 Ciclo anual en las estaciones de caudal.

6. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ESPACIALES PARA LA MODELIZACIÓN

Además de la información hidrometeorológica, el modelo hidrológico distribuido TETIS requiere una estructura de parámetros que describan la variabilidad espacial de las características de los suelos, del sustrato y de la cubierta vegetal a escala de cuenca, representada mediante la estimación a priori de mapas de parámetros a partir de la información medioambiental disponible, la cual debe ser coherente con la topografía, el uso del suelo presente, la cubierta vegetal existente, la edafología, la litología y las demás características del medio físico susceptibles de representarse espacialmente. La coherencia en la representación espacial está ligada con la correcta calibración del modelo, ya que en ésta se debe garantizar que el modelo refleje la realidad del medio sobre el que se aplica.

En virtud de lo antes expuesto, en los siguientes apartados se describe la información disponible y obtención de cada uno de los parámetros que representan las propiedades físicas de las zonas en estudio y que servirán de inputs para una adecuada modelación.

6.1. Información disponible de las características físicas de la cuenca.

Para la creación de los mapas que representan las características físicas de cada una de las cuencas, se ha utilizado información disponible que tuviera representación cartográfica y que fuera relevante para la determinación de las variaciones espaciales en las áreas de estudio, además que cumpliera con el objetivo principal de este trabajo, el aprovechamiento de información estándar de libre acceso.

La Tabla 6.1 muestra los diferentes tipos de información cartográfica original, utilizada en función del tema tratado en el estudio.

Tabla 6.1 Información cartográfica utilizada para la estimación de parámetros.

Mapas	Formato Original y Escala	Parámetros estimados
Modelo de Elevación Digital	Digital, píxel de 25 x 25 m	Mapa de pendiente, Mapa de direcciones de flujo, Mapa de celdas acumuladas y Mapa de velocidad de flujo en la ladera.
CORINE <i>land cover</i> 2006	Digital, 1:100.000	Mapa de almacenamiento estático del suelo, Mapa de intercepción, Mapa de almacenamiento superficial por depresiones en el terreno.
Base de datos de Suelo Europea (ESDB)	Digital, 1:1.000.000	Mapa de almacenamiento estático del suelo y de conductividades hidráulicas horizontal y vertical del suelo.
Mapa litoestratigráfico y de Permeabilidades de España.	Digital, 1:200.000	Mapa de permeabilidad horizontal y vertical del acuífero y mapa de velocidad de recarga del acuífero.

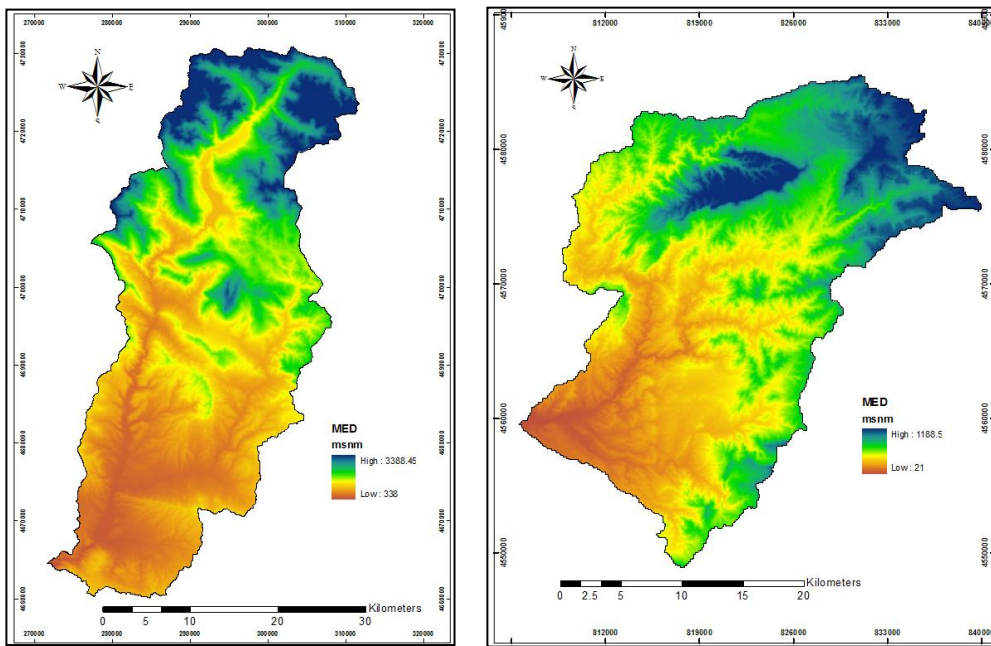
Cabe señalar que el método de estimación de los diferentes parámetros será implementado por medio de herramientas GIS.

6.1.1. Modelo de Elevación Digital (MED).

La distribución espacial de algunos parámetros requeridos en el modelo TETIS, se pueden obtener mediante operaciones cartográficas, a partir de información topográfica disponible. El mapa base para la descripción de las características físicas de la cuenca y de los fenómenos de la naturaleza que en ella se originan es el Modelo de Elevación Digital (MED), de cuya calidad depende la fiabilidad de la topología de la red de drenaje, deducida de algunos mapas derivados del mismo.

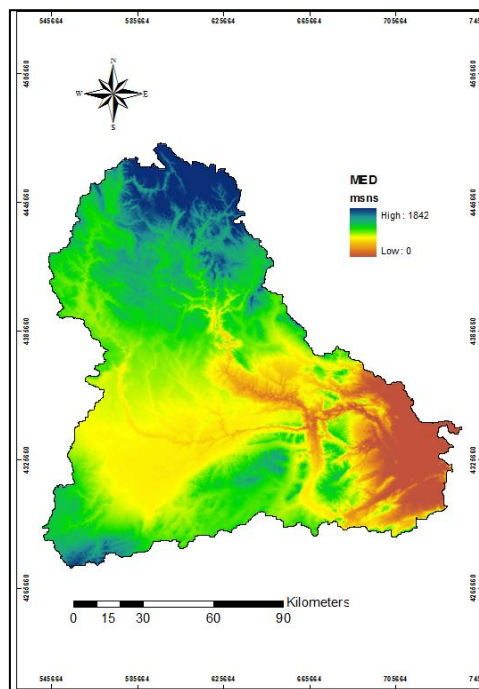
Para efectos de la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS, se ha tomado como mapa base el Modelo Digital del Terreno con tamaño de celda de 25 m adquirido a través de la página web del Instituto Geográfico Nacional. Los MED originales se han agregado a una resolución espacial de 100 x 100 m de tamaño de celda, para la cuenca del río Ésera y Siurana, para la del río Júcar de 500 x 500 m. Los respectivos tamaños de celdas se

consideran adecuados para el área de las cuencas a modelar y es acorde a los tiempos de cálculo necesarios en el proceso de calibración automática de los parámetros del modelo. Es importante señalar que todos los demás mapas de parámetros utilizados por el modelo tienen la misma resolución espacial en las respectivas cuencas. A continuación en la Figura 6.1 se presenta el MED para cada una de las cuencas.



(a)

(b)



(c)

Figura 6.1 MED para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana, y (c) Júcar.

6.1.2. Mapa derivado del uso del suelo.

La información base utilizada para caracterizar el uso del suelo es el mapa resultante del proyecto europeo CORINE del año 2006. Se dispone de un mapa CORINE del año 1990 y otro del año 2000, pero se ha decidido utilizar el del año 2006 por ser más reciente y porque se considera más representativo del periodo a simular.

Se ha decidido agrupar la variabilidad en que se suelen presentar los datos de usos del suelo en diferentes categorías, por un lado para simplificar la gran variedad de aprovechamientos que se le da al recurso del suelo, y por otro parte para respetar la reclasificación histórica que habitualmente se ha realizado en estas tierras, considerando en ambos casos que las categorías presentaron similares características desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico.

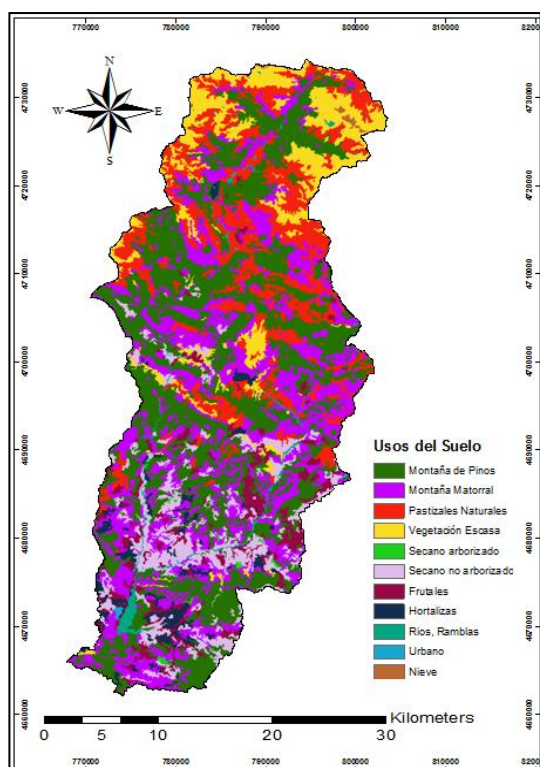
Esta clasificación se aplicará a las tres cuencas en estudio, teniendo en cuenta los cultivos y las categorías de vegetación natural predominantes de cada zona al momento de calcular la evapotranspiración. La clasificación queda conformada de la siguiente manera:

- i. *Montaña Matorral*: A esta categoría se le asignaron tres tipos de cobertura vegetal, matorral boscoso de transición, landas y matorrales y vegetación esclerófila, entre sus características predomina la totalidad del porcentaje de recubrimiento de la superficie sobre la que crecen.
- ii. *Montaña de Pino*: Además de la superficie de matorral se encuentra un estrato arbóreo habitualmente de pinos, y se ha querido hacer esta diferenciación por la importancia frente a la transferencia de agua mediante la evapotranspiración y la intercepción de agua al inicio de la lluvia. En esta categoría se incluye bosques de coníferas, bosques mixtos.

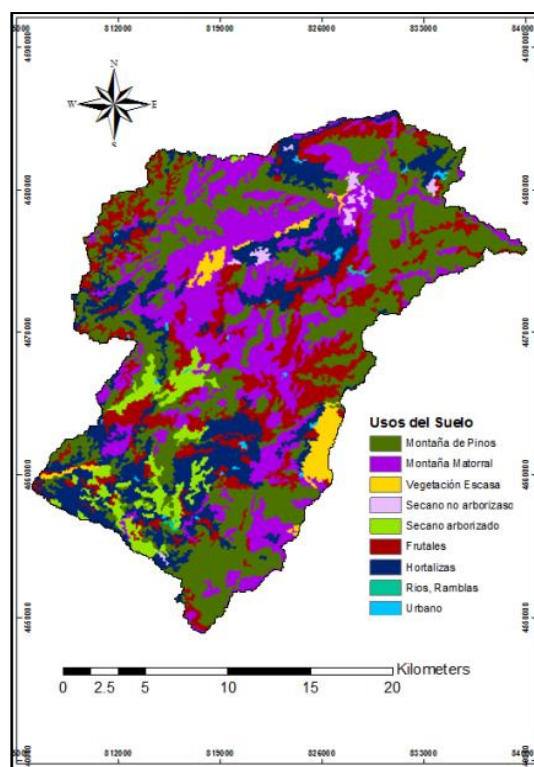
- iii. *Pastizales Naturales*: Dentro de esta categoría se incluye toda área cuya vegetación predominante consiste en hierbas y pastizales. Una de las características esenciales es que se desarrollan en latitudes medias donde existen variaciones climáticas a lo largo del año que determinan cuatro estaciones bien diferenciadas.
- iv. *Vegetación escasa*: Todo espacio que este ocupado por roquedo o donde no exista ningún tipo de vegetación.
- v. *Secano no arborizado*: En esta categoría sobresalen las zonas de secano que tienen cultivos herbáceos estacionales, con una cantidad de biomasa y porcentaje de recubrimiento de la superficie relativamente pequeña.
- vi. *Secano arborizado*: Predominan los cultivos donde su desarrollo se expande a lo largo de todo el año, reducido en invierno y su porcentaje de cobertura de la superficie es relativamente alto. Los cultivos de olivos y viñedos se han asignado a esta clasificación.
- vii. *Regadío*: Cultivos regados permanente o periódicamente, usando una infraestructura permanente (canales de riego, redes de drenaje). La mayoría de estos cultivos no pueden cultivarse sin un aporte artificial de agua.
- viii. *Frutales*: Parcelas plantadas con árboles frutales y terrenos principalmente agrícolas, especies frutales simples o mezcladas, árboles frutales asociados con superficies de pastos permanentes.
- ix. *Hortalizas*: Tierras dedicadas al cultivo tradicional de verduras y hortalizas. Suelen ser cultivos estacionales con poco desarrollo de biomasa y que habitualmente sólo cubren un pequeño porcentaje del terreno sobre el que están cultivadas. En esta categoría se encuentran las áreas determinadas como mosaico de cultivos.
- x. *Ríos y Ramblas*: En esta categoría se incluye toda superficie de agua como, ríos, ramblas, lagos, etc.
- xi. *Urbano*: La mayor parte del suelo está cubierta de estructuras asociada con tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo, zonas en construcción, zonas de extracción minera, zonas industriales o comerciales, red de transporte, etc.

xii. *Nieve*: Toda zona que este recubierta por glaciares y nieve permanente.

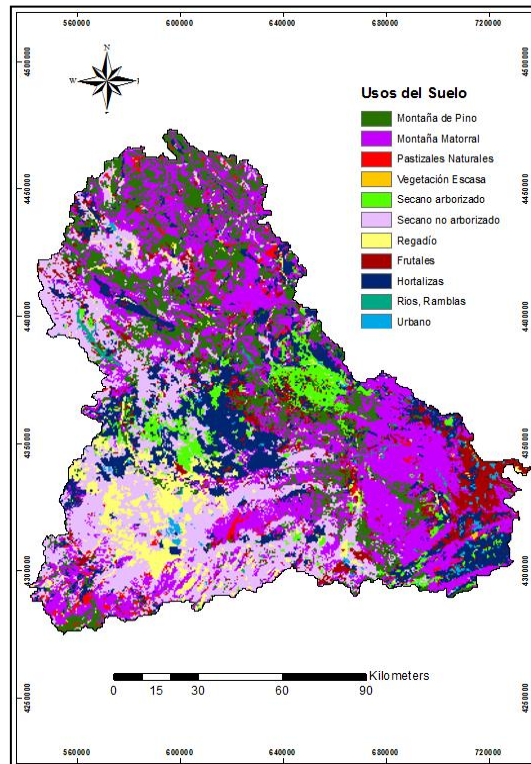
A continuación en la Figura 6.2 se presentan los mapas que muestran la variabilidad espacial del aprovechamiento del suelo y en la Figura 6.3 la distribución porcentual de la superficie según el uso de suelo, para cada una de las cuencas.



(a)

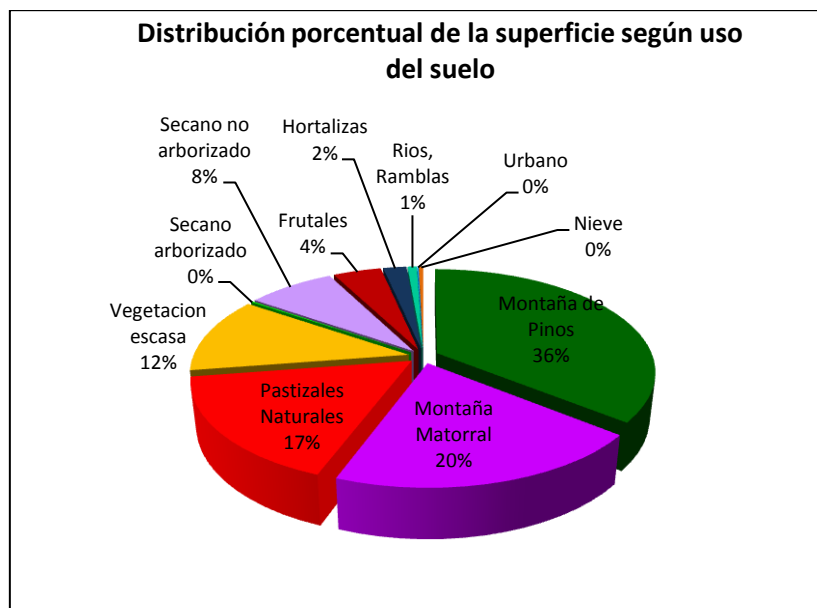


(b)

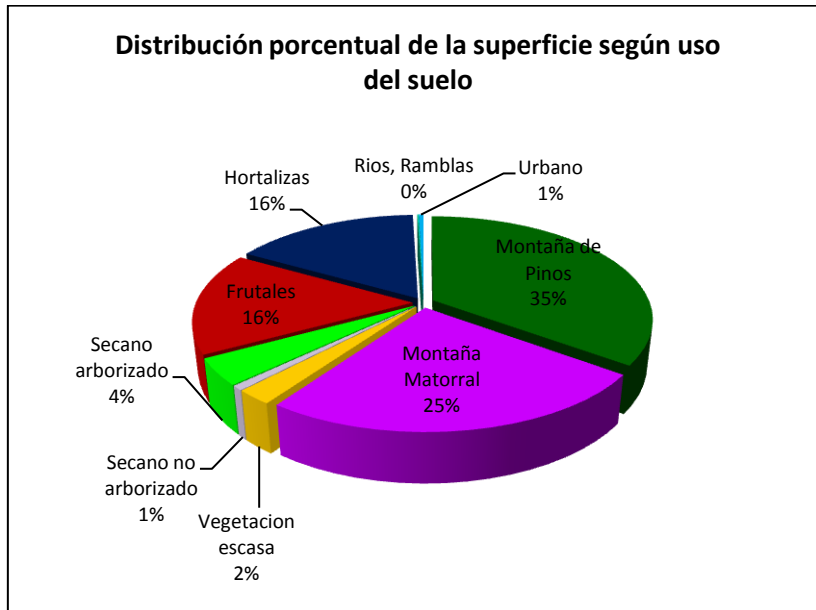


(c)

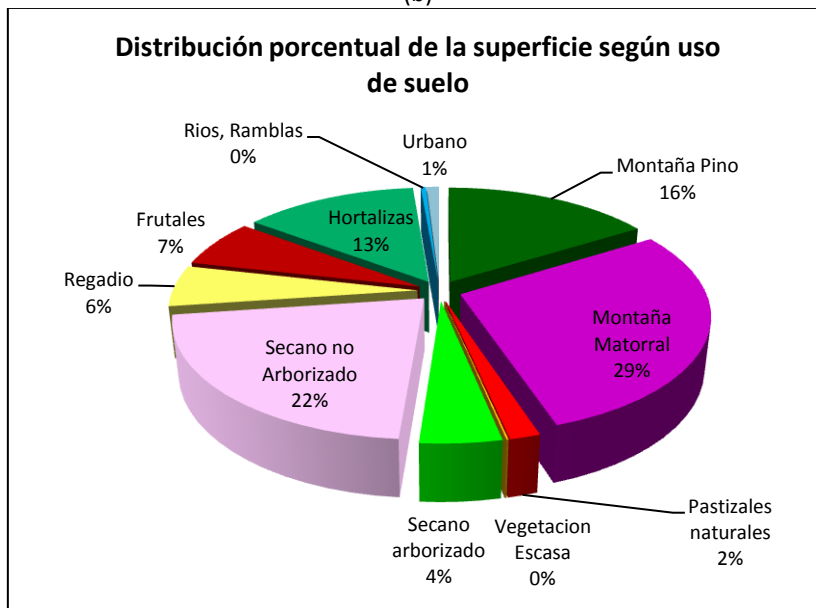
Figura 6.2 Variabilidad espacial del aprovechamiento del suelo. Cuencas hidrológicas: (a) Ésera, (b) Siurana, (c) Júcar.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.3 Distribución porcentual de la superficie según el uso o cobertura del suelo. (a) Ésera, (b) Siurana, (c) Júcar.

Según la distribución porcentual en las cuencas del río Ésera y Siurana coincide que el mayor porcentaje de cobertura vegetal es el correspondiente a montaña matorral y montaña de pino. A diferencia de las anteriores cuencas, en la de Júcar predominan los cultivos correspondientes a herbáceos estacionales, es decir los que se encuentra dentro de la categoría de secano no arborizado. Otros cultivos que también son destacables pero que se

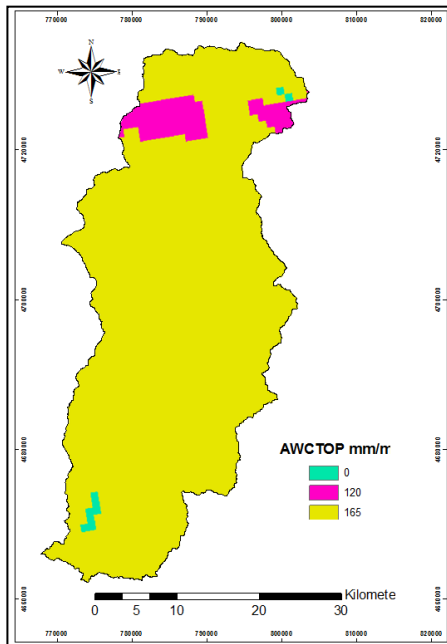
encuentran en un menor porcentaje respecto a los anteriores son las hortalizas y frutales. Finalmente el porcentaje menos significativo es el correspondiente a las clases urbano, ríos y ramblas.

6.1.3. Mapas derivados del suelo.

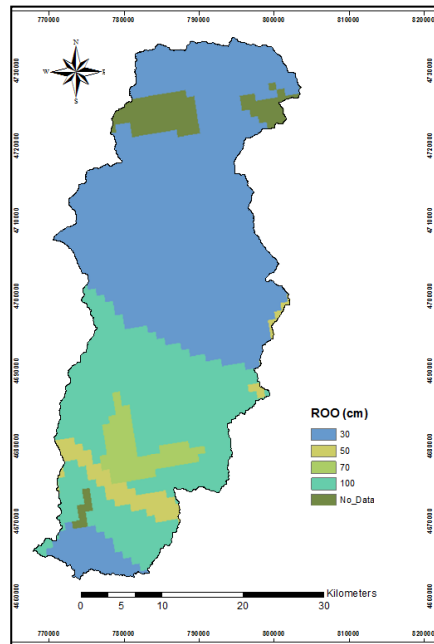
Para la caracterización edafológica de la cuenca y la estimación de las características hidráulicas de los suelos, se ha tomado como fuente de información la Base de datos de Suelo Europea (ESDB), considerando los atributos relacionados con la capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_TOP) y obstáculo de raíces (ROO). El valor de estos atributos está expresado cualitativamente y con una respectiva confianza, por lo tanto se ha tomado el valor medio del rango para hacer una reclasificación con los valores relacionados en la Tabla 6.2. Finalmente se obtuvieron los mapas que se ilustran en la Figura 6.4 para cada una de las cuencas en estudio.

Tabla 6.2 Reclasificación Mapas: Capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_TOP) y Obstáculo de raíces (ROO).

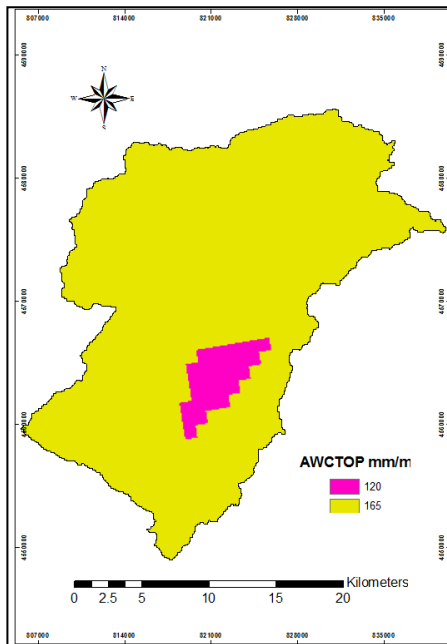
Capacidad de agua disponible capa superior del suelo- AWC_TOP (mm/m)	Reclasificación (mm/m)
Baja (<100mm/m)	80
Media (100-140 mm/m)	120
Alta (140-190 mm/m)	165
Muy Alta (>190 mm/m)	200
Obstáculo de raíces –ROO (cm)	Reclasificación (cm)
>80	100
60-80	70
40-60	50
20-40	30



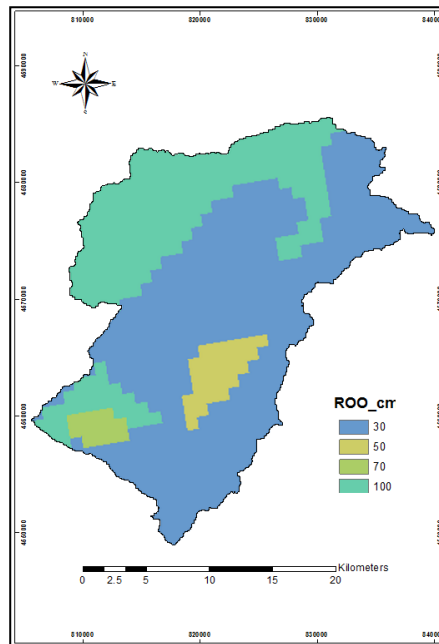
AWC_TOP (mm/m). Cuenca río Ésera



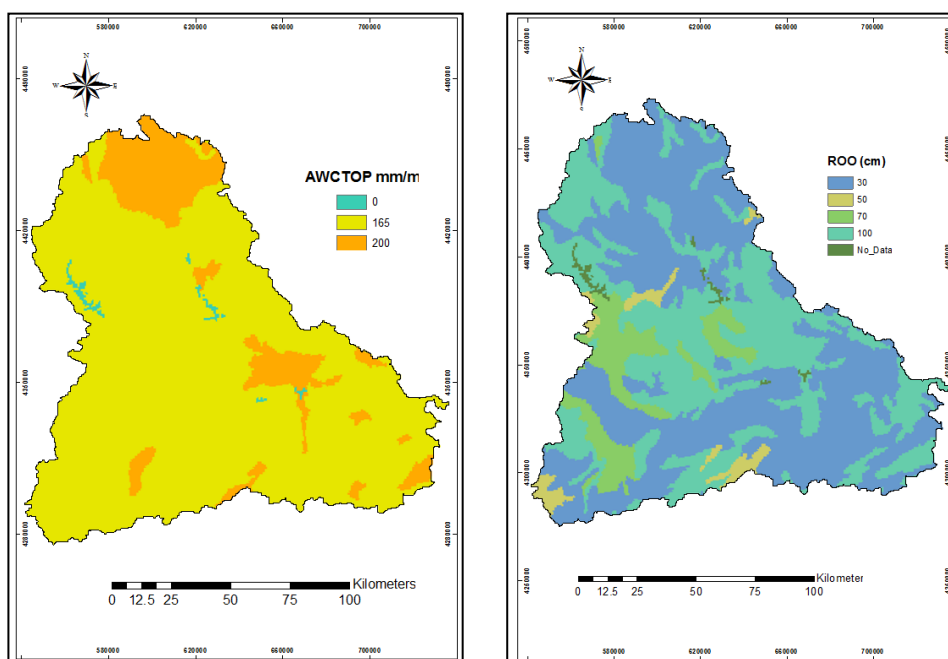
ROO (cm). Cuenca río Ésera



AWC_TOP (mm/m). Cuenca río Siurana



ROO (cm). Cuenca río Siurana



AWC_TOP (mm/m). Cuenca río Júcar

ROO (cm). Cuenca río Júcar

Figura 6.4 Mapas AWC_TOP y ROO derivados de la ESDB.

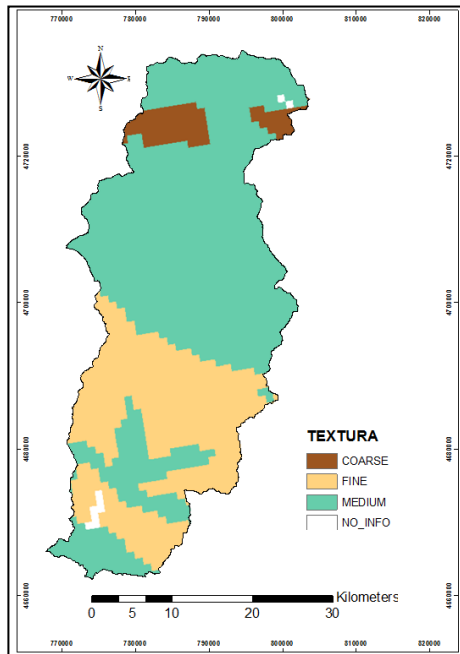
6.1.4. Mapa derivado de la textura del suelo.

Otra capa adicional de información de suelos disponible para el estudio hidrológico es una clasificación cualitativa de la textura del suelo de carácter global llamada Textura Superficial Dominante (TEXT-SRF-DOM), tomada de la Base de datos de Suelo Europea (ESDB). En esta capa los suelos presentes están clasificados en seis categorías de textura que hacen referencia al tamaño medio de la granulometría, que corresponden a las clases texturales muy fina, fina, media-fina, media, gruesa y textura no mineral como se indica en la Tabla 6.3. En la Figura 6.5 se presenta el mapa de clasificación textural de los suelos para cada una de las cuencas en estudio.

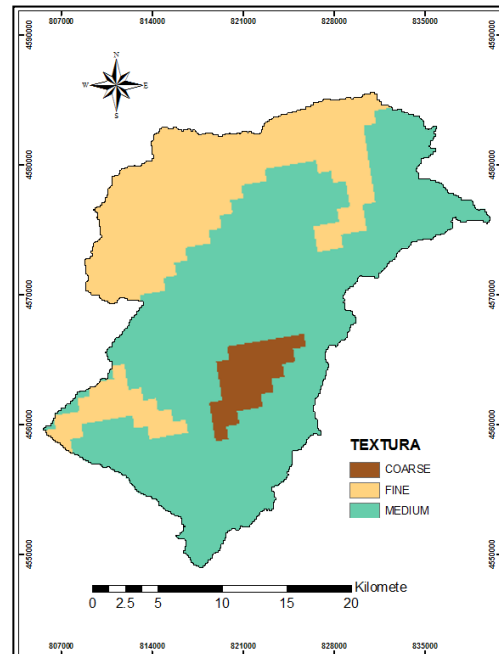
Tabla 6.3 Clasificación y descripción de la textura del suelo.

Textura del Suelo	Descripción
Textura no mineral	Suelos de turba.
Gruesa	Arcilla < 18%; Arena > 65%.
Media	Arcilla entre 18-35% y arena >= 15%, o arcilla < 18% y arena entre 15-65%.
Media - Fina	Arena < 15%; Arcilla < 35%

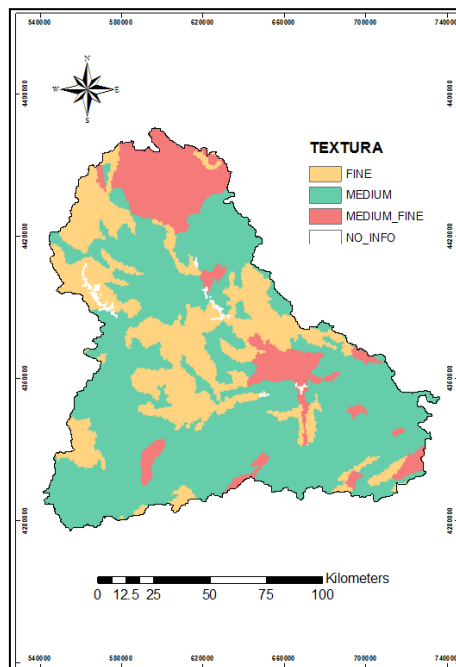
Fina	% Arcilla entre 35-60%
Muy fina	% Arcilla > 60%.



(a)



(b)



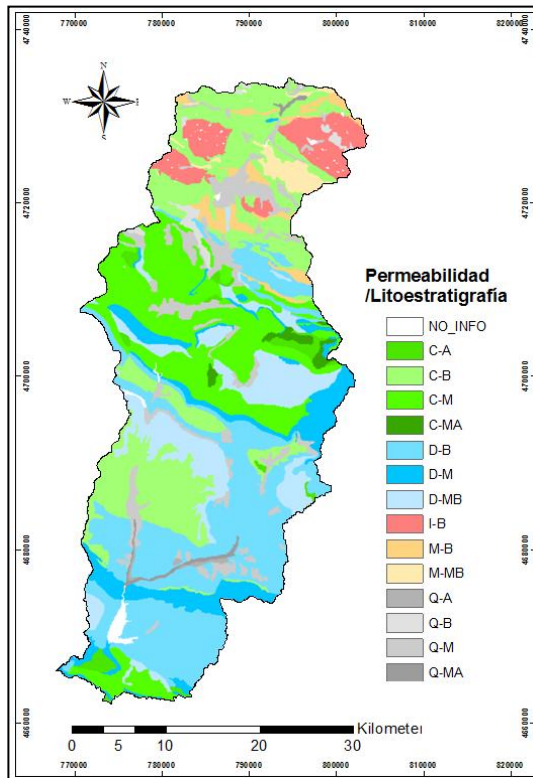
(c)

Figura 6.5 Mapa TEXT-SRF-DOM derivado de la ESDB.

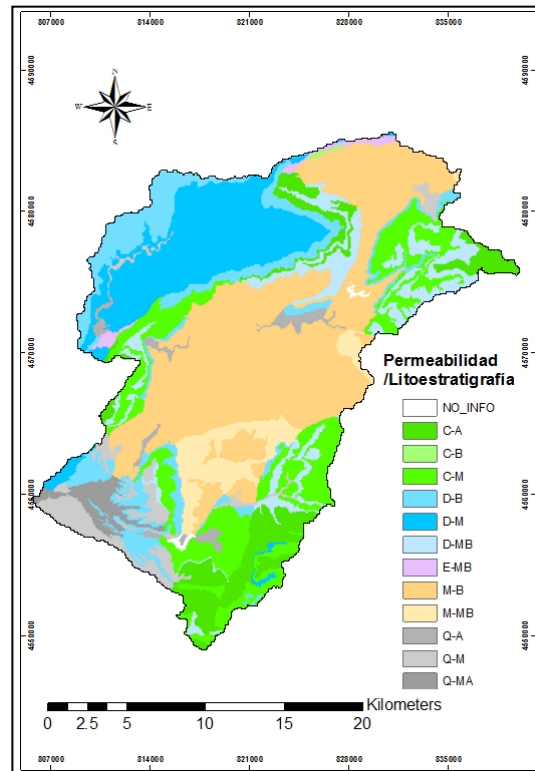
Según la Figura 6.5 en términos generales se puede decir que en la cuenca del río Ésera y Siurana predominan suelos con textura fina, media y gruesa, esta última en un menor porcentaje, lo que indica que existen suelos arcillosos, suelos francos y suelos arenosos con respectiva clase textural: arcilloso arenoso, arcilloso limoso, arcilloso; franco, franco limoso, limoso; arenoso y franco arenoso. En la cuenca del río Júcar también predominan suelos con textura fina y media, pero a diferencia de las otras cuencas existen suelos con textura media-fina, es decir, suelos francos con clase textural franco limoso arcilloso y arcilloso arenoso.

6.1.5. Mapa derivado de la litología y la permeabilidad del substrato rocoso.

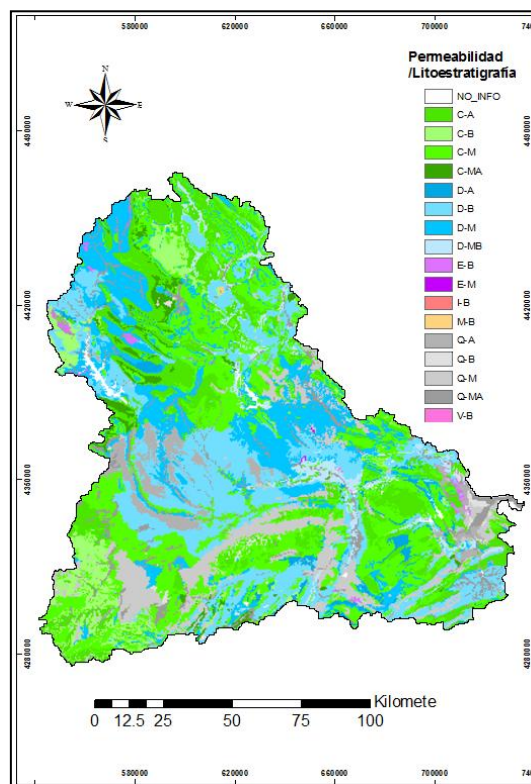
Con miras a la parametrización de la componente hidrogeológica del modelo TETIS, se dispone de un mapa de categorías cualitativas de permeabilidad del substrato rocoso a escala 1:200.000, realizado a partir del Mapa Litoestratigráfico de España, definido por el Instituto Geológico y Minero de España –IGME con criterios hidrogeológicos. Las categorías cualitativas de permeabilidad del substrato rocoso asociadas a las diferentes unidades litológicas, está clasificada en cinco tipos de permeabilidad: Muy alta (MA), Alta (A), Media (M), Baja (B), Muy baja (MB) y siete grupos de litologías: Carbonatadas (C), Detríticas (D), Detríticas del cuaternario (Q), Volcánicas (V), Metadetríticas (M), Ígneas (I) y Evaporíticas (E). En la Figura 6.6 se presenta la clasificación para las cuencas en estudio.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.6 Mapa de permeabilidades asociado a cada unidad litológica en la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

6.2. Parámetros espaciales para el modelo TETIS.

A partir de la información disponible de las características físicas de la cuenca y utilizando herramientas de *ArcGis* se obtendrán los parámetros espaciales para el modelo TETIS, algunos de estos basados en referencias bibliográficas y otros en estudios realizados anteriormente. A continuación se describen el procedimiento para la obtención de cada uno de estos parámetros.

6.2.1. Parámetros derivados del Modelo de Elevación Digital (MED).

Los mapas derivados del MED, que representan las características geomorfológicas de las cuencas y relaciones topológicas en la red de drenaje, necesarios en el modelo TETIS son:

- Mapa de pendientes.
- Mapa de velocidad del flujo en la ladera.
- Mapa de direcciones de flujo.
- Mapa de celdas acumuladas.

El mapa de pendientes y el mapa de velocidad del flujo en ladera son importantes para el proceso de propagación de la onda de crecida, por su parte el de direcciones de flujo y celdas acumuladas son indispensables para extraer el contorno de la cuenca hasta cualquier punto de interés sobre la red de drenaje.

Para la velocidad del flujo se consideran distintas posibilidades. Una de ellas es asumir que la velocidad es estacionaria y constante sobre toda la cuenca y determinar cómo parámetro del modelo un valor entre 1 y 0.01 m/s. Otra posibilidad es definir que la velocidad del flujo es estacionaria pero diferente en las distintas celdas de acuerdo a la pendiente S_0 . Por lo tanto, el mapa de velocidad del flujo en la ladera se ha estimado a partir del mapa de pendiente utilizando la siguiente expresión:

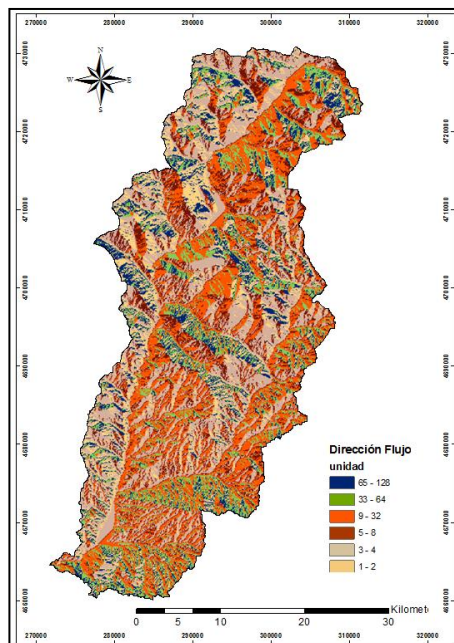
$$V_l = 1.4142 \cdot S_0^{0.5} \quad (6.1)$$

donde,

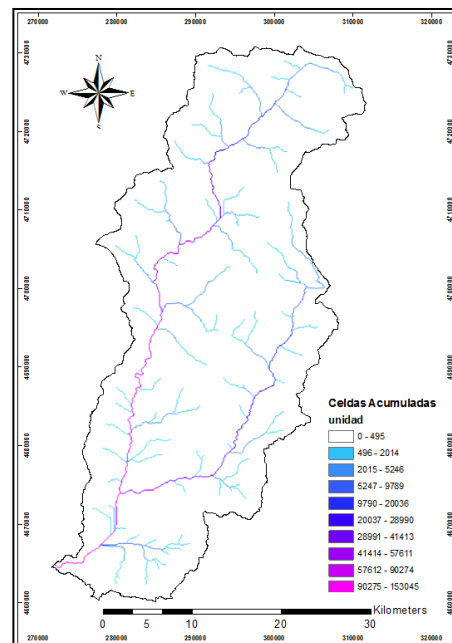
V_f = Velocidad de flujo en la ladera, m/s.

S_0 = Pendiente del terreno, m/m

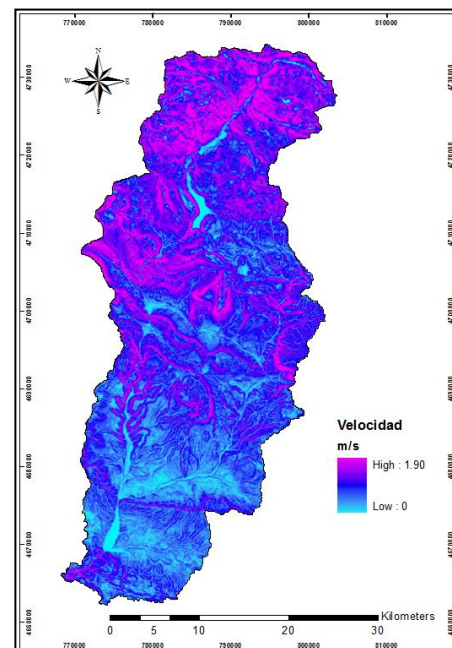
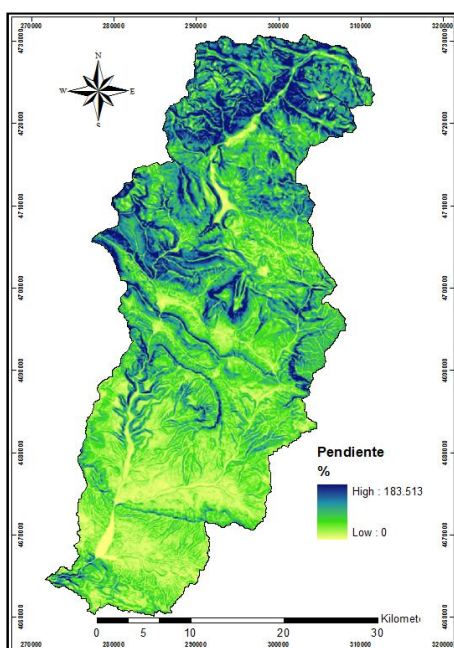
En la Figura. 6.7, 6.8 y 6.9 se presentan los mapas derivados de la topografía para cada una de las cuencas en estudio, basándonos en el MED procesado o “hidrológicamente correcto”, es decir, garantizando la conectividad y el drenaje de todas las celdas hacia la salida.



Mapa de direcciones de flujo



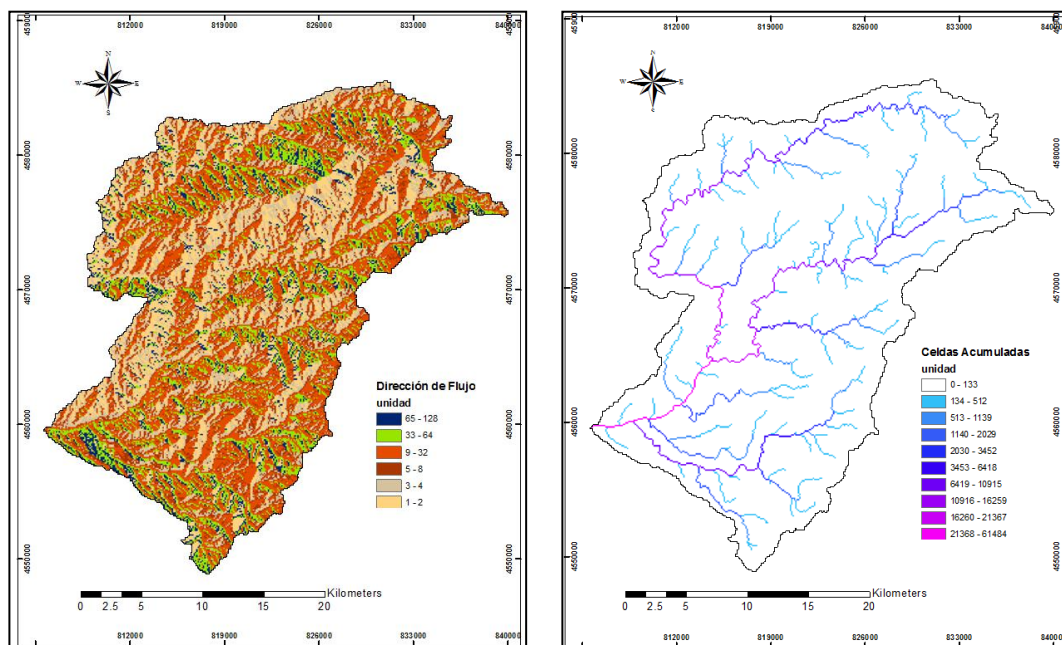
Mapa de celdas acumuladas



Mapa de pendiente

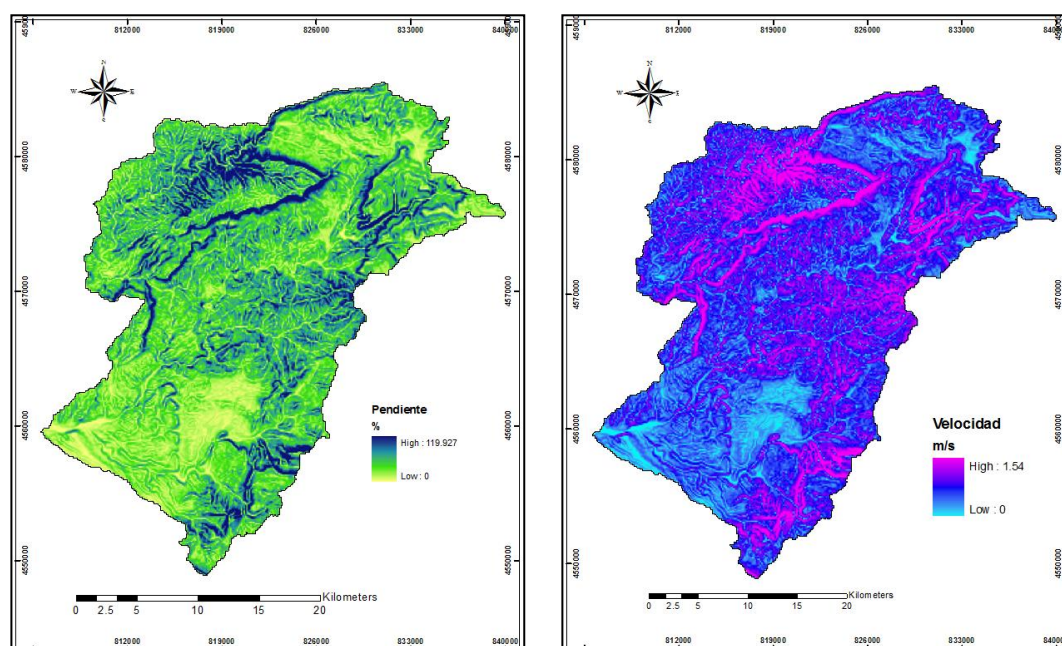
Mapa de velocidad del flujo en ladera

Figura 6.7 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Ésera.



Mapa de direcciones de flujo

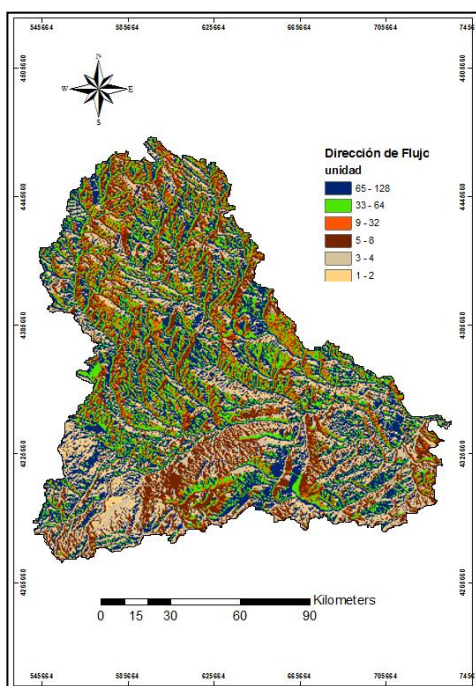
Mapa de celdas acumuladas



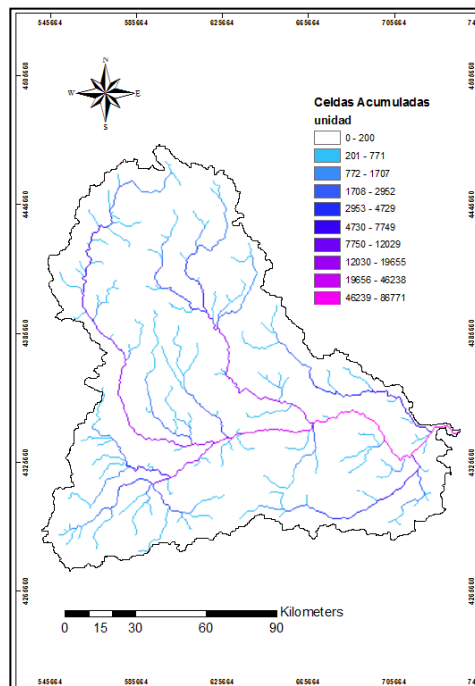
Mapa de pendiente

Mapa de velocidad del flujo en ladera

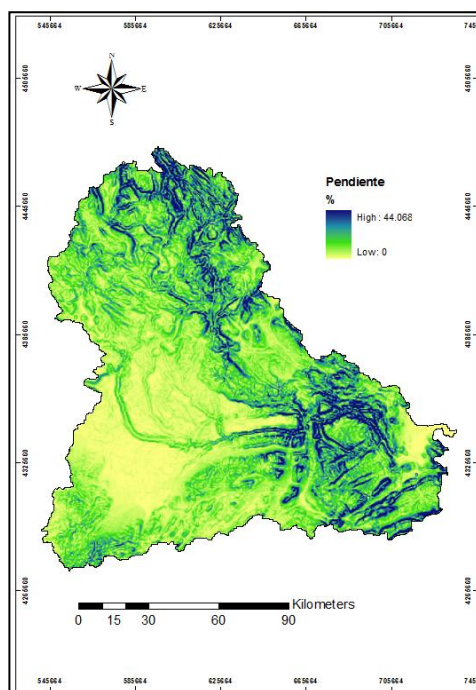
Figura 6.8 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Siurana.



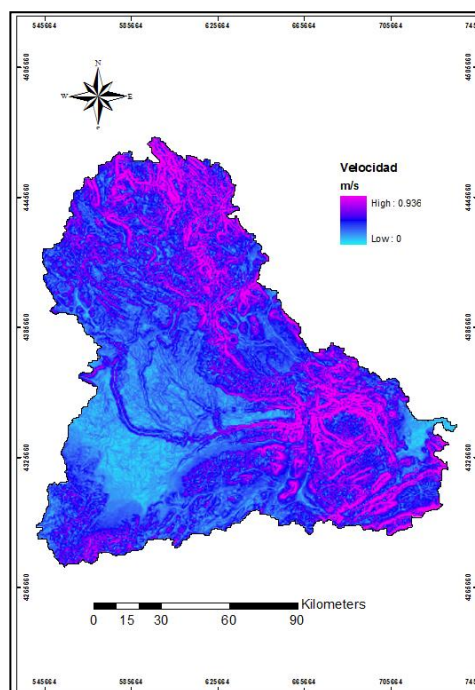
Mapa de direcciones de flujo



Mapa de celdas acumuladas



Mapa de pendiente



Mapa de velocidad del flujo en ladera

Figura 6.9 Parámetros derivados del MED en la Cuenca del río Júcar.

En el mapa de pendientes de todas las cuencas en estudio los colores azules indican altas pendientes, en su mayoría concentradas en la cabecera de la cuenca, para el caso del Ésera, zona alta y media para el Siurana y en la cuenca del río Júcar en la cabecera y zona cercana a la desembocadura, pero con un porcentaje mucho menor comparados con las anteriores cuencas. Los colores verdes indican pendientes fuertes pero más moderadas, cubriendo zonas significativas en la parte alta y media de las tres cuencas en estudio. Finalmente las pendientes más bajas, representadas en color amarillo, se dan en la parte baja del Ésera y Siurana, igual que en el Júcar, pero en ésta última predomina un porcentaje de pendiente bajo al suroeste de la cuenca.

6.2.2. Parámetros derivados del mapa de coberturas vegetales.

6.2.2.1. Factor de vegetación para el cálculo de la evapotranspiración.

El índice de vegetación para la modelación de la evapotranspiración se obtiene según la dinámica propia de cada tipo de cobertura superficial, a partir del mapa de usos de suelo, y representa la variabilidad en magnitud y distribución temporal de la evapotranspiración.

Para conocer la evapotranspiración del cultivo, además de la evapotranspiración de referencia se necesita conocer un segundo factor, el coeficiente de cultivo ó K_c . En el presente trabajo se utiliza el factor de cultivo sugerido por Bras (1978), que se llamará factor de vegetación, ya que no se evaluarán solo cultivos sino todo tipo de coberturas.

Este factor mide la contribución del propio cultivo sobre las necesidades hídricas del mismo. Depende del tipo de cultivo (altura, grado de cobertura del suelo), desarrollo del mismo (fecha de cosecha) y del clima. El procedimiento más extendido para calcular el factor de vegetación es el propuesto por la FAO, a través de su Documento No.56 Estudio FAO Riesgo y Drenaje, "Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Este procedimiento propone, en primer lugar, determinar la duración de cuatro fases de crecimiento (Figura 6.10).

- Fase inicial. Dura desde la siembra hasta que el cultivo alcanza un 10% del suelo cubierto por las hojas.
- Fase de desarrollo del cultivo. Desde el final de la anterior hasta que el cultivo alcanza el 70-80% de suelo cubierto.
- Fase media. Hasta el comienzo de la maduración.
- Fase final. Hasta recolección.

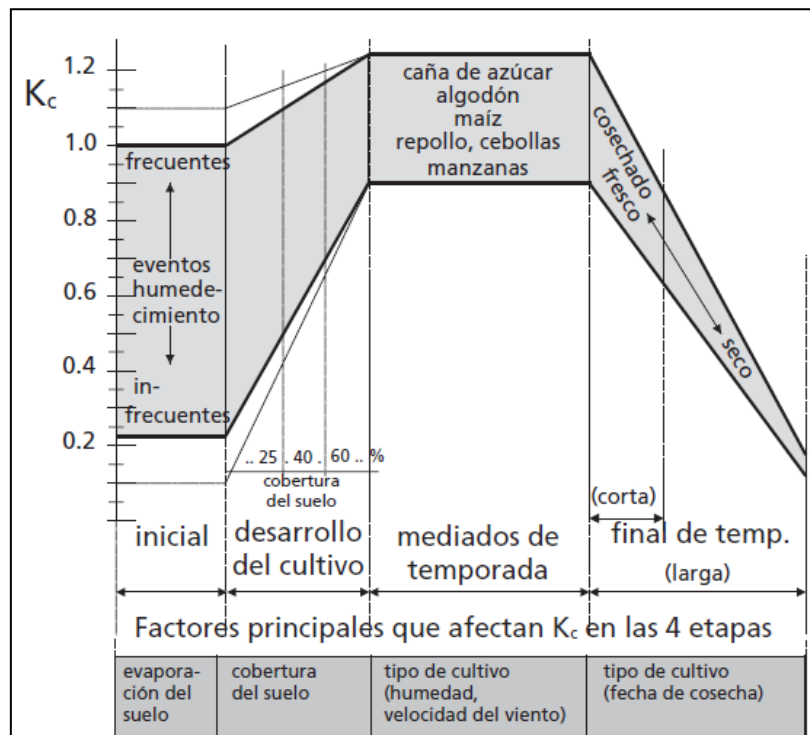


Figura 6.10 Rangos típicos esperados del valor de K_c para las cuatro etapas del crecimiento.
(Allen et al., 2006)

En la fase inicial, K_c depende de ET_0 y la frecuencia de riego o lluvias. Es fácil pensar que cuando el cultivo es pequeño y cubre poco el suelo, si éste está húmedo por lluvia o riego la evaporación será alta, pero disminuirá cuando se seque. Conforme el suelo se va cubriendo, el factor de vegetación y la ET van aumentando. No es fácil elegir un K_c en esta primera fase, ya que las lluvias suelen ser muy variables. La duración de las diferentes fases depende de la velocidad de desarrollo, la cual a su vez depende de la temperatura, además es determinante la fecha de siembra. Para las tres últimas fases existen tablas publicadas de valores de K_c que deben adaptarse a la curva definida en la Figura 6.10.

La variabilidad de los factores de vegetación se estudia de manera amplia en el campo de la ingeniería agronómica, más que todo para determinar las necesidades hídricas para el regadío de los aprovechamientos agrícolas (Escrivà, 2006). Por lo tanto la mayoría de la información que se ha podido consultar sobre los factores de vegetación está enfocada para los diferentes tipos de cultivos agrícolas más extendidos, lo que nos lleva a determinar en primera medida los factores mensuales de evapotranspiración para las superficies cultivadas, y luego pasar a determinar las de las zonas no agrícolas mediante hipótesis coherentes.

- Superficies cultivadas cuenca del río Ésera.

De las clases de uso definidas en el apartado 6.1.2, se aplica a continuación la metodología de la FAO para las tierras dedicadas al cultivo.

i. Hortalizas. Con cuatro tipos de cultivo significativos de la clase Hortaliza que se cultivan en la cuenca del río Ésera como son: cebolla, melón, judías verdes y lechuga, se calcularán sus curvas de variación temporal a partir de las longitudes de sus etapas de desarrollo y del factor de vegetación que se define en el documento de la FAO. Estos datos se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

Cebolla			Melón		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	15	0.7	Inicial	25	0.5
Desarrollo de cultivo	25	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	35	Crecimiento
Mediados de temporada	70	1.05	Mediados de temporada	40	1.05
Final de temporada	40	0.75	Final de temporada	20	0.75
Total	150		Total	120	
Fecha de Siembra	Abril		Fecha de Siembra	Mayo	
Judías Verdes			Lechuga		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	20	0.5	Inicial	20	0.7

Desarrollo de cultivo	30	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	30	Crecimiento
Mediados de temporada	30	1.05	Mediados de temporada	15	1
Final de temporada	10	0.9	Final de temporada	10	0.95
Total	90		Total	75	
Fecha de Siembra	Feb/Marzo		Fecha de Siembra	Abril	

Con la tendencia de variación que se muestra en la Figura 6.10, se presenta a continuación, en la Figura 6.11, la representación de la variabilidad asociada a cada uno de los tipos de cultivos elegidos.

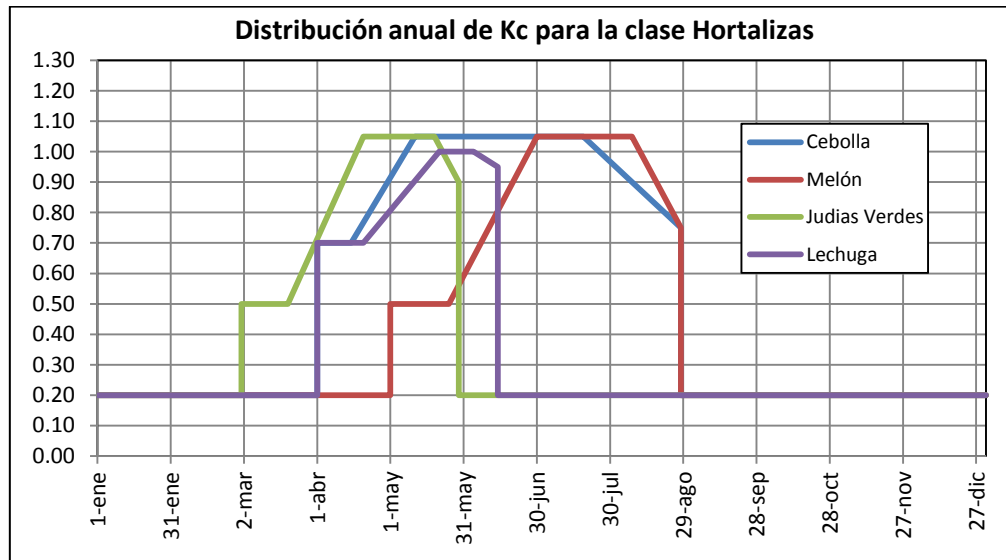


Figura 6.11 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

Con estos datos se determinan las medias mensuales de cada uno de los factores de vegetación distribuidos anualmente. Una vez se dispone de estos datos, se extrae la media de los cuatro tipos de cultivo y se obtiene el factor de vegetación mensual distribuido anualmente para la clase Hortaliza (Figura 6.12).

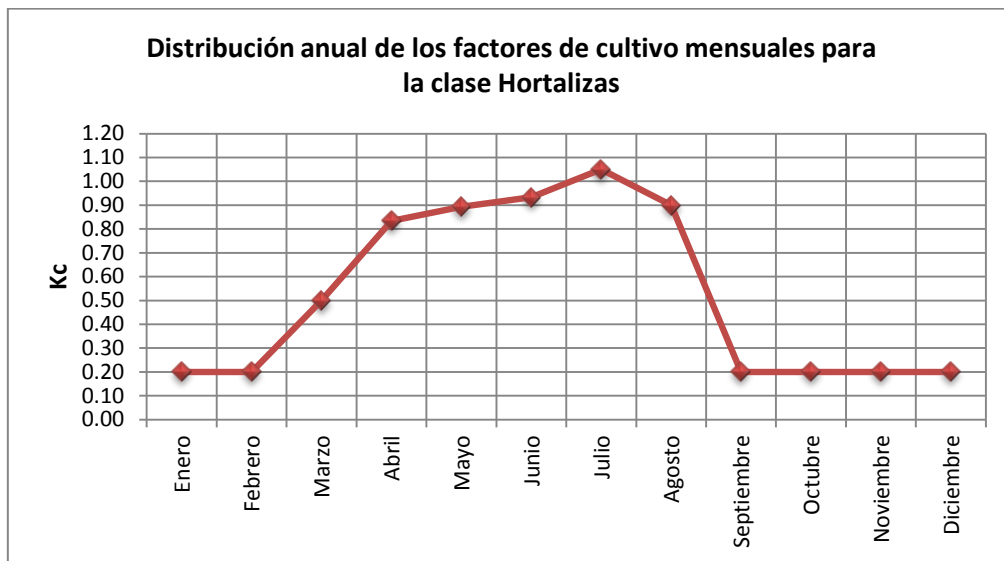


Figura 6.12 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.

ii. *Frutales*. En esta clase se ha tenido en cuenta dos cultivos de frutas predominantes en la zona de estudio, melocotón y manzana. Siguiendo la metodología explicada en el apartado anterior, a continuación en la Tabla 6.5 se presenta los datos correspondientes a la longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Frutales y las respectivas graficas de distribución anual de K_c (Figura 6.13 y 6.14).

Tabla 6.5 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Frutales.

Melocotón			Manzana		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	20	0.8	Inicial	20	0.8
Desarrollo de cultivo	70	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	70	Crecimiento
Mediados de temporada	90	0.95	Mediados de temporada	90	0.9
Final de temporada	30	0.85	Final de temporada	30	0.85
Total	210		Total	210	
Fecha de Siembra	Marzo		Fecha de Siembra	Marzo	

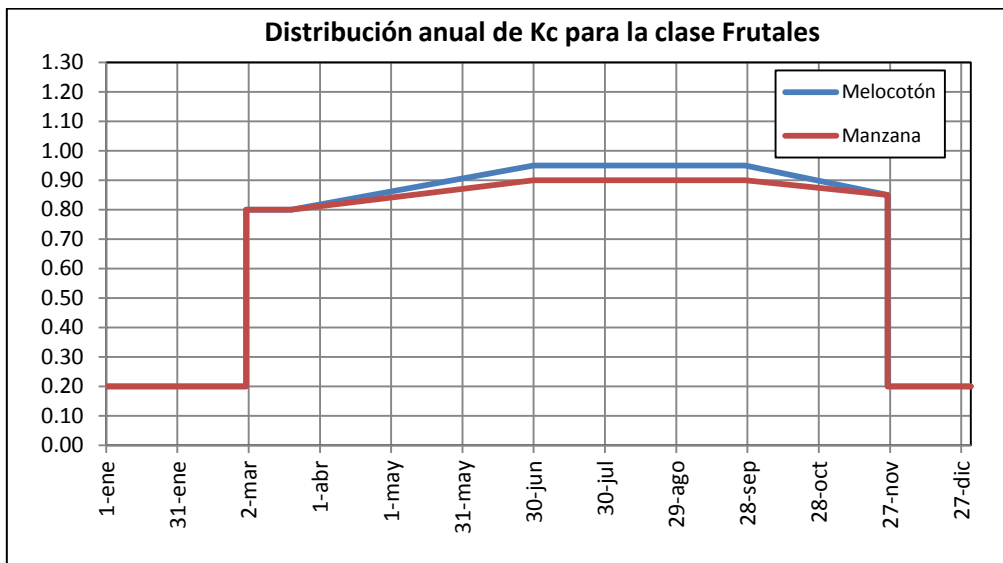


Figura 6.13 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Frutales.

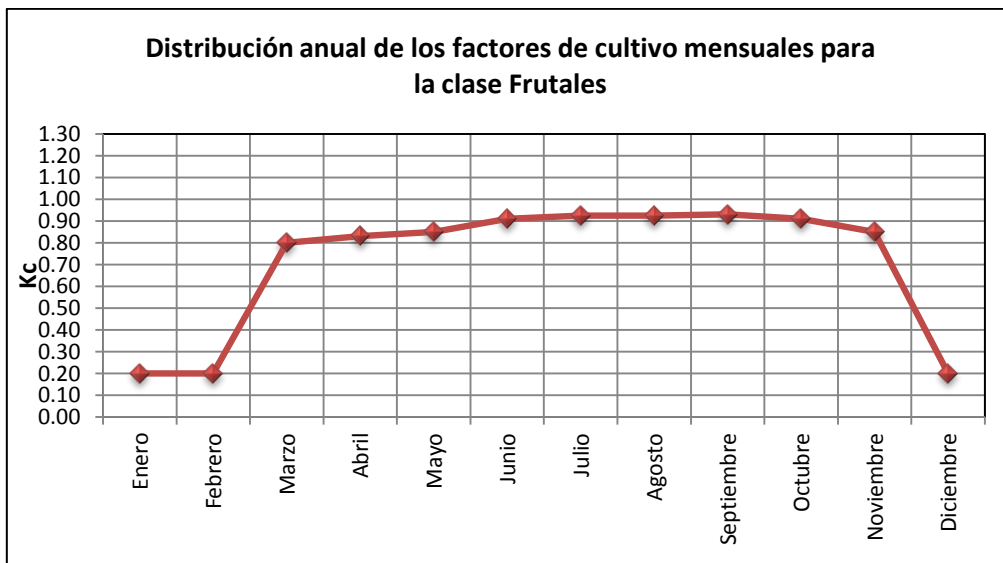


Figura 6.14 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.

iii. *Secano no arborizado*. Para esta clase se ha trabajado con tres de las especies que se cultivan en las tierras de secano no arborizado como son el trigo, el girasol y la alfalfa. Se procedió del mismo modo que en los anteriores apartados, determinando la distribución anual, obteniendo las medias mensuales de cada uno de los cultivos, y finalmente el promedio de los tres cultivos.

Tabla 6.6 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Secano no arborizado.

Trigo			Girasol		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	20	0.3	Inicial	25	0.35
Desarrollo de cultivo	25	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	35	Crecimiento
Mediados de temporada	60	1.15	Mediados de temporada	45	1.075
Final de temporada	30	0.325	Final de temporada	25	0.35
Total	135		Total	130	
Fecha de Siembra	Marzo/Abril		Fecha de Siembra	Abril/Mayo	

Alfalfa		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	10	0.4
Desarrollo de cultivo	20	Crecimiento
Mediados de temporada	20	0.5
Final de temporada	10	0.5
Total	60	
Fecha de Siembra	Enero/Abril	

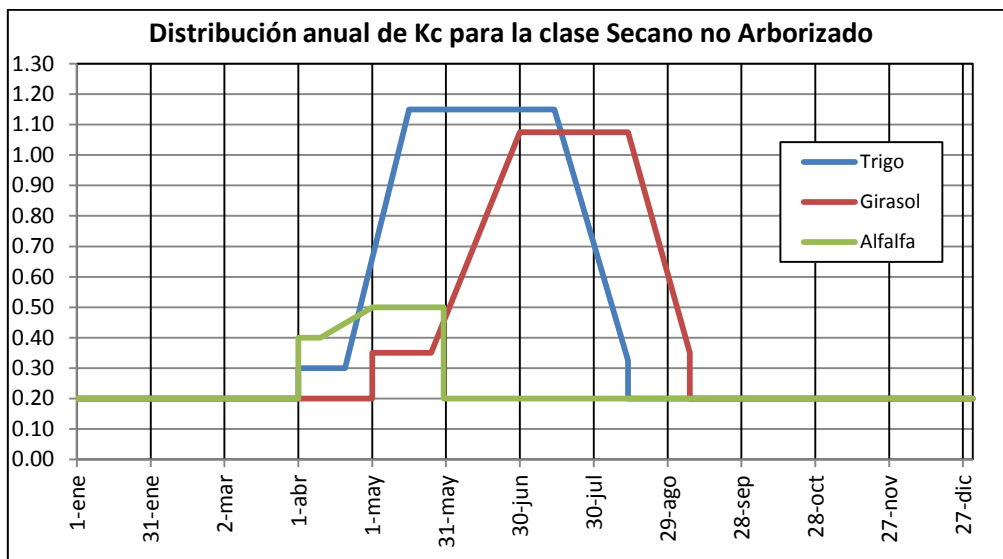


Figura 6.15 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Secano no arborizado.

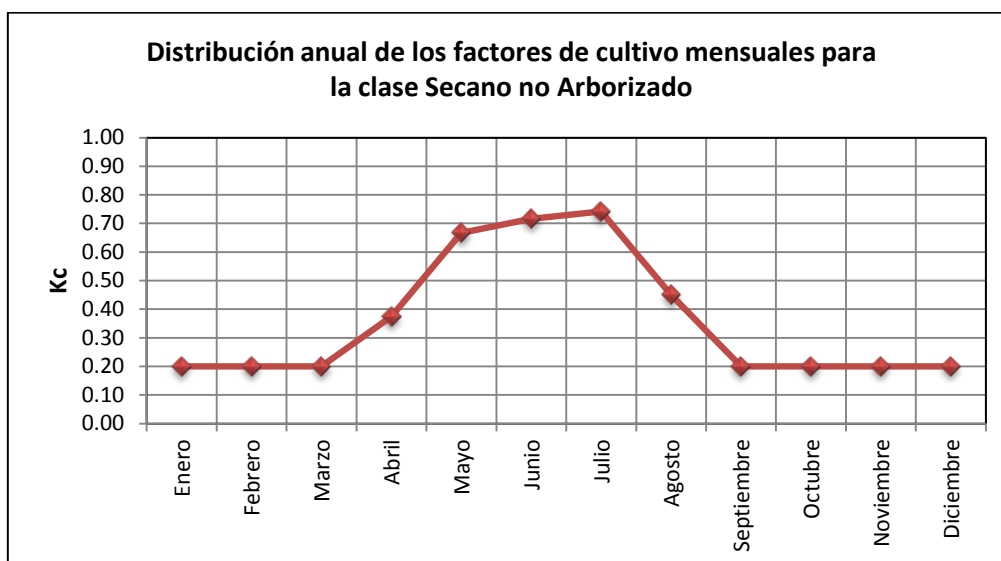


Figura 6.16 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Secano no arborizado.

iv. *Secano arborizado*. En esta clase se han considerado dos tipos de cultivos que predominan en la zona de estudio, olivos y viñedos. Se procederá del mismo modo que en los apartados anteriores.

Tabla 6.7 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Secano arborizado.

Olivos			Viñedos		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	30	0.65	Inicial	30	0.3
Desarrollo de cultivo	90	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	60	Crecimiento
Mediados de temporada	60	0.7	Mediados de temporada	40	0.7
Final de temporada	90	0.7	Final de temporada	80	0.45
Total	270		Total	210	
Fecha de Siembra	Marzo		Fecha de Siembra	Abril	

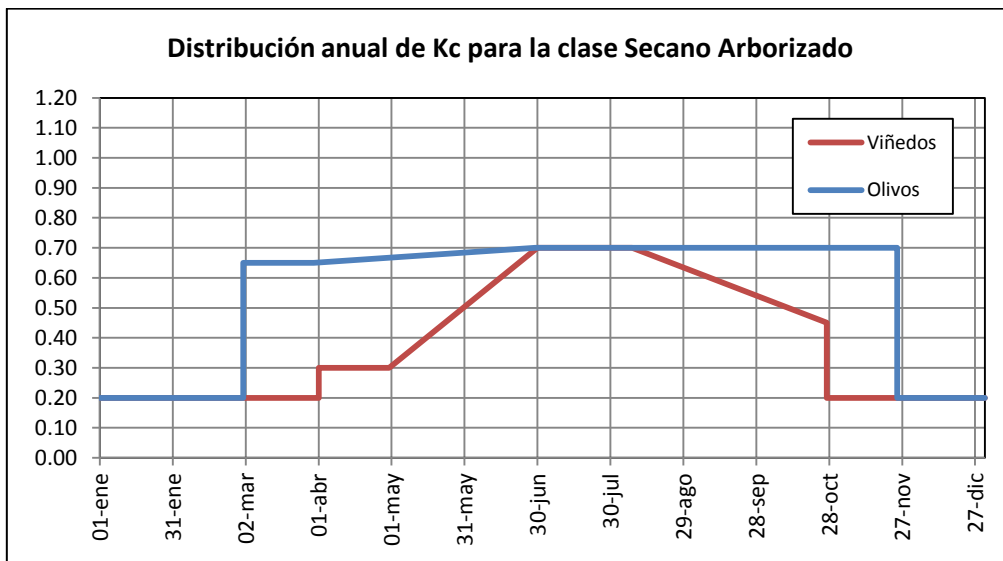


Figura 6.17 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Secano arborizado.

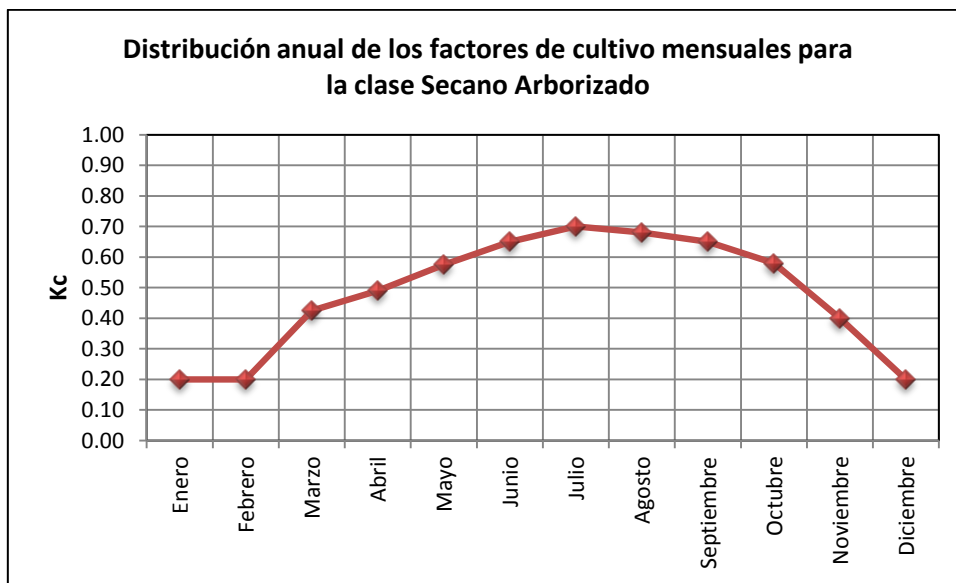


Figura 6.18 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Secano arborizado.

- Superficies no cultivadas cuenca del río Ésera.

Como ya se ha comentado anteriormente, los factores de vegetación para el cálculo de la evapotranspiración están muy estudiados en el campo de la agronomía, pero no se han encontrado suficientes referencias bibliográficas sobre factores de vegetación de zonas no cultivadas, por lo tanto se tratará de suponer una variabilidad temporal similar a la desarrollada en la metodología

de la FAO, pero los valores serán supuestos bajo hipótesis que se explican más adelante.

i. Montaña de matorral. Las superficies que se han definido como montaña de matorral son espacios con variedad de especies no arbóreas, que suelen cubrir prácticamente la totalidad de la superficie en la que se distribuyen, y que se desarrollan a lo largo de todo el año alcanzando su máximo crecimiento en verano. Por lo tanto, tomando como referencia la variabilidad temporal con la que se han determinado los apartados anteriores, y suponiendo que su evapotranspiración se puede comparar en cierto modo a la del secano no arborizado, aunque con unos valores sensiblemente mayores por la mayor cobertura del suelo, y que su desarrollo se distribuye a lo largo de todo el año, la variabilidad temporal que se tomará es la que se presenta en la Tabla 6.8 y se grafica en la Figura 6.19, en la Figura 6.20 se presenta los factores de vegetación mensuales que finalmente se usan en la modelación.

Tabla 6.8 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para la clase Montaña de matorral.

Montaña de matorral		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	60	0.6
Desarrollo de vegetación	90	Crecimiento
Verano	120	0.8
Otoño	95	0.6
Total	365	

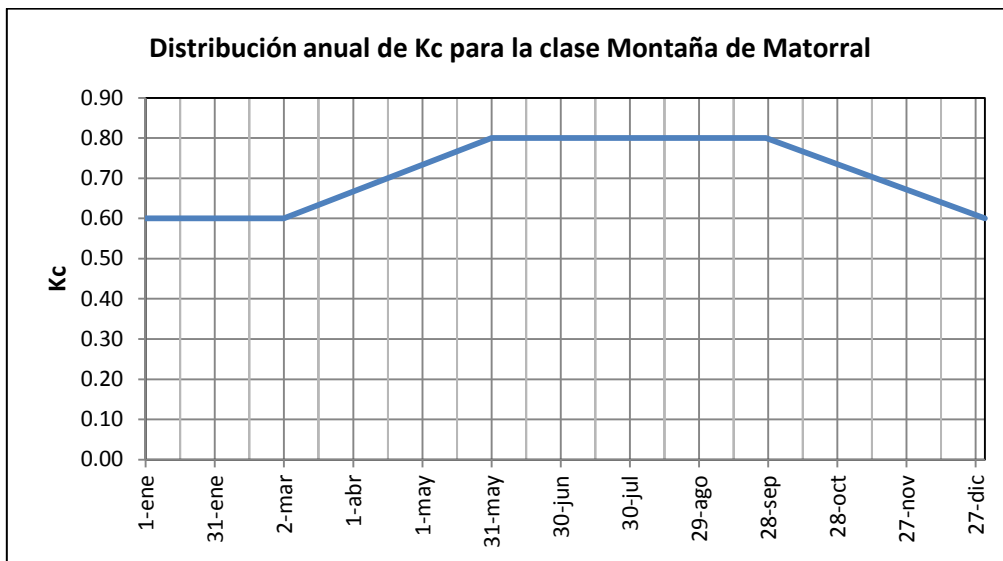


Figura 6.19 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase montaña de matorral.

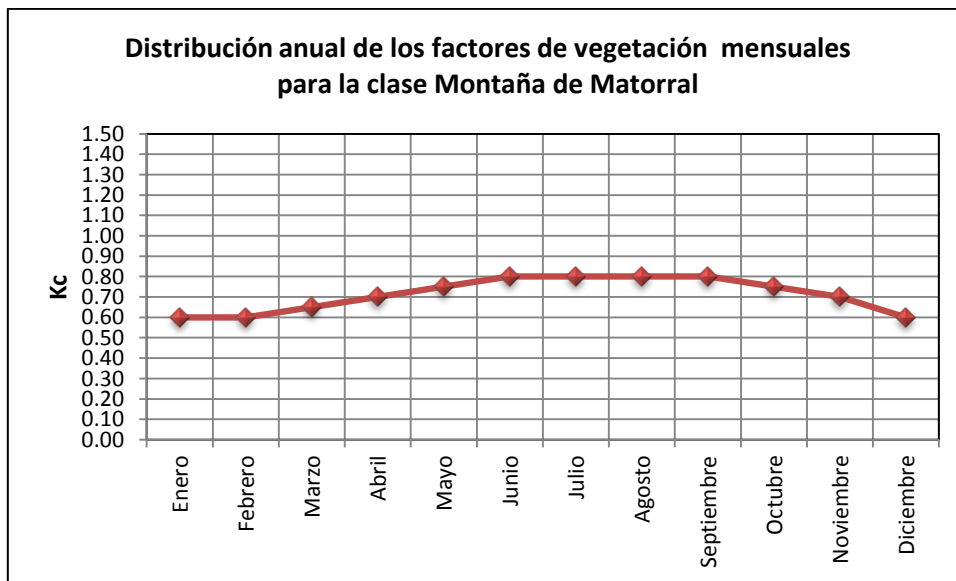


Figura 6.20 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase montaña de matorral.

- ii. *Montaña de Pino.* Las superficies que se han asignado a la clase Montaña de Pino tienen unas características similares a las que se han definido en el apartado de Montaña de Matorral, con la diferencia que tienen la presencia de un estado superior arbóreo compuesto fundamentalmente por la especie de pino. Esto simplemente representará una mayor aptitud para la transferencia de agua mediante evapotranspiración, por lo tanto se

supondrá una distribución igual a la del anterior apartado, pero con unos valores asociados a las etapas de desarrollo mayores.

Tabla 6.9 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para la clase Montaña de pino.

Montaña de Pino		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	60	0.7
Desarrollo de vegetación	90	Crecimiento
Verano	120	0.9
Otoño	95	0.7
Total	365	

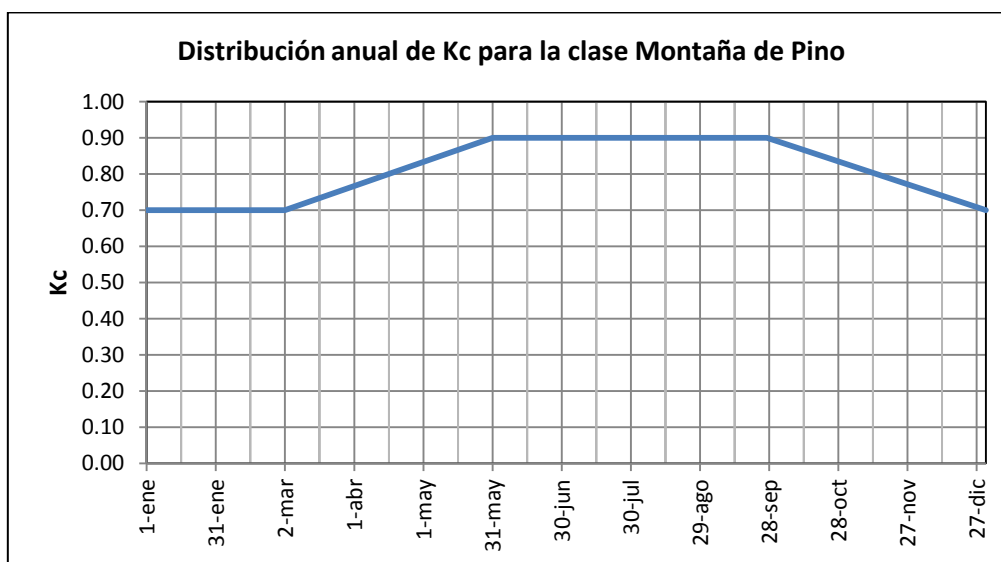


Figura 6.21 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase montaña de pino.

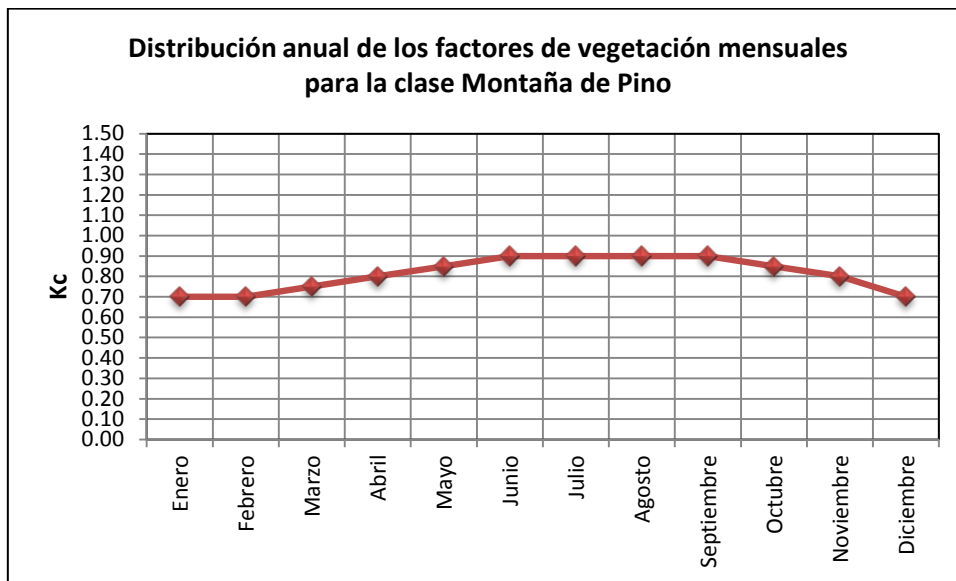


Figura 6.22 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase montaña de pino.

- iii. *Pastizales Naturales*. A medida que la vegetación se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante. Para esta clase se ha tenido en cuenta la cantidad de la cobertura vegetal y el desarrollo de la planta, partiendo de la hipótesis propuesta en el documento No. 56 de la FAO donde nos indica que si la cobertura vegetal está alrededor de un 25-40% el K_c tendrá un valor de 0.5 y si es va de 40-60% el K_c será igual a 0.7. Por lo tanto se asumió una cobertura vegetal entre 40-60% adoptando un $K_c=0.7$ continuo.

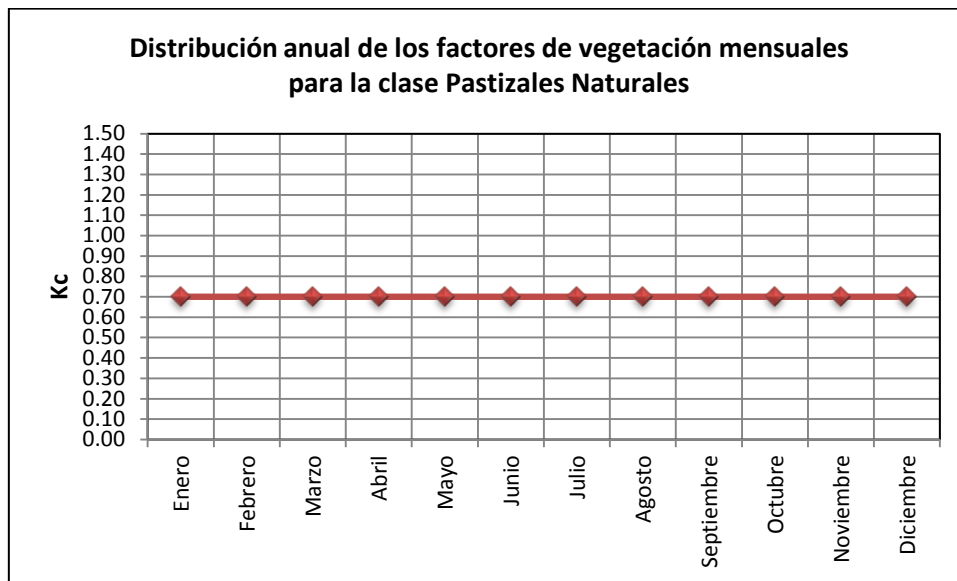


Figura 6.23 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase pastizales naturales.

iv. *Vegetación escasa.* En los casos donde la superficie del suelo esté prácticamente descubierta después de la cosecha o que exista vegetación escasa, el valor de K_c estará fuertemente influenciado por la frecuencia y la cantidad de precipitación. Se puede calcular el valor de K_c para un suelo descubierta como $K_c = K_{cini}$, el cual se encuentra tabulado para diferentes tipos de cultivos en el documento No. 56 de la FAO. Por lo tanto se tomará como valor de K_c el K_{cini} de los cultivos que se encuentran alrededor de estas zonas descubiertas.

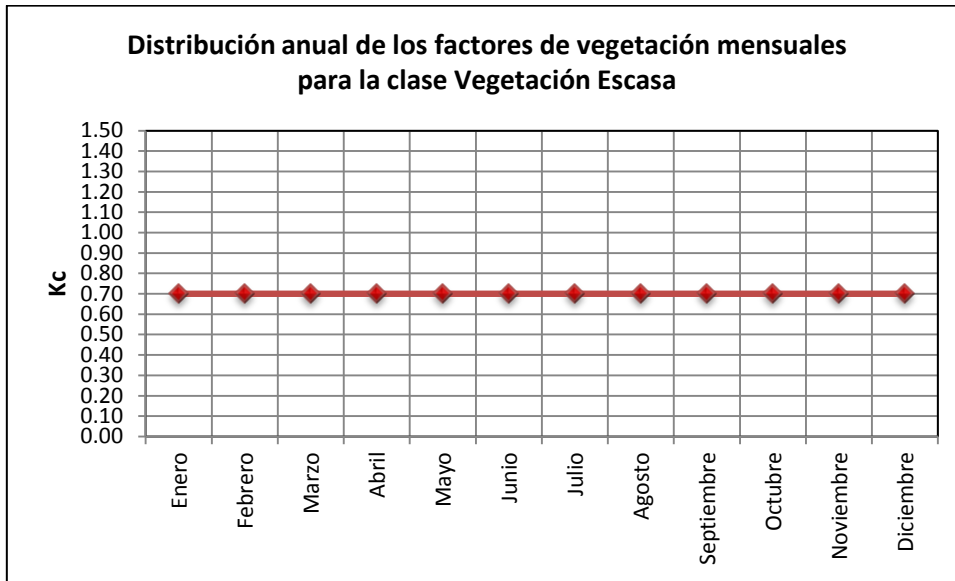


Figura 6.24 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase vegetación escasa.

v. *Ríos y Ramblas*. En esta clase se asume que no existe ningún tipo de vegetación, por lo tanto no hay transpiración y el factor de vegetación es invariante a lo largo del año adoptando un valor igual a uno.

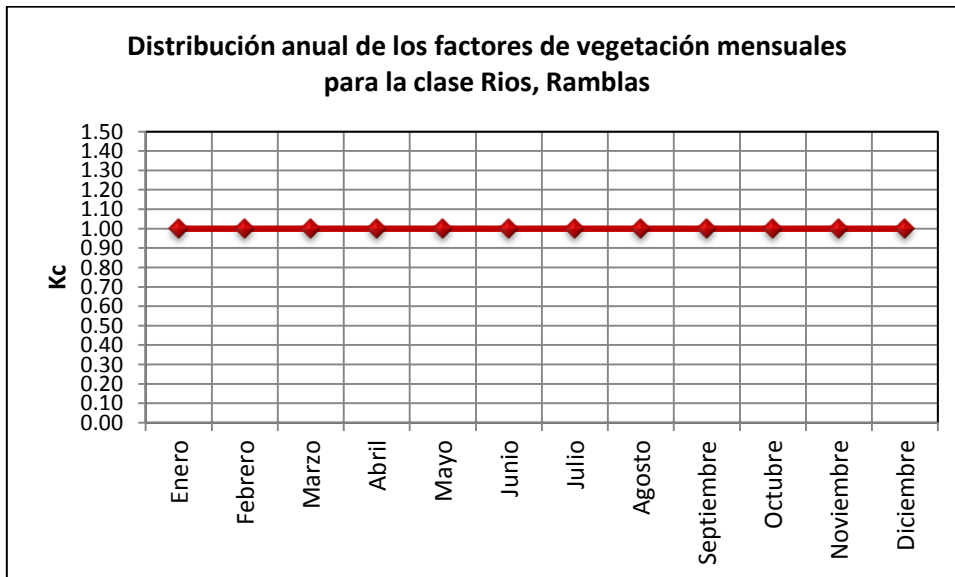


Figura 6.25 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase ríos, ramblas.

vi. *Urbano*. Esta clase tiene la misma distribución anual del factor de evapotranspiración realizada en la clase ríos y ramblas, asumiendo que no existe ningún tipo de vegetación.

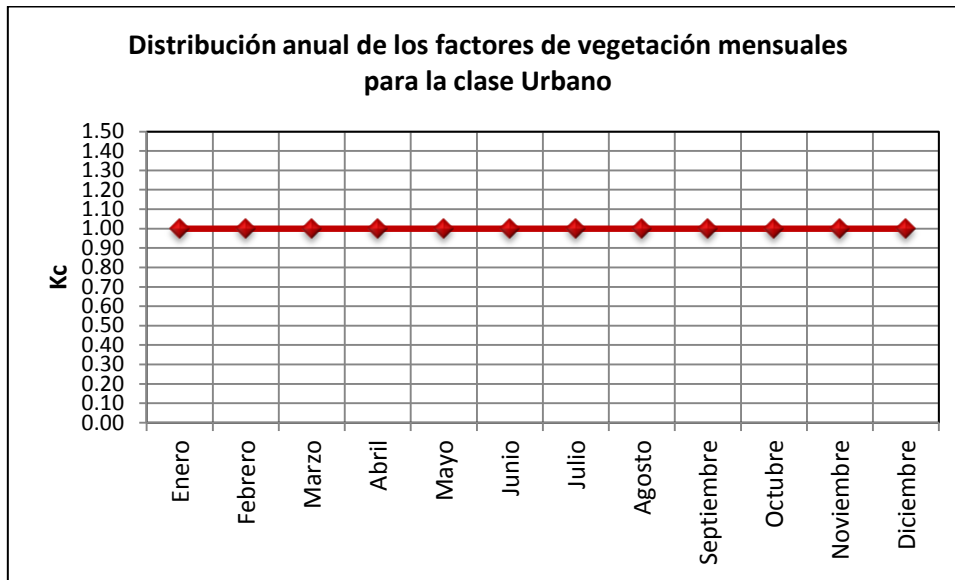


Figura 6.26 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase urbano.

vii. *Nieve*. Cuando la superficie del terreno se encuentra congelada o cubierta por nieve cualquier tipo de vegetación tendrá una actividad prácticamente nula, siendo casi nula su contribución al valor de ET_0 . En investigaciones realizadas por Wright (Wright, 1993 citado por Allen et al., 2006), en Kimberly, Idaho, Estados Unidos (latitud $42^{\circ}N$, altitud 1200 m) se pudo determinar un valor promedio de $K_c=0.25$ durante los períodos donde el suelo no se encontraba congelado pero donde ocurrían heladas (Octubre y comienzos de Noviembre). Un estudio similar llevado a cabo en Logan, Utah, Estados Unidos (latitud $41.6^{\circ}N$, altitud 1350 m) arrojó un valor promedio de $K_c=0.5$ para los días donde no existía cobertura de nieve. De una forma similar, se encontró un valor de K_c de alrededor 0.4 para trigo de invierno durante períodos de congelamiento en la región de China del Norte (latitud cercana a $39^{\circ}N$). Partiendo de estas referencias se ha considerado un valor único promedio de $K_c=0.4$ para la clase nieve.

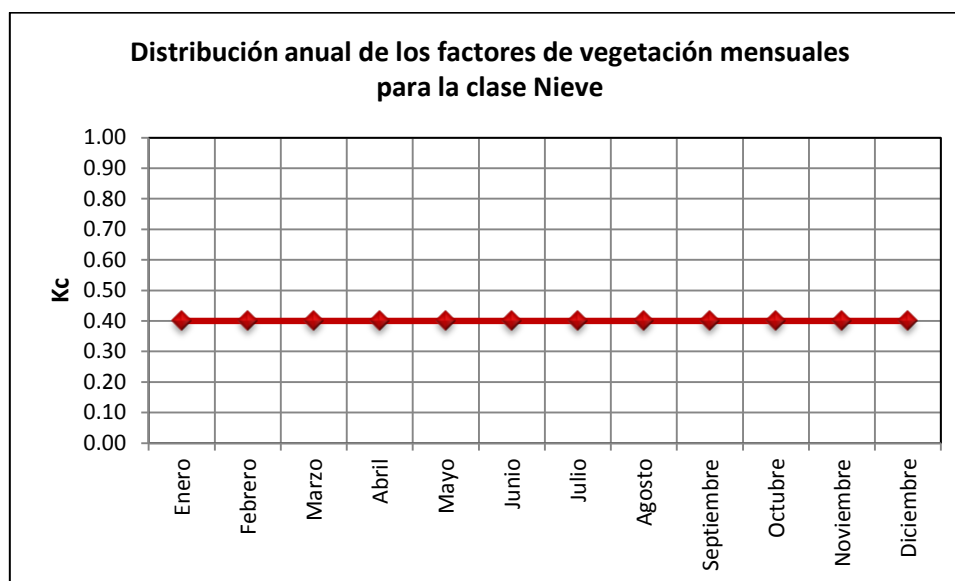


Figura 6.27 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Nieve.

Finalmente se resumen los resultados obtenidos para las diferentes clases que se han definido en la cuenca hidrográfica del río Ésera en la Tabla 6.10 y la Figura. 6.28.

Tabla 6.10 Valores mensuales de Kc para las diferentes clases en la cuenca del río Ésera.

Mes	Kc										
	M. Pino	M. Mato	Pastiz natural	Veg. Escasa	Sec. arboriz	Sec. no arboriz	Frut	Hort	Ríos	Urb	Nieve
Ene.	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	0.40
Feb.	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	0.40
Mar.	0.75	0.65	0.70	0.70	0.43	0.20	0.80	0.50	1.00	1.00	0.40
Abril	0.80	0.70	0.70	0.70	0.49	0.38	0.83	0.83	1.00	1.00	0.40
Mayo	0.85	0.75	0.70	0.70	0.58	0.67	0.85	0.89	1.00	1.00	0.40
Jun.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.65	0.72	0.91	0.93	1.00	1.00	0.40
Jul.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.70	0.74	0.93	1.05	1.00	1.00	0.40
Ago.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.68	0.45	0.93	0.90	1.00	1.00	0.40
Sep.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.65	0.20	0.93	0.20	1.00	1.00	0.40
Oct.	0.85	0.75	0.70	0.70	0.58	0.20	0.91	0.20	1.00	1.00	0.40
Nov.	0.80	0.70	0.70	0.70	0.40	0.20	0.85	0.20	1.00	1.00	0.40
Dic.	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00	0.40

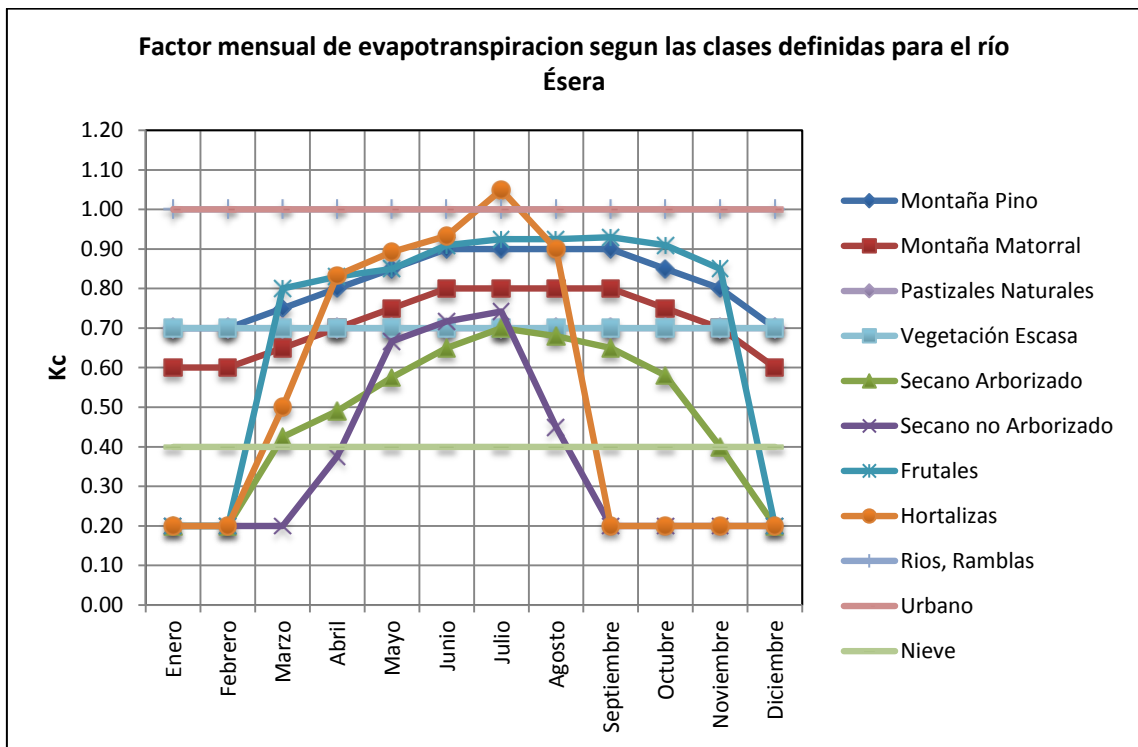


Figura 6.28 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Ésera.

- Superficies cultivadas cuenca del río Siurana.

Por la ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Siurana la variabilidad espacial del uso de suelo es similar a la cuenca del río Ésera, por lo tanto se adoptaron la mayoría de las distribuciones anuales de los factores mensuales de evapotranspiración. A continuación se presenta la clase en la cual existe diferencia con respecto a la cuenca del río Ésera.

i. Hortalizas. En esta clase se han tenido en cuenta los cultivos de cebolla, lechuga y tomate predominantes en la zona de estudio. Siguiendo el procedimiento explicado en los apartados anteriores se han calculado las curvas de variación temporal a partir de las longitudes de sus etapas de desarrollo y del factor de vegetación.

Tabla 6.11 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

Cebolla			Lechuga		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	15	0.7	Inicial	20	0.7
Desarrollo de cultivo	25	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	30	Crecimiento
Mediados de temporada	70	1.05	Mediados de temporada	15	1
Final de temporada	40	0.75	Final de temporada	10	0.95
Total	150		Total	75	
Fecha de Siembra	Abril		Fecha de Siembra	Abril	

Tomate		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	30	0.7
Desarrollo de cultivo	40	Crecimiento
Mediados de temporada	45	1.15
Final de temporada	30	0.8
Total	145	
Fecha de Siembra	Abril	

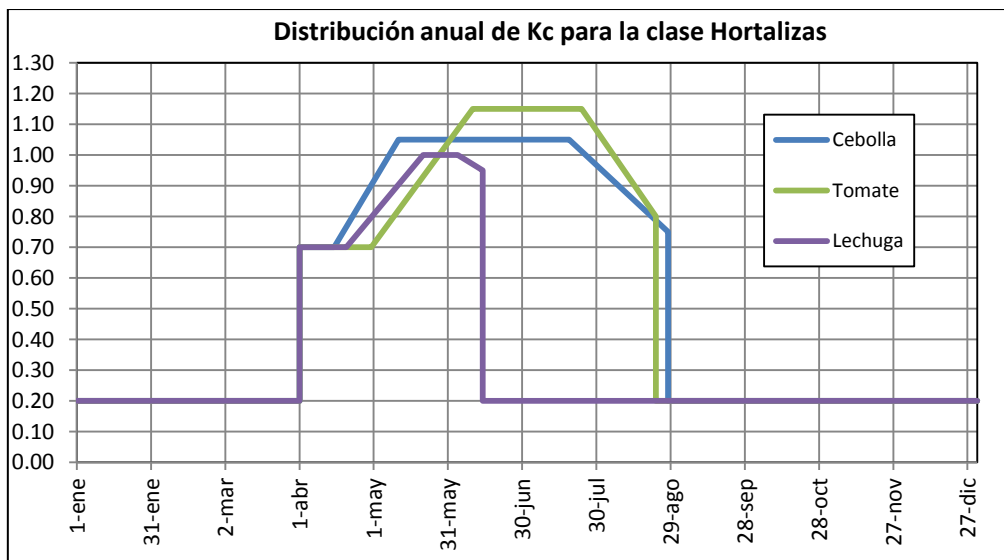


Figura 6.29 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

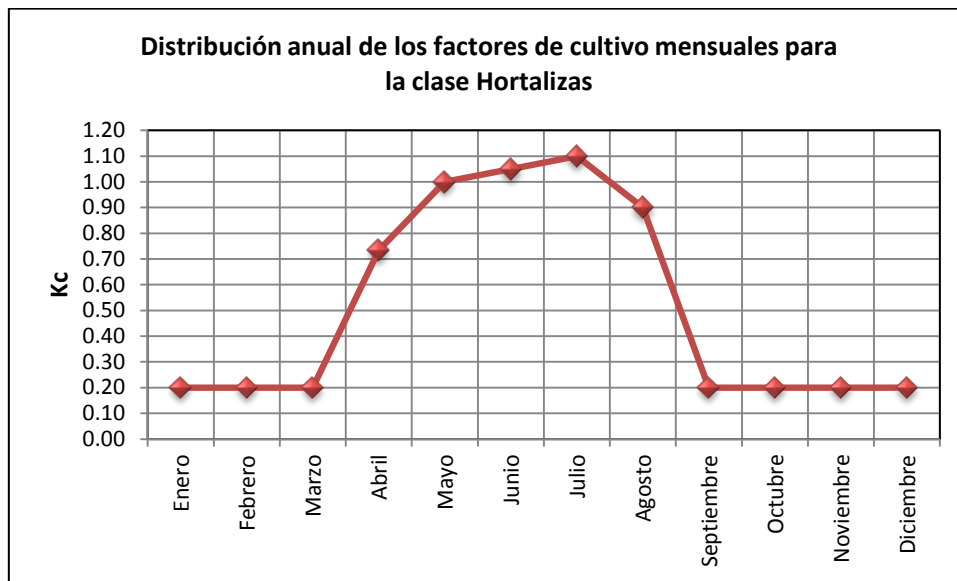


Figura 6.30 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.

En la Tabla 6.12 se resumen los resultados obtenidos para las diferentes clases que se han definido en la cuenca hidrográfica del río Siurana y se ilustran en la Figura. 6.31.

Tabla 6.12 Valores mensuales de Kc para las diferentes clases en la cuenca del río Siurana.

Mes	Kc								
	M. Pino	M. Mato	Veg. Escasa	Sec. arboriz	Sec. no arboriz	Frut	Hort	Ríos	Urb
Ene.	0.70	0.60	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00
Feb.	0.70	0.60	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00
Mar.	0.75	0.65	0.70	0.43	0.20	0.80	0.20	1.00	1.00
Abril	0.80	0.70	0.70	0.49	0.38	0.83	0.73	1.00	1.00
Mayo	0.85	0.75	0.70	0.58	0.67	0.85	1.00	1.00	1.00
Jun.	0.90	0.80	0.70	0.65	0.72	0.91	1.05	1.00	1.00
Jul.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.74	0.93	1.10	1.00	1.00
Ago.	0.90	0.80	0.70	0.68	0.45	0.93	0.90	1.00	1.00
Sep.	0.90	0.80	0.70	0.65	0.20	0.93	0.20	1.00	1.00
Oct.	0.85	0.75	0.70	0.58	0.20	0.91	0.20	1.00	1.00
Nov.	0.80	0.70	0.70	0.40	0.20	0.85	0.20	1.00	1.00
Dic.	0.70	0.60	0.70	0.20	0.20	0.20	0.20	1.00	1.00

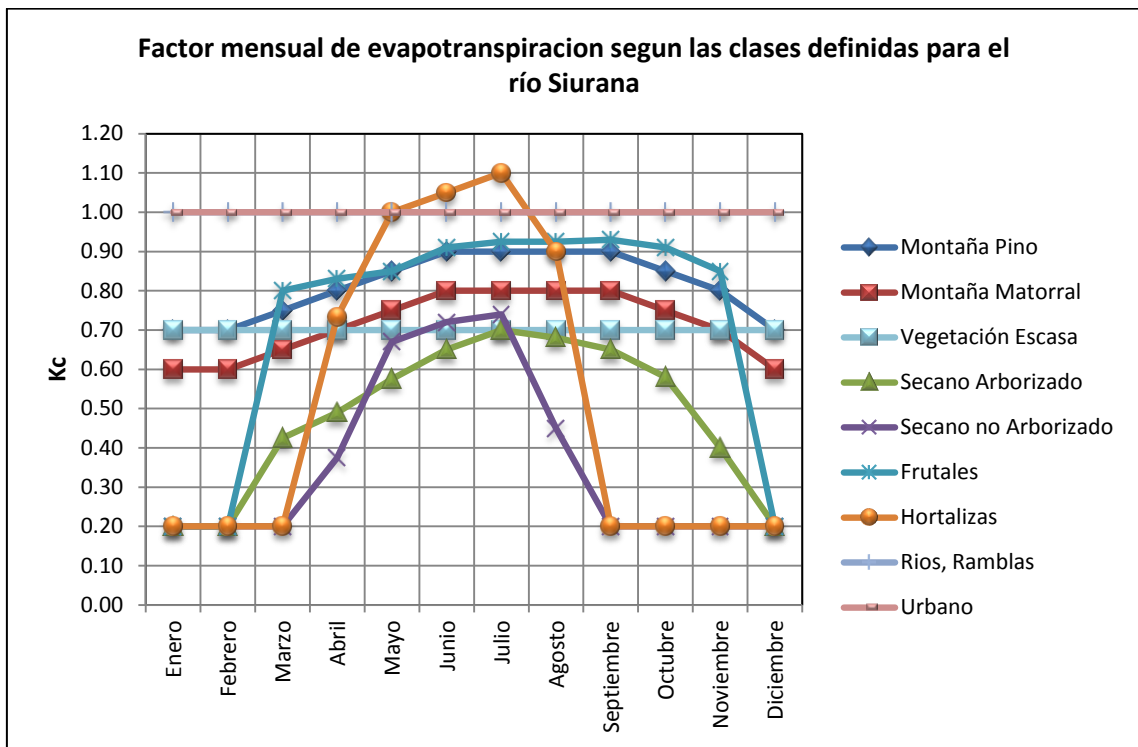


Figura 6.31 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Siurana.

- Superficies cultivadas cuenca del río Júcar.

La cuenca hidrográfica del río Júcar tiene diferencias significativas con respecto a las anteriores cuencas en la variabilidad de los usos del suelo, debido a su ubicación geográfica, por lo tanto solo se tendrán en cuenta algunas distribuciones anuales de los factores mensuales de evapotranspiración presentadas anteriormente, principalmente las relacionadas con superficies no cultivadas. Las distribuciones relacionadas con superficies cultivadas como son: hortalizas, frutales, terrenos regados permanentemente y secano no arborizado, las cuales no tienen similitud con las definidas en las anteriores cuencas se presentan a continuación siguiendo la metodología de los apartados precedentes.

- i. *Hortalizas.* Con cinco tipos de cultivos tenidos en cuenta en la cuenca del río Júcar como son: cebolla, melón, patata, tomate y faba se han definido las curvas de variación temporal con los datos de las longitudes de sus etapas de desarrollo y del factor de vegetación.



Tabla 6.13 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

Cebolla			Melón		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	15	0.7	Inicial	25	0.5
Desarrollo de cultivo	25	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	35	Crecimiento
Mediados de temporada	70	1.05	Mediados de temporada	40	1.05
Final de temporada	40	0.75	Final de temporada	20	0.75
Total	150		Total	120	
Fecha de Siembra	Abril		Fecha de Siembra	Mayo	
Patata			Tomate		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	30	0.5	Inicial	30	0.7
Desarrollo de cultivo	35	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	40	Crecimiento
Mediados de temporada	50	1.15	Mediados de temporada	45	1.15
Final de temporada	30	0.75	Final de temporada	30	0.8
Total	145		Total	145	
Fecha de Siembra	Mayo		Fecha de Siembra	Abril	

Faba		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	20	0.5
Desarrollo de cultivo	30	Crecimiento
Mediados de temporada	30	1.05
Final de temporada	10	0.9
Total	90	
Fecha de Siembra	Febrero/Marzo	

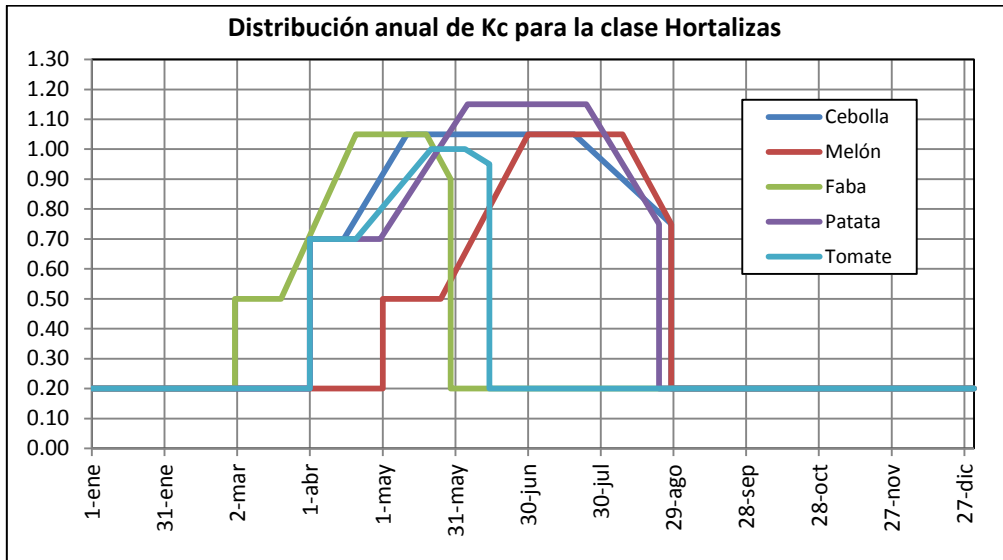


Figura 6.32 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Hortalizas.

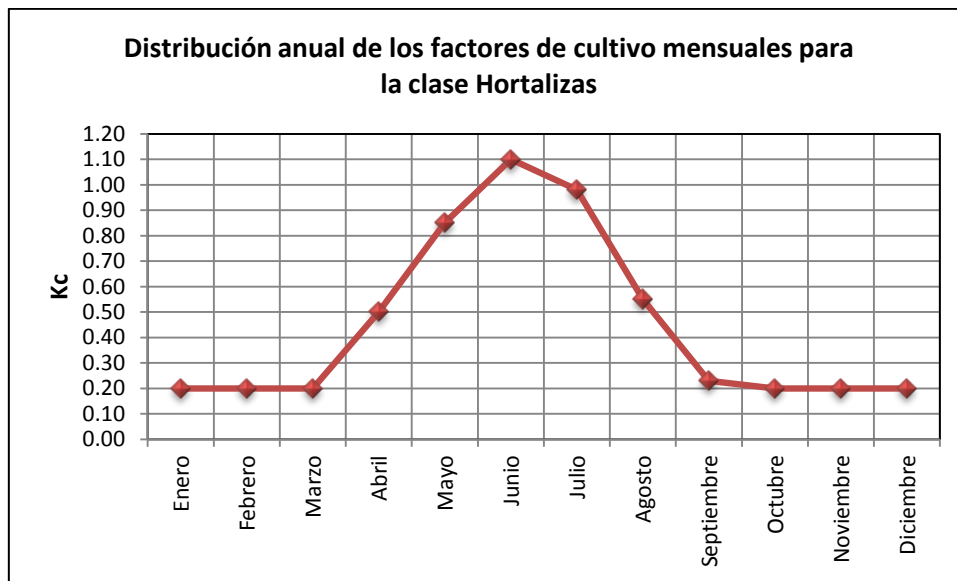


Figura 6.33 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Hortalizas.

ii. *Frutales*. Entre la variedad de frutas que se cultivan en la cuenca del río Júcar, la más representativa es el cultivo de cítricos, éstos se han clasificado como una única categoría, ya que el documento de la FAO ofrece la posibilidad de usar diferentes coeficientes de vegetación según la densidad de la cobertura efectiva de suelo, por ende se ha determinado el

coeficiente de vegetación de la clase frutales con la media de las tres posibilidades que se muestran a continuación.

Tabla 6.14 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Frutales.

Cítricos				
Periodo	Longitud (días)	Kc (cobertura 70%)	Kc (cobertura 50%)	Kc (cobertura 20%)
Inicial	60	0.7	0.65	0.5
Desarrollo de cultivo	90	Crecimiento	Crecimiento	Crecimiento
Mediados de temporada	120	0.65	0.6	0.45
Final de temporada	95	0.7	0.65	0.55
Total	365			
Fecha de Siembra	Enero			

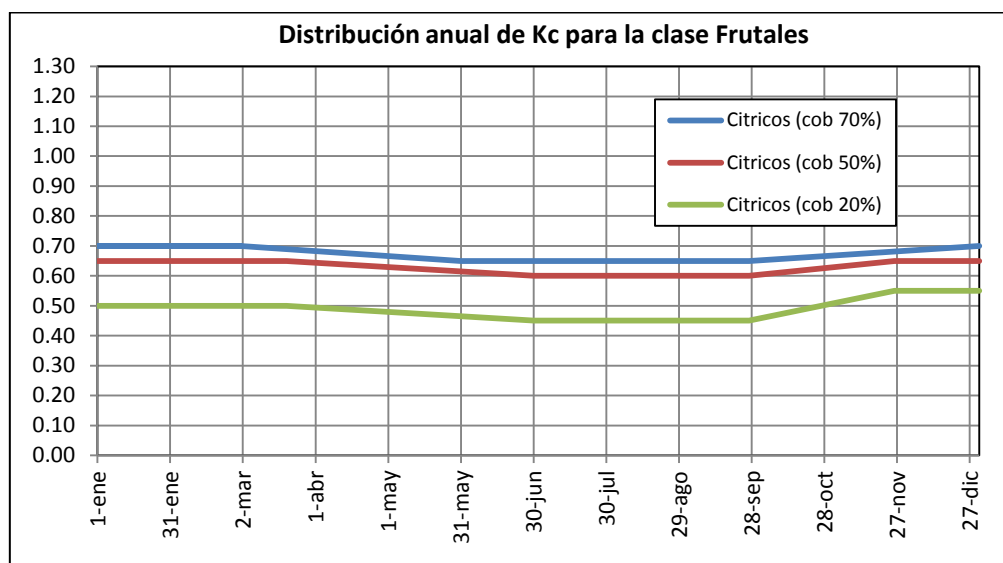


Figura 6.34 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Frutales.

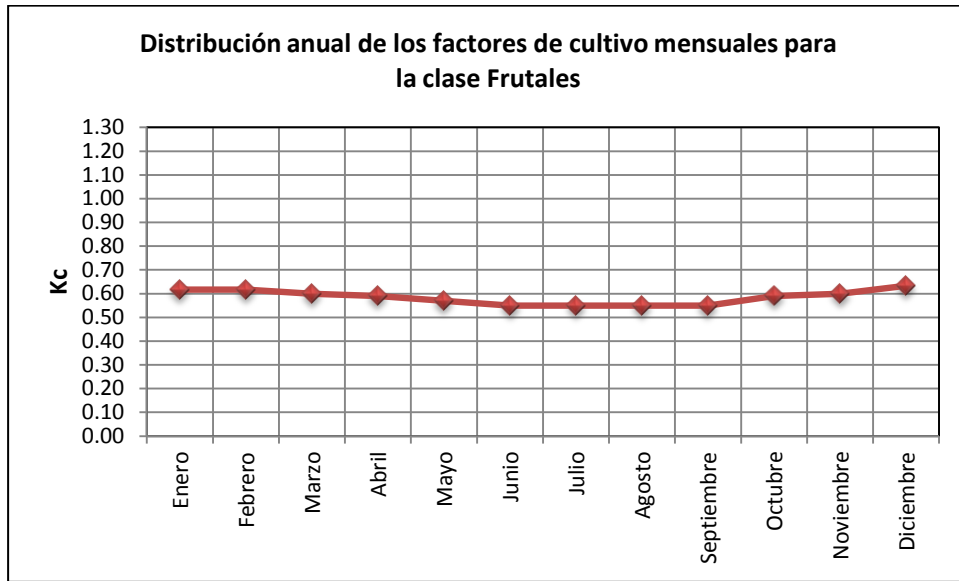


Figura 6.35 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.

iii. *Regadío*. Dentro de esta categoría predomina los campos de arrozales, por lo tanto la determinación del factor de vegetación mensual asociado a la evapotranspiración es más sencilla, ya que al tratarse de un único tipo de cultivo la distribución de la variabilidad anual se obtiene directamente con los datos de la FAO.

Tabla 6.15 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase Regadíos.

Arroz		
Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	30	1.05
Desarrollo de cultivo	30	Crecimiento
Mediados de temporada	60	1.2
Final de temporada	30	0.75
Total	150	
Fecha de Siembra	Mayo	

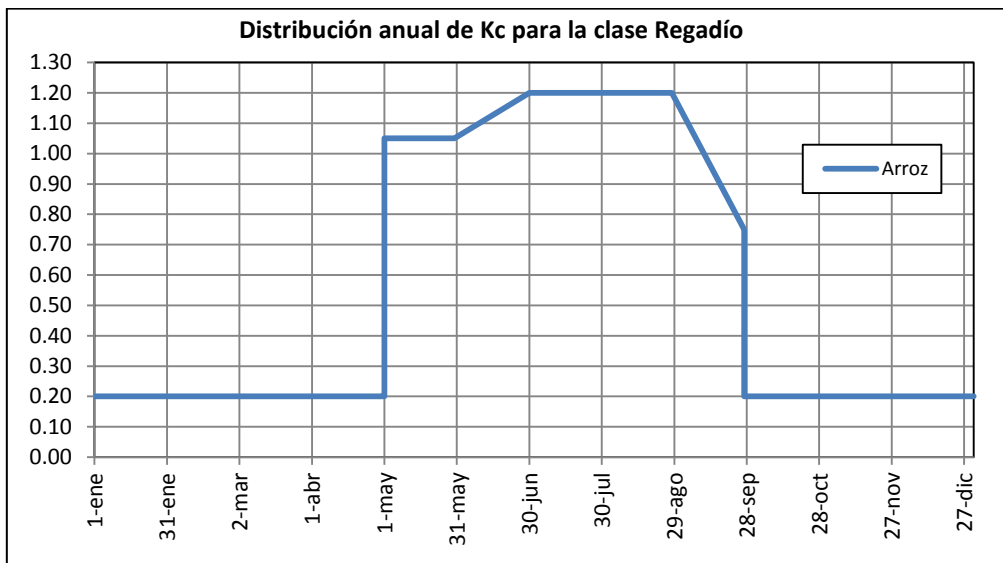


Figura 6.36 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase Regadío.

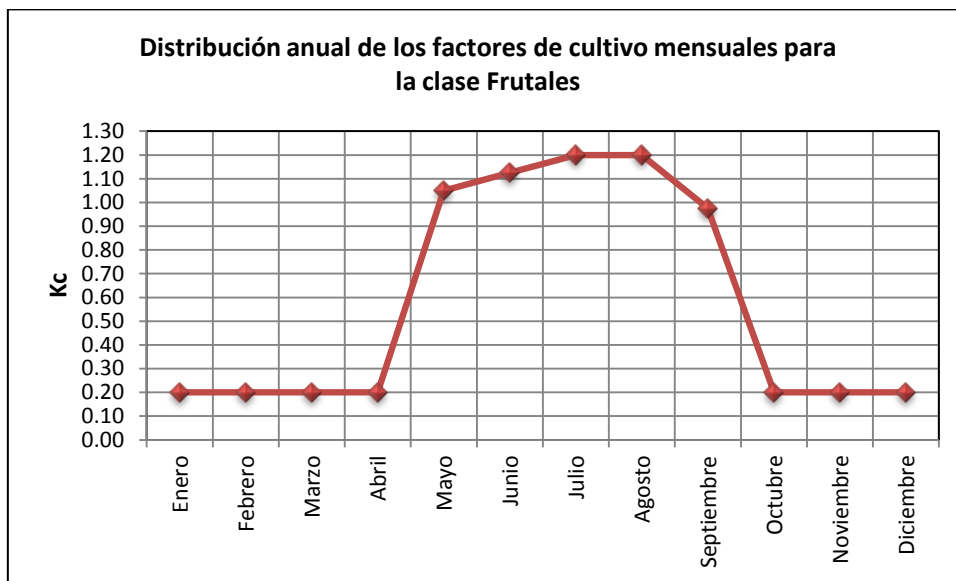


Figura 6.37 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.

iv. *Secano no arborizado*. Para esta clase solo se han tenido en cuenta dos cultivos, trigo y alfalfa, representativos de la cuenca del Júcar. A continuación se presentan las respectivas distribuciones del factor de evapotranspiración para la clase secano no arborizado.

Tabla 6.16 Longitud de las etapas de desarrollo y factor de vegetación para los cultivos considerados en la clase secano no arborizado.

Trigo			Alfalfa		
Periodo	Longitud (días)	Kc	Periodo	Longitud (días)	Kc
Inicial	20	0.3	Inicial	10	0.4
Desarrollo de cultivo	25	Crecimiento	Desarrollo de cultivo	20	Crecimiento
Mediados de temporada	60	1.15	Mediados de temporada	20	0.5
Final de temporada	30	0.325	Final de temporada	10	0.5
Total	135		Total	60	
Fecha de Siembra	Marzo/Abril		Fecha de Siembra	Enero/Abril	

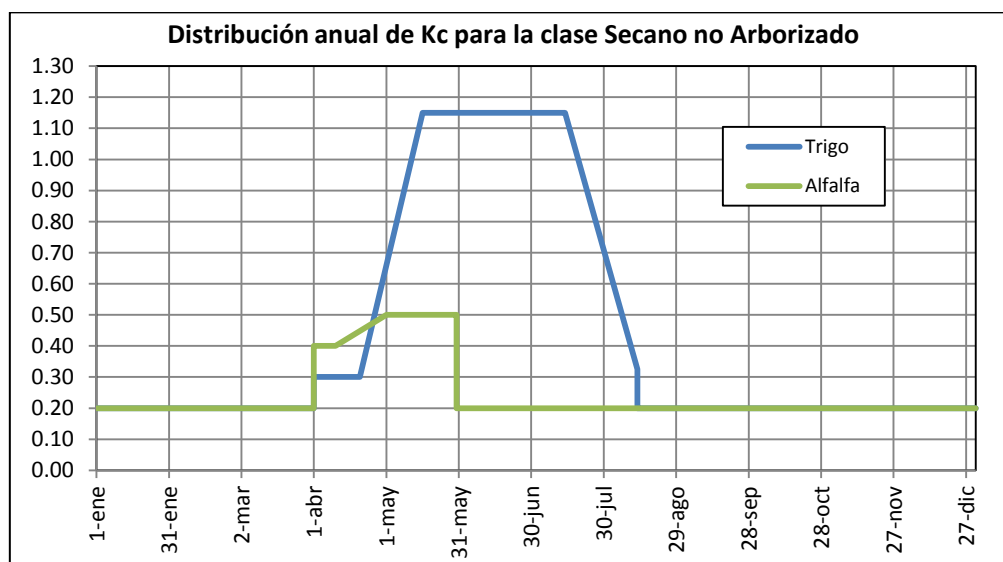


Figura 6.38 Variabilidad anual del factor de vegetación para cada uno de los cultivos considerados en la clase secano no arborizado.

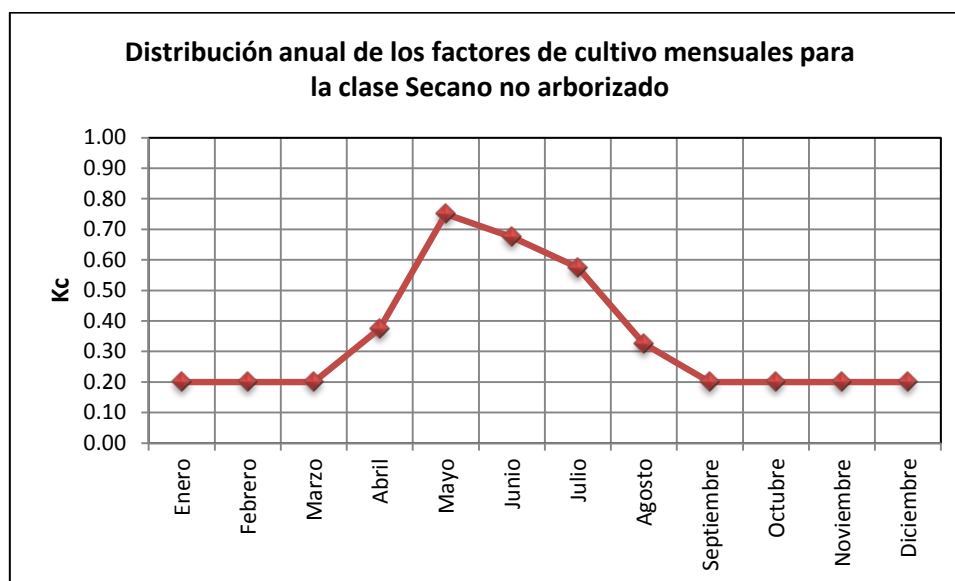


Figura 6.39 Distribución anual del factor de evapotranspiración mensual para la clase Frutales.

Con estas clases y las que coinciden con las de las anteriores cuencas hidrográficas, a continuación se presentan en la Tabla 6.17 los resultados obtenidos para los valores mensuales de K_c y en la Figura 6.40 la distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Júcar.

Tabla 6.17 Valores mensuales de K_c para las diferentes clases en la cuenca del río Júcar.

Mes	Kc										
	M. Pino	M. Matorr	Past. natur	Veg. Escasa	Sec. arbor	Sec. no arbor	Regad	Frut	Hort	Rios,	Urb
Ene.	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.62	0.20	1.00	1.00
Feb.	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.62	0.20	1.00	1.00
Mar.	0.75	0.65	0.70	0.70	0.43	0.20	0.20	0.60	0.20	1.00	1.00
Abril	0.80	0.70	0.70	0.70	0.49	0.38	0.20	0.59	0.50	1.00	1.00
Mayo	0.85	0.75	0.70	0.70	0.58	0.75	1.05	0.57	0.85	1.00	1.00
Jun.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.65	0.68	1.13	0.55	1.10	1.00	1.00
Jul.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.70	0.58	1.20	0.55	0.98	1.00	1.00
Ago	0.90	0.80	0.70	0.70	0.68	0.33	1.20	0.55	0.55	1.00	1.00
Sep.	0.90	0.80	0.70	0.70	0.65	0.20	0.98	0.55	0.23	1.00	1.00
Oct.	0.85	0.75	0.70	0.70	0.58	0.20	0.20	0.59	0.20	1.00	1.00
Nov.	0.80	0.70	0.70	0.70	0.40	0.20	0.20	0.60	0.20	1.00	1.00
Dic	0.70	0.60	0.70	0.70	0.20	0.20	0.20	0.63	0.20	1.00	1.00

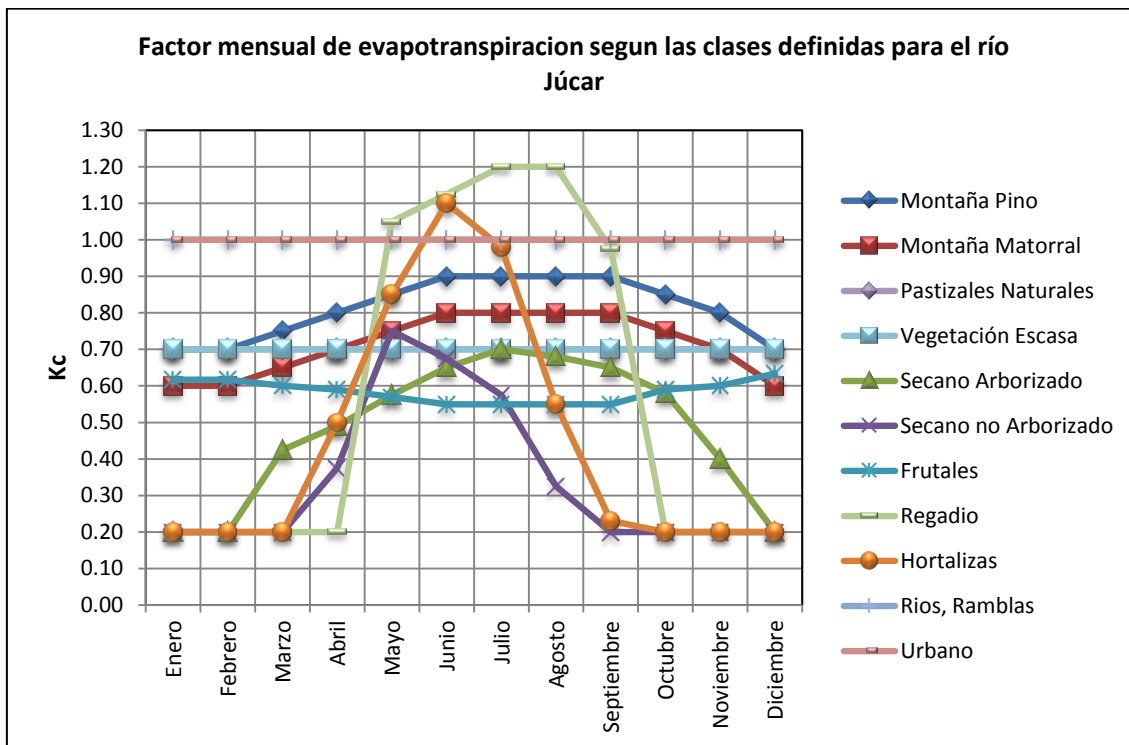


Figura 6.40 Distribución anual de los factores mensuales de evapotranspiración para las clases definidas en la cuenca del río Júcar.

6.2.2.2. Intercepción y almacenamiento superficial.

Para los procesos de intercepción de la lluvia por parte de la cubierta vegetal y el almacenamiento de agua en depresiones del terreno se han estimado mapas de estos parámetros asociados a la cobertura vegetal a partir del mapa de usos del suelo.

Estos procesos son llamados pérdidas o abstracciones iniciales, y se refiere a la cantidad de lluvia precipitada que no llega a escurrir superficialmente por el terreno ni a penetrar en el suelo por las condiciones impuestas por la vegetación y la composición de la superficie. A continuación se define brevemente estos dos procesos:

- **Intercepción.** La intercepción se refiere al contenido de agua retenida por la vegetación por medio de la intercepción de la precipitación, es decir, el agua lluvia que se queda en la vegetación y que se evapora directamente

desde la superficie de las plantas y no llega a alcanzar el suelo. También es conocida como capacidad de intercepción del dosel.

- Almacenamiento superficial. Contenido de agua almacenada a causa la rugosidad del terreno, esto es, el almacenamiento en superficies por encharcamiento. Este volumen de agua no contribuye a la formación de escorrentía superficial o sub-superficial porque se pierde de nuevo a la atmósfera por evaporación, por lo que en el modelo TETIS forma parte de la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo (H_u).

Debido a la falta de estudios respecto a valores de referencia de estos parámetros, se deben asumir criterios de estimación de estas abstracciones iniciales a partir de información disponible que a pesar de su simplicidad y falta de precisión, reduce la incertidumbre respecto a variables tan importantes como la infiltración, la evapotranspiración y el contenido de humedad antecedente en los suelos.

Para la estimación de la intercepción se ha recurrido a la asignación de valores a cada unidad cartográfica de los diferentes tipos de usos de suelo presentes en la zona de estudio. Es necesario anotar que se evalúa la intercepción como la capacidad de intercepción o capacidad del dosel ("canopy capacity), que es básicamente la cantidad de agua que las hojas de una planta de cultivo pueden contener. Por lo tanto para la asignación de los valores se ha tenido en cuenta la vegetación existente, la superficie de cobertura y estratificación.

Por su parte el almacenamiento superficial se ha estimado a partir de la suma de los mapas de usos de suelo y pendiente. Respecto a la componente del uso del suelo, se tiene en cuenta la rugosidad local del terreno asociada a cada cobertura, la cual se relaciona en forma inversa con la velocidad del flujo. En cuanto a la pendiente, se asume que cuando mayor pendiente tenga el terreno, menos posibilidades tendrá el agua de ser almacenada en depresiones. Se ha realizado una modelización simple a partir del mapa de pendientes, asumiendo que los terrenos horizontales pueden almacenar hasta 10 mm de lluvia, y a partir de aquí el almacenamiento superficial causado por la

pendiente seguirá una ley de reducción lineal acorde con la siguiente expresión:

$$\text{Almacenamiento debido a la pendiente (mm)} = 10 - (1.3 * \text{pendiente})$$

Finalmente en la Tabla 6.18 se listan los valores de intercepción y almacenamiento superficial adoptados para cada tipo de uso del suelo, así como la profundidad de raíces, necesaria para calcular el almacenamiento estático en el suelo.

Tabla 6.18 Intercepción y almacenamiento superficial para diferentes coberturas.

Clasificación usos del suelo	Clasificación CLC 2006	Prof. Raíces (m)	Almac. Superf (mm)	Intercept (mm)
MONTAÑA DE PINOS	Bosques de frondosas	1.00	4.00	9.00
	Bosques de coníferas	1.25	4.00	9.00
	Bosques mixtos	1.00	4.00	9.00
MONTAÑA MATORRAL	Paramos y landas	0.70	6.00	3.00
	Vegetación esclerófila	0.70	6.00	4.00
	Bosques de transición, arbustos	0.70	5.00	5.00
PASTIZALES NATURALES	Pastizales	0.60	6.00	3.00
	Praderas naturales	0.60	6.00	3.00
VEGETACION ESCASA	Playas, dunas, arenas	0.00	0.00	0.00
	Roca desnuda	0.02	0.00	0.00
	Áreas con escasa vegetación	0.02	3.00	0.00
	Zonas quemadas	0.00	0.00	0.00
SECANO ARBORIZADO	Viñedos	0.80	6.00	1.00
	Olivos	1.45	6.00	1.00
SECANO NO ARBORIZADO	Tierras de cultivo de no regadío	0.80	6.00	1.00
	Cultivos anuales asociados con permanentes	0.70	6.00	1.00
REGADÍO	Tierras regadas permanentemente	0.50	6.00	1.00
	Campos de arroz	0.75	6.00	1.00
FRUTALES	Árboles frutales y plantaciones de bayas	1.50	6.00	1.00
	Terreno principalmente ocupado por agricultura	0.75	6.00	5.00
HORTALIZAS	Áreas agro-forestal	0.55	4.00	9.00
	Forma de cultivos complejos	0.70	6.00	1.00
RIOS, RAMBLAS	Pantanos	0.00	0.00	0.00
	Turberas	0.00	0.00	0.00
	Marismas	0.00	0.00	0.00
	Salinas	0.00	0.00	0.00
	Cursos de agua	0.00	0.00	0.00
	Cuerpos de agua	0.00	0.00	0.00



	Lagunas costeras	0.00	0.00	0.00
	Mares y océanos	0.00	0.00	0.00
URBANO	Tejido urbano continuo	0.06	0.00	0.00
	Tejido urbano discontinuo	0.10	5.00	3.00
	Unidades industriales o comerciales	0.06	0.00	0.00
	Carretera, ferrocarriles	0.06	0.00	0.00
	Zonas portuarias	0.10	0.00	0.00
	Aeropuertos	0.10	0.00	0.00
	Zonas de extracción minera	0.01	0.00	0.00
	Vertederos	0.06	0.00	0.00
	Obras de construcción	0.06	0.00	0.00
	Áreas verdes urbanas	0.10	5.00	3.00
	Instalaciones deportivas y recreativas	0.10	5.00	3.00
NIEVE	Glaciales y nieve permanente.	0.00	0.00	0.00

6.2.3. Parámetros hidráulicos del suelo.

El objetivo del presente apartado es obtener la distribución espacial de los parámetros hidráulicos del suelo y subsuelo, en función de la información disponible con que se cuenta de la zona de estudio. Específicamente, se estimarán los valores y la distribución espacial de los siguientes parámetros hidráulicos del terreno, indispensables para la modelación distribuida:

- Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, H_u (mm). Este mapa incluye el almacenamiento capilar del suelo y almacenamiento superficial debido a las depresiones del terreno.
- Conductividad hidráulica del suelo, K_s (mm/h). Utilizada en los procesos de infiltración y en la estimación del flujo subsuperficial.
- Conductividad hidráulica del acuífero, K_p (mm/h). Utilizada en los procesos de percolación, pérdidas subterráneas y en la estimación del flujo base. La estimación de este parámetro presenta la mayor incertidumbre, puesto que la información acerca del estrato rocoso suele ser escasa.
- Conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso por percolación, K_{ps} .
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo, K_{ss} .
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso, K_{sa} .

De los tres últimos parámetros, K_{ps} , K_{ss} y K_{sa} , no se tiene información, por lo tanto una buena aproximación es: $K_{ss}=K_s$, $K_{sa}=K_p$ y $K_{ps}=0.1K_p$. La estructura separada de los parámetros en TETIS permite luego la calibración de las distintas conductividades hidráulicas a través de cinco factores correctores diferentes para cada conductividad.

- ***Estimación mapa de parámetro H_u (almacenamiento estático del suelo).***

El parámetro hidráulico relacionado con la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo, H_u , se obtiene a partir de la multiplicación del mapa de almacenamiento capilar del suelo y el almacenamiento superficial debido a las depresiones del terreno.

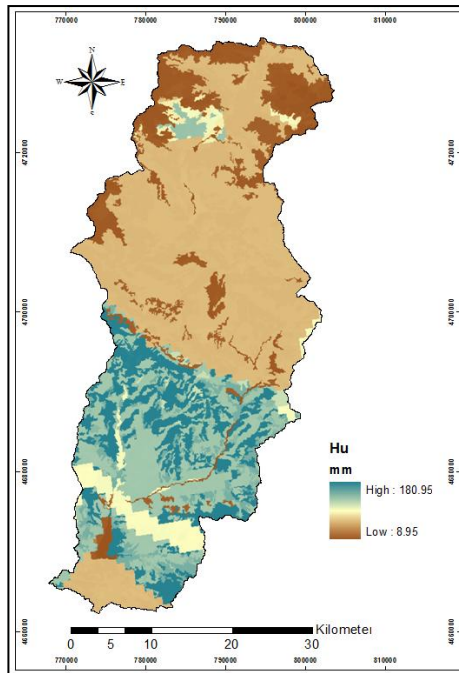
Para el cálculo del almacenamiento capilar se ha recurrido a información cartográfica tomada de la Base de datos de Suelo Europea (ESDB), específicamente los mapas derivados del suelo relacionados en el apartado 6.1.3, capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_TOP) y obstáculo de raíces (ROO), además el parámetro derivado del mapa de usos del suelo o cobertura vegetal reclasificado con la profundidad de raíces listadas en la Tabla 6.18, para efectos explicativos lo llamaremos “profundidad de raíces”.

Superponiendo los mapas ROO y profundidad de raíces con el fin de escoger el valor mínimo entre ambos y de tener mayor variabilidad espacial, se obtuvo un nuevo mapa llamado “profundidad de almacenamiento estático”. Seguidamente este mapa fue multiplicado con el de capacidad de agua disponible en la capa superior del suelo (AWC_TOP) por medio de herramientas ArcGis, para finalmente determinar la capacidad de almacenamiento capilar (H_u').

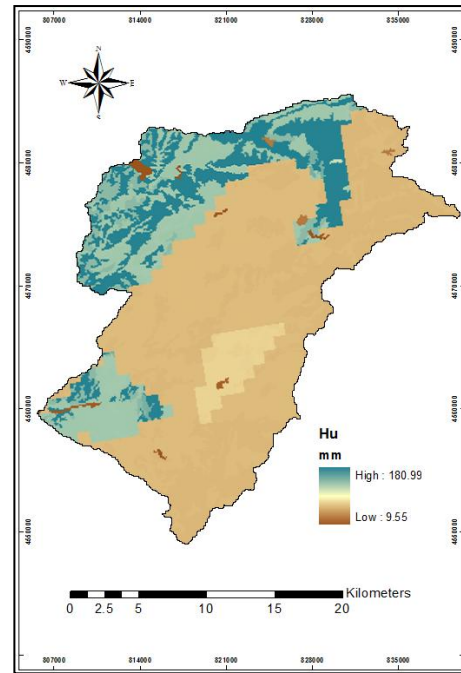
Como se mencionó anteriormente el almacenamiento superficial debido a las depresiones del terreno también contribuye para la estimación de H_u , y se determina a partir de la suma del mapa de usos de suelo y pendiente. El

procedimiento fue explicado en el apartado 6.2.2. Este mapa se denomina “almacenamiento superficial” ó H_u ”.

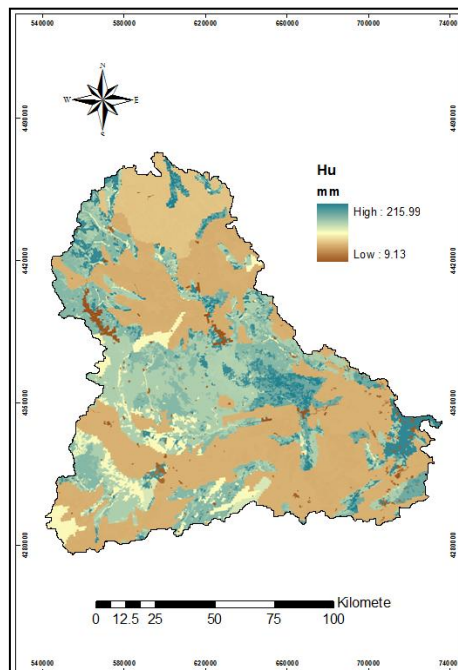
Finalmente la capacidad de almacenamiento hídrico H_u (mm) se obtiene sumando H_u' con H_u ”. El mapa estimado del parámetro para cada una de las cuencas en estudios y su utilización en TETIS se presentan en la Figura 6.41.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.41 Capacidad de almacenamiento hídrico del suelo H_u (mm) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

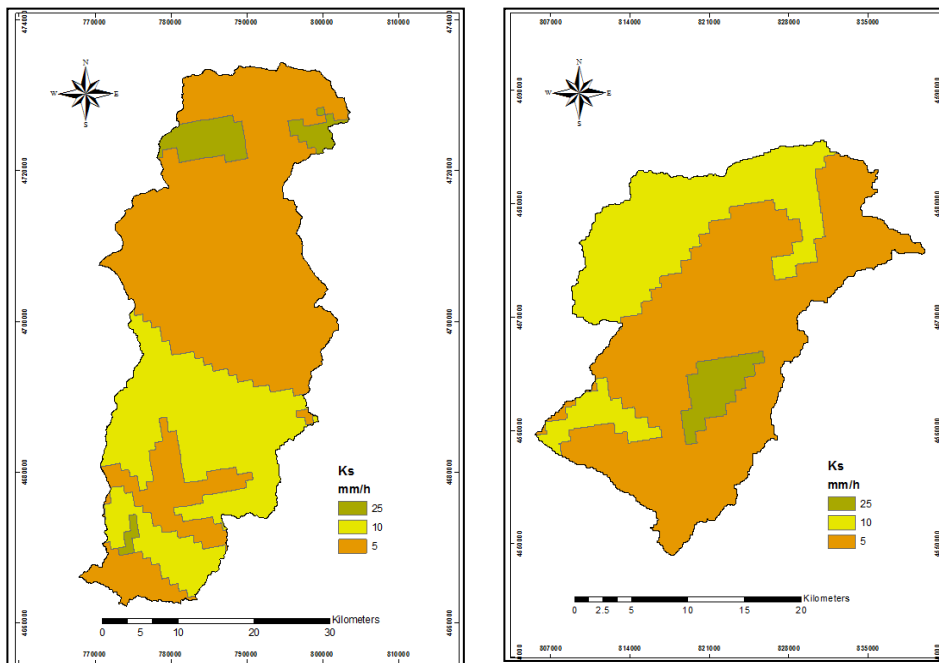
- **Estimación mapa de parámetro K_s (conductividad hidráulica del suelo).**

El parámetro K_s se ha calculado empleando el mapa derivado de la textura del suelo con clasificación cualitativa llamado textura superficial dominante (TEXT-SRF-DOM), tomado de la Base de datos de Suelo Europea (ESDB) y presentado en el apartado 6.1.4. Utilizando funciones de pedo-transferencia continuas que permiten relacionar parámetros hidráulicos con algunas características físicas del suelo como textura y materia orgánica aplicando el modelo de Mualem-van Genuchten (1976), se han asignado valores a cada unidad cartográfica según la clase de textura definida y se han obtenido los respectivos mapas de parámetros K_s para cada una de las cuencas como se muestra en la Figura 6.42. En la Tabla 6.19 se presentan los valores de conductividad hidráulica según la textura y profundidad del suelo.



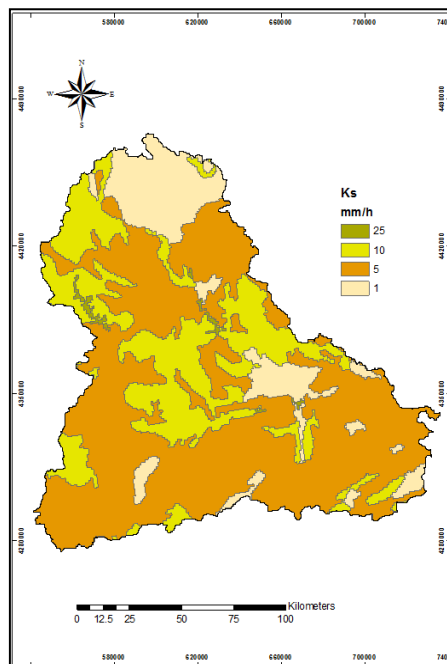
Tabla 6.19 Conductividades hidráulicas según la textura y profundidad del suelo.

TOPSOILS	Texture class	h (cm)	0	10	20	50	100	200	250	500	1000	2000	5000	10000	15000	16000
			pF	0	1	1.3	1.7	2	2.3	2.4	2.7	3	3.3	3.7	4	4.17
	Coarse	K	60.00	6.68	2.37	0.31	4.7E-2	5.8E-3	2.8E-3	3.2E-4	3.5E-5	3.8E-6	1.9E-7	2.1E-8	5.9E-9	4.7E-9
	Medium	K	12.10	0.61	0.29	0.08	2.5E-2	7.4E-3	4.8E-3	1.3E-3	3.5E-4	9.2E-5	1.6E-5	4.1E-6	1.9E-6	1.7E-6
	Medium-fine	K	2.27	0.51	0.33	0.14	5.7E-2	1.8E-2	1.1E-2	2.7E-3	5.9E-4	1.2E-4	1.4E-5	2.8E-6	1.1E-6	9.3E-7
	Fine	K	24.80	0.38	0.16	0.04	1.3E-2	3.5E-3	2.3E-3	5.9E-4	1.5E-4	3.8E-5	6.1E-6	1.5E-6	7.0E-7	6.1E-7
	Very fine	K	15.00	0.30	0.13	0.03	8.0E-3	1.8E-3	1.1E-3	2.1E-4	3.9E-5	7.3E-6	7.6E-7	1.4E-7	5.3E-8	4.5E-8
SUBSOILS	Texture class	h (cm)	0	10	20	50	100	200	250	500	1000	2000	5000	10000	15000	16000
			pF	0	1	1.3	1.7	2	2.3	2.4	2.7	3	3.3	3.7	4	4.17
	Coarse	K	70.00	10.50	3.24	0.30	3.1E-2	2.7E-3	1.2E-3	9.6E-5	7.6E-6	6.0E-7	2.0E-8	1.6E-9	3.7E-10	2.9E-10
	Medium	K	10.80	0.58	0.28	0.07	2.2E-2	5.6E-3	3.5E-3	8.0E-4	1.8E-4	3.9E-5	5.2E-6	1.1E-6	4.7E-7	4.1E-7
	medium-fine	K	4.00	0.72	0.45	0.19	7.1E-2	2.1E-2	1.3E-2	2.8E-3	5.5E-4	1.0E-4	9.9E-6	1.7E-6	6.4E-7	5.3E-7
	fine	K	8.47	0.18	0.09	0.03	1.1E-2	3.6E-3	2.4E-3	7.1E-4	2.1E-4	5.8E-5	1.1E-5	3.0E-6	1.4E-6	1.3E-6
	very fine	K	8.16	0.14	0.07	0.02	7.6E-3	2.2E-3	1.4E-3	3.5E-4	8.5E-5	2.0E-5	2.8E-6	6.4E-7	2.8E-7	2.4E-7
	organic	K	8.00	0.97	0.55	0.18	5.9E-2	1.5E-2	9.2E-3	1.9E-3	3.7E-4	6.8E-5	6.9E-6	1.3E-6	4.7E-7	4.0E-7



(a)

(b)



(c)

Figura 6.42 Conductividad hidráulica del suelo K_s (mm/h) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

- **Estimación mapa de parámetro K_p (conductividad hidráulica del acuífero).**

Para estimar la permeabilidad del sustrato rocoso, requerida en los procesos de percolación, pérdidas subterráneas y estimación del flujo base, se ha utilizado el mapa de categorías cualitativas de permeabilidad obtenido a partir de la reclasificación de unidades litológicas (apartado 6.1.5). A cada categoría cualitativa le corresponde un rango de valores de permeabilidad.

Para la asignación de los valores se ha recurrido a bibliografía relacionada con rangos típicos de permeabilidad en función de las características de cada unidad litológica y tipos de suelo obteniendo los valores presentados en la Tabla 6.20.

Tabla 6.20 Valores de permeabilidad adoptados para las diferentes categorías cualitativas de permeabilidad del sustrato rocoso.

Categoría cualitativa de Permeabilidad	Kp (mm/h)
C-MB	0.000416667
C-B	0.074094975
C-M	13.17615692
C-A	2343.088855
C-MA	416666.6667
E-MB	0.041666667
E-B	0.740949754
E-M	13.17615692
D-MB	4.16667E-06
D-B	0.000416667
D-M	0.041666667
D-A	4.166666667
D-MA	416.6666667
M-MB	4.16667E-07
M-B	2.34309E-05
M-M	0.001317616
Q-B	0.007409498
Q-M	1.317615692
Q-A	234.3088855
Q-MA	41666.66667
V-MB	0.36
V-B	1.138419958
I-MB	0.00000036
I-B	0.000036

En la Figura 6.43 se presenta los mapas estimados del parámetro K_p para su utilización en TETIS en cada una de las cuencas hidrográficas.

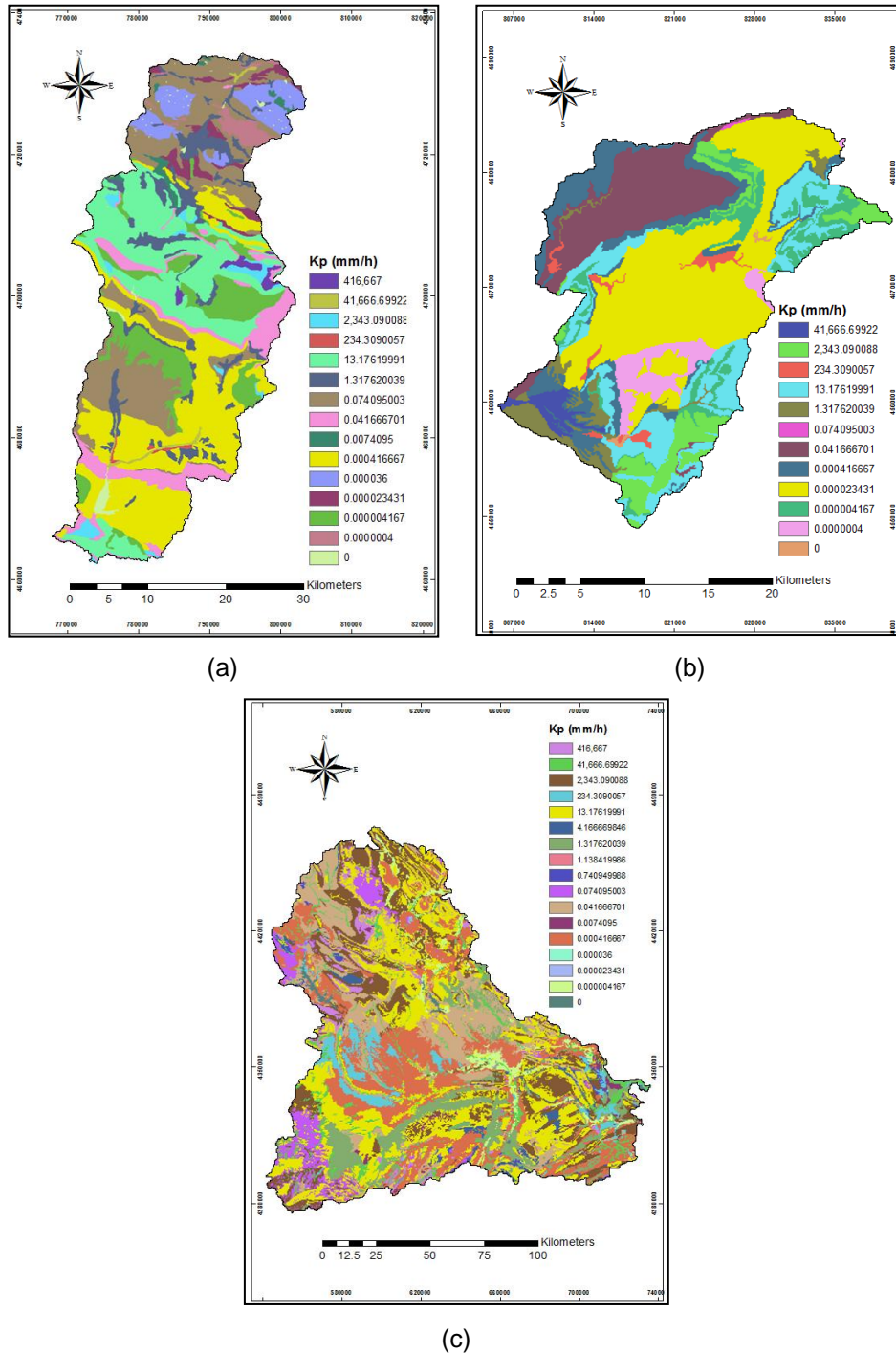


Figura 6.43 Conductividad hidráulica del acuífero K_p (mm/h) para la cuenca (a) Ésera, (b) Siurana y (c) Júcar.

6.2.4. Parámetros geomorfológicos en la red de cauces.

Como se mencionó en el capítulo 3, el modelo TETIS emplea para la propagación de la escorrentía en la red de drenaje, nueve parámetros geomorfológicos, los cuales relacionan la geometría y rugosidad de la sección transversal del cauce con el área de drenaje de la cuenca hasta la celda considerada mediante las relaciones algebraicas de tipo potencial descritas en el apartado 3.1. Los valores de los coeficientes y exponentes requeridos en la aplicación de esta formulación se obtienen normalmente a través de estudios regionales para zonas con características geomorfológicas homogéneas.

Al tratarse de parámetros fijos que sólo se actualizan si se dispone de nueva información geomorfológica y topográfica detallada, también se consideran como datos. En caso de no realizar un estudio geomorfológico detallado para las distintas regiones homogéneas en las que se clasifique el área de estudio, se propone utilizar los valores medios recomendados en la literatura (Vélez, 2001).

La información de parámetros geomorfológicos del cauce de las cuencas presentadas en este trabajo, se ha obtenido del estudio de la cuenca del Tajo (DIHMA, 2001), estudio en el que se detallan cinco zonas geomorfológicas (zona de alta montaña, cuenca media, cuenca baja, zona de cabecera y cauce del río), puesto que no se ha efectuado un estudio detallado que permitiera determinar estos parámetros en las cuencas de estudio. Los valores de los coeficientes y exponentes se detallan en la Tabla 6.21.

Como estos parámetros geomorfológicos influyen en la estimación de los parámetros de producción de escorrentía en la cuenca, la incertidumbre que se genera puede disminuirse en la calibración incluyendo el factor corrector relacionado a la velocidad de ladera (FC_9).

Tabla 6.21 Coeficientes y exponentes utilizados en las relaciones geomorfológicas del modelo TETIS para la propagación de la escorrentía en la red de cauces.

Parámetro	Intervalo de variación
K	1.2968
Φ	0.7571
a_1	3.1301



α_1	0.5088
α_2	0.3253
c_d	6.5156
Θ	0.6548
c_n	0.0470
ξ	0.1667

7. CALIBRACIÓN Y VALIDACION DEL MODELO

La calibración del modelo es el proceso por el cual los valores de los parámetros del modelo son identificados para su uso en una aplicación particular. Consiste en el uso de datos de lluvia-escorrentía y un procedimiento para identificar los parámetros del modelo que provean la mejor concordancia en los flujos observados y simulados. La identificación de los parámetros puede ser llevada a cabo manualmente, por prueba y error, o automáticamente utilizando técnicas de optimización matemática.

Para evaluar la seguridad predictiva de un modelo usualmente se divide el proceso de calibración en dos etapas diferentes: i) calibración y ii) validación. Para este propósito, dos grupos de series de datos de lluvia-caudal son reunidos. El primer grupo es utilizado en la calibración por sí mismo, mientras que el segundo grupo es usado en la verificación del modelo, esto es: una medición de la seguridad de la calibración. Una vez que el modelo ha sido calibrado y los parámetros validados, está listo para ser utilizado en la etapa predictiva de la modelación. Generalmente el ajuste entre los caudales calculados y observados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios V., 1986).

La importancia de la calibración varía con el tipo de modelo. Los modelos distribuidos tienen un gran número de parámetros, de los cuales la mayoría mantienen relación con los procesos físicos. La estructura del modelo TETIS permite la calibración, en forma manual o automática de parámetros: los 9 factores correctores que influyen en los procesos de producción y propagación de la escorrentía, los 6 valores iniciales de las variables de estado (almacenamiento en los tanques), un coeficiente, denominado β , para introducir la variabilidad espacial de la precipitación incorporando el efecto de la altitud y 4 factores correctores del módulo de nieve, para un total de 20 parámetros. Los FC_s corrigen de forma global los parámetros de producción (H_u , λ , K_s y K_p) y traslación, al multiplicarlos de forma directa (Francés, Vélez et al., 2007). La

calibración automática puede realizarse de todos o de un subconjunto de los elementos anteriores.

7.1. Calibración y validación con información hidrometeorológica puntual.

A partir de las series puntuales diarias de precipitación y temperatura descritas en el apartado 5.1.1 y con la serie de caudales medios diarios observados en las estaciones de aforo de cada una de las cuencas, se realizó la modelación hidrológica a escala diaria con el modelo hidrológico TETIS, en las respectivas cuencas, tomando los parámetros hidráulicos del suelo estimados en el apartado 6.2.4, denominados parámetros distribuidos.

A continuación se presentan los resultados en cada una de las cuencas de este estudio y una breve descripción de la metodología implementada.

7.1.1. Calibración cuenca del río Ésera.

Tras el procesamiento de la información necesaria para implementar el modelo TETIS, se procedió a seleccionar el periodo de calibración. Se optó por un periodo de un año hidrológico, el comprendido entre Octubre 1997 a Septiembre 1998, lo anterior justificado, en experiencias con el modelo TETIS, en las cuales los resultados han sido aceptables, asumiendo esta longitud de periodo para el proceso de calibración automática que emplea el modelo. De las estaciones de aforo ubicadas en la cuenca del río Ésera, para la calibración, se seleccionó la estación de aforo *Graus_013* (Figura 7.1).

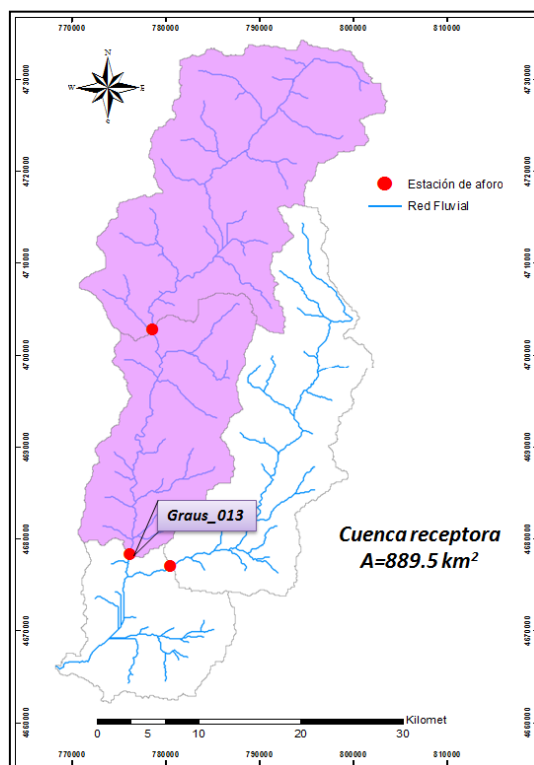


Figura 7.1 Ubicación estación de aforo Graus_013, utilizada para la calibración del modelo TETIS.

Por su parte, el estado inicial de los seis tanques que representan los distintos almacenamientos del suelo, se resuelve utilizando la división en regiones geomorfológicamente homogéneas para asignar valores iniciales comunes para cada tanque dentro de una región. Los valores son asignados de la siguiente forma: el almacenamiento estático (H_1), que está dado por un porcentaje de su capacidad máxima; el almacenamiento superficial (H_2), como una cantidad de agua disponible, normalmente nula o muy baja, el almacenamiento gravitacional (H_3), está dado como una cantidad de agua disponible desde el inicio del episodio, estado inicial del acuífero (H_4), está dado como una cantidad de agua al inicio del evento, el cauce a sección llena (H_5) y la interceptación por la vegetación (H_6) como porcentaje de su capacidad máxima (Francés, Vélez et al., 2007)

En el caso de estudio los valores de los almacenamientos iniciales no fueron obtenidos mediante calibración previa, se determinaron valores iniciales aproximados los cuales se lista en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Valores de los almacenamientos iniciales.

Humedad inicial	Valores
H_1 Almacenamiento estático (%)	50.00
H_2 Agua en superficie (mm)	0.00
H_3 Almacenamiento gravitacional (mm)	15.00
H_4 Nivel del acuífero (mm)	20.00
H_5 Cauce a sección llena (%)	10.00
H_6 Intercepción por la vegetación (%)	0.00

Como se comentó anteriormente, el modelo TETIS incluyen factores correctores que corrigen de forma global los diferentes mapas con las características del suelo o parámetros de calibración (manual o automática), permitiendo una corrección rápida y ágil de los diferentes procesos representados (Francés, Vélez et al., 2007).

En el proceso de calibración, se realizó una primera simulación variando los factores correctores (FC_s) sin ninguna calibración previa, y sin analizar el caudal observado en las estaciones de aforo, con el propósito de observar el comportamiento del modelo sin la implementación de la calibración automática. En este análisis se evidenció la influencia de la nieve, ubicada en la zona alta de la cuenca, con la respuesta del hidrograma de salida, por ende también se calibraron los variables correspondientes a fusión de nieve en el modelo TETIS.

Teniendo en cuenta lo anterior, fue necesario estimar un juego de FC_s representativos, para tal fin se procedió a realizar análisis con varias simulaciones hasta obtener los FC_s y las variables de fusión de nieve que se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Factores Corrector y variables de fusión de nieve obtenidos con calibración manual.

Factores Correctores	Sin calibración automática
FC_1 Almacenamiento estático	1.0
FC_2 Evaporación	0.8
FC_3 Infiltración	0.12
FC_4 Escorrentía directa	1.0
FC_5 Percolación	0.00020



FC_6 Interflujo	100.0
FC_7 Pérdidas	0.105
FC_8 Flujo base	15.50
FC_9 Velocidad del flujo	0.10
Variables Fusión de Nieve	
Coeficiente de fusión de nieve (mm/°C día)	2.00
Coeficiente de fusión de nieve por lluvia (mm/°C día)	3.50
Temperatura base para fusión de nieve (°C)	-2.00

Partiendo de los anteriores FC_s , el paso a seguir fue la implementación de la calibración automática del modelo, usando el algoritmo automático de optimización “*Shuffled Complex Evolution - University of Arizona*”, SCE-UA (Duan et al., 1992; Duan et al., 1994; Sorooshian et al., 1993; Yapo et al., 1998) acoplado al modelo TETIS (Vélez, 2003; Vélez and Francés, 2004; Francés et al, 2007). Este método es reconocido como uno de los más robustos y eficientes para la calibración de modelos lluvia-escorrentía.

Dentro del modelo TETIS el objetivo de SCE-UA es determinar los FC_s idóneos que intenten describir la realidad del sistema que se quiere representar. Por ende se procedió a establecer un rango inicial de búsqueda de los FC_s definiendo valores máximos y mínimos para cada FC a calibrar, con el fin de minimizar el tiempo computacional durante el proceso realizado por el algoritmo de optimización SCE-UA, fijando como función objetivo a minimizar el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe.

Tras un análisis de sensibilidad se decidió solo calibrar automáticamente los siguientes FC_s : almacenamiento estático (FC_1), infiltración (FC_3), interflujo (FC_6) y velocidad del flujo (FC_9) y las variables correspondientes a fusión de nieve, debido a que presentaron mayor sensibilidad al realizar la calibración manual. A primera vista se puede evidenciar que el FC_1 correspondiente al almacenamiento estático es una variable poco sensible con respecto a las demás calibradas ya que se observa poca dispersión en los resultados, pero es

debido a que el rango de variación del FC_1 es menor que el de los demás factores, aunque la dispersión es mayor para estos últimos (Figura 7.2)

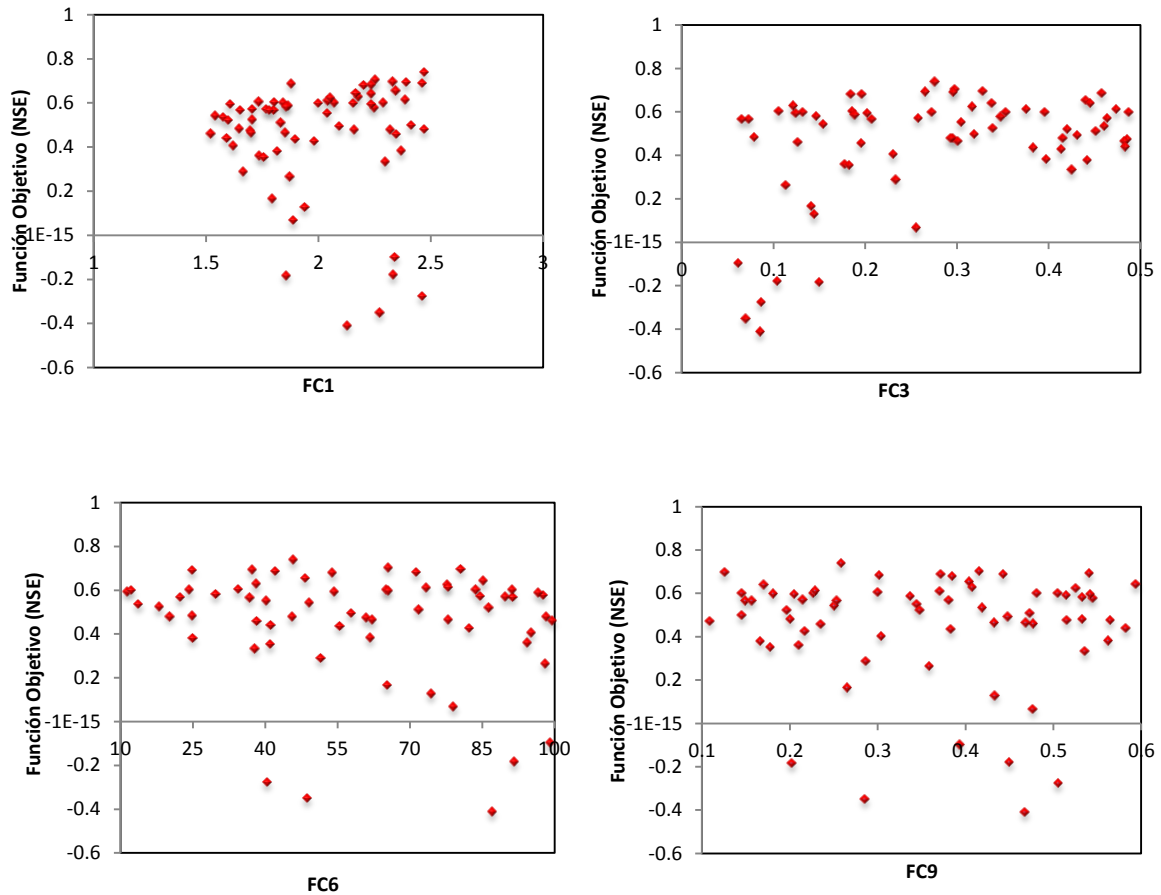


Figura 7.2 Resultado del proceso de calibración manual para la cuenca del río Ésera con parámetros distribuidos e información puntual.

En la Tabla 7.3 se presentan los factores correctores resultantes del módulo de Calibración Automática (SCE-UA) del modelo TETIS.

Tabla 7.3 Factores Corrector y variables de fusión de nieve resultantes del módulo de Calibración Automática (SCE-UA) del modelo TETIS.

Factores Correctores	Calibración automática
FC_1 Almacenamiento estático	2.47126
FC_2 Evaporación	0.80015
FC_3 Infiltración	0.27543
FC_4 Escorrentía directa	1.00000

FC_5 Percolación	0.00020
FC_6 Interflujo	45.83107
FC_7 Pérdidas	0.10500
FC_8 Flujo base	15.50930
FC_9 Velocidad del flujo	0.25856
Variables Fusión de Nieve	
Coeficiente de fusión de nieve (mm/°C día)	0.75306
Coeficiente de fusión de nieve por lluvia (mm/°C día)	2.88967
Temperatura base para fusión de nieve (°C)	-1.46443

El modelo TETIS fue calibrado en la estación de aforo Graus_013, reservando los puntos de simulación restantes para la validación. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.3 y en la Tabla 7.4 el índice de Nash y el error cuadrático medio RMSE.

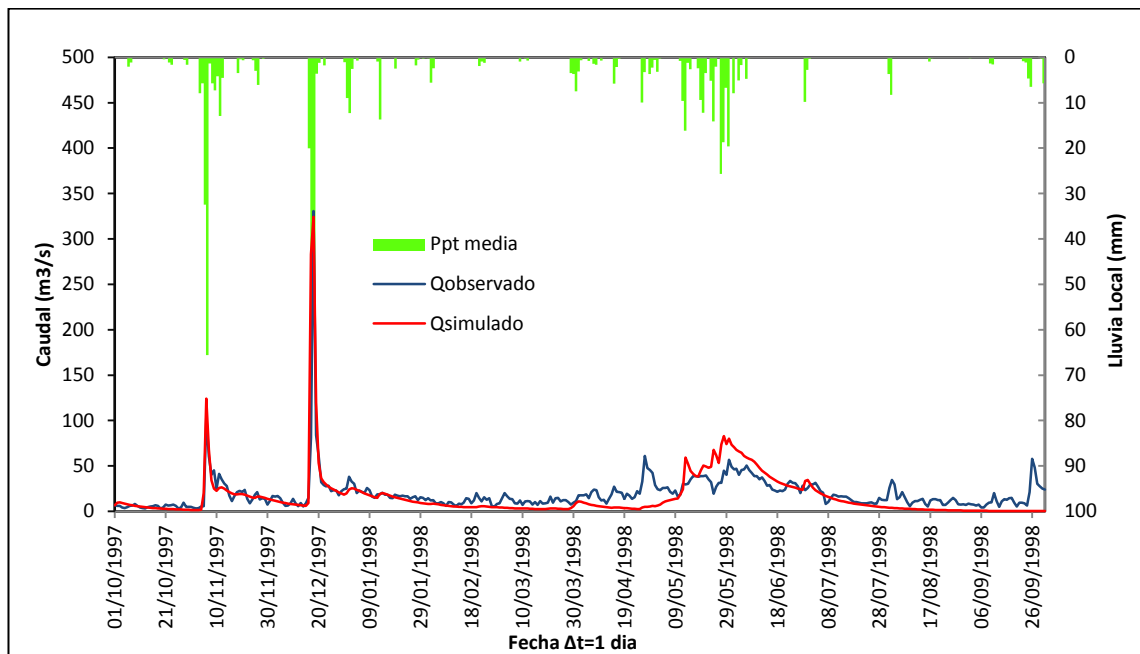


Figura 7.3 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 1998 en Graus_013, con FC_s resultantes del modulo SCEUA.

Tabla 7.4 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/98
Índice de eficiencia NSE	0.4056
RMSE (m ³ /s)	16.252

A priori se puede observar en la Figura 7.3 que el modelo TETIS reproduce de forma similar el caudal máximo pico observado, $Q_{sim} = 324.36 \text{ m}^3/\text{s}$ frente a $Q_{obs} = 330.75 \text{ m}^3/\text{s}$, obteniendo un error cuadrático medio $RMSE = 16.25$. Por otra parte los tiempos al pico coinciden (Error $t_p = 0.00\%$), por lo tanto la distribución de los caudales parece ser adecuada. En términos generales, los procesos que intervienen en el balance hídrico general, han sido representados aceptablemente teniendo en cuenta la calidad de la información hidrometeorológica y los parámetros de entrada del modelo, obteniendo mediante el empleo de la función objetivo un coeficiente de Nash y Sutcliffe (NSE) con valor de 0.40 (Tabla 7.4). Este valor tiende a ser pequeño debido a la presencia de nieve.

7.1.2. Validación cuenca del río Ésera.

Para comprobar la capacidad del modelo previamente calibrado para reproducir la variabilidad de las series históricas observadas en las estaciones de aforo y demostrar que se están simulando apropiadamente los procesos físicos en un sitio específico, se optó por validar el modelo en escenarios distintos al de calibración. En el caso de un modelo hidrológico distribuido como TETIS, estos escenarios pueden ser:

- Validación temporal: en otro periodo de tiempo en el mismo punto de calibración.
- Validación espacial: en otro punto de la cuenca y mismo periodo de tiempo de calibración.
- Validación espacio-temporal: en otro punto de la cuenca y periodo de tiempo distinto al de calibración.

Para la validación del modelo TETIS en la cuenca del río Ésera, se seleccionó el periodo de episodios desde Octubre de 1997 a Septiembre de 2007. Se procedió a realizar la validación temporal en la subcuenca aforada en la estación *Graus_013* y para la validación espacio-temporal en las subcuencas con estación de aforo *Campo_258* y *Capella_047* (Figura.7.4).

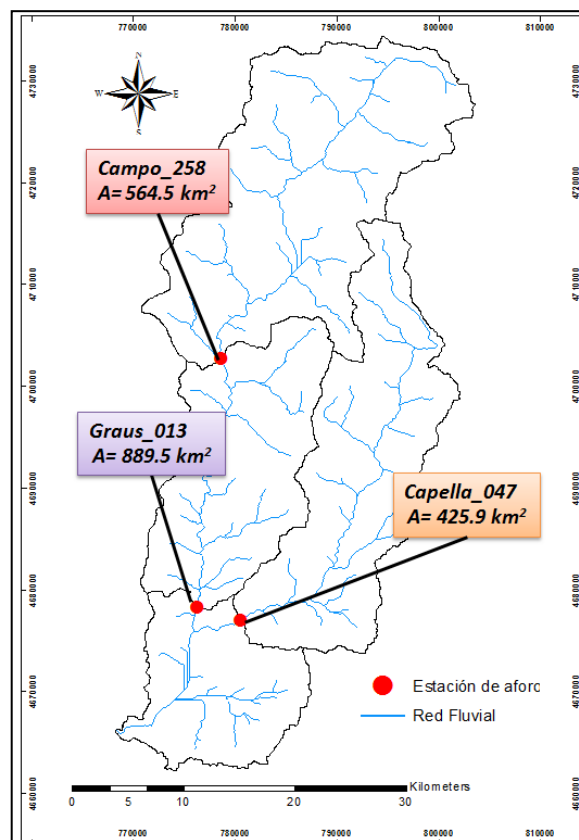


Figura 7.4 Estaciones de aforo *Graus_013*, *Campo_258* y *Capella_047* utilizadas para la validación del modelo TETIS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las validaciones en los dos escenarios, validación temporal y validación espacio – temporal.

- *Validación temporal.*

En la Figura 7.5, se observa el hidrograma resultante de la simulación del periodo seleccionado para la validación temporal (Octubre de 1997 a

Septiembre de 2007), de la subcuenca aforada en la estación *Graus_013* usando los factores correctores definidos mediante el módulo de Calibración Automática (SCE-UA) del modelo TETIS; y en la Tabla 7.5 se presenta el resumen de almacenamientos y flujos medios obtenidos mediante el balance hídrico.

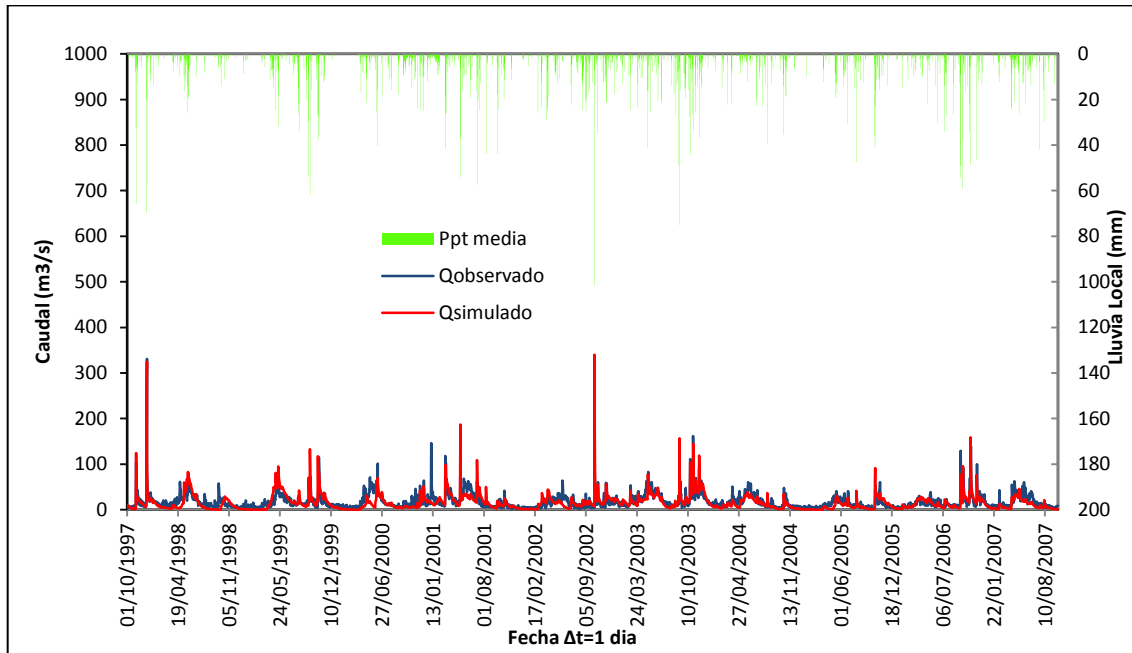


Figura 7.5 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en *Graus_013*.

Tabla 7.5 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.685
Entrada por Lluvia [Hm3]:	6973.165
Flujo de salida E directa [Hm3]:	1387.342
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	130.766
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	5585.781
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	2998.178
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00020
Excedente de Ppt [Hm3]:	4880.445

Escorrentía directa [Hm3]:	459.942
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	20.603
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	4420.294
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	4384.933
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	16.123
Entrada por Percolación [Hm3]:	47.613
Flujo Base [Hm3]:	4.278
Perdidas subterráneas [Hm3]:	47.613
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	4849.241

En la Figura 7.5, la comparación visual del hidrograma obtenido por el modelo TETIS y el hidrograma observado permite considerar que, en términos generales, se llegan a reproducir de forma aceptable los distintos eventos de la serie. Sin embargo, existen eventos simulados que no coinciden con los observados.

Con respecto a los valores listados en la Tabla 7.5 correspondientes al balance hídrico, la mayor aportación al caudal de salida de la cuenca está dada por el flujo subsuperficial (90%), seguido por la escorrentía directa con un (9%). Cabe destacar el aporte realizado por la nieve, que se evidencia por un aumento en el excedente, el cual se incrementa en un 89% ya que su valor inicial debería ser de aproximadamente 2588 hm³ pero por el aporte de nieve, alrededor 2293 hm³, resulta un excedente de 4880 hm³.

Con el índice de NSE obtenido, NSE=0.33, se corrobora que el modelo TETIS representa de forma aceptable los diferentes procesos caracterizados. Es un valor bastante bajo pero en línea con el valor obtenido en la calibración. En la Tabla 7.6 se presentan los criterios de evaluación obtenidos en la validación temporal.

Tabla 7.6 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.3277
RMSE (m ³ /s)	12.876

- *Validación Espacio-Temporal.*

Para validar el modelo en otro punto de la cuenca y en un periodo de tiempo distinto al de calibración (Octubre de 1997 a Septiembre de 2007) se escogieron dos estaciones de aforo Campo_258 y Capella_04. Cabe destacar que el río aforado en Capella, río Isábena, es el mayor tributario del río Ésera, considerándose como un sistema independiente, por ende se evaluará si los FCs determinados en la calibración se pueden extrapolar y por lo tanto demostrar que los componentes hidrológicos dominantes han sido adecuadamente simulados.

La cuenca aforada en Campo_258 tiene un área de aproximadamente 565 km². A continuación se presentan la validación del modelo hidrológico a escala diaria (Figura 7.6) y el balance hídrico producto de la validación determinada por el modelo TETIS (Tabla 7.7).

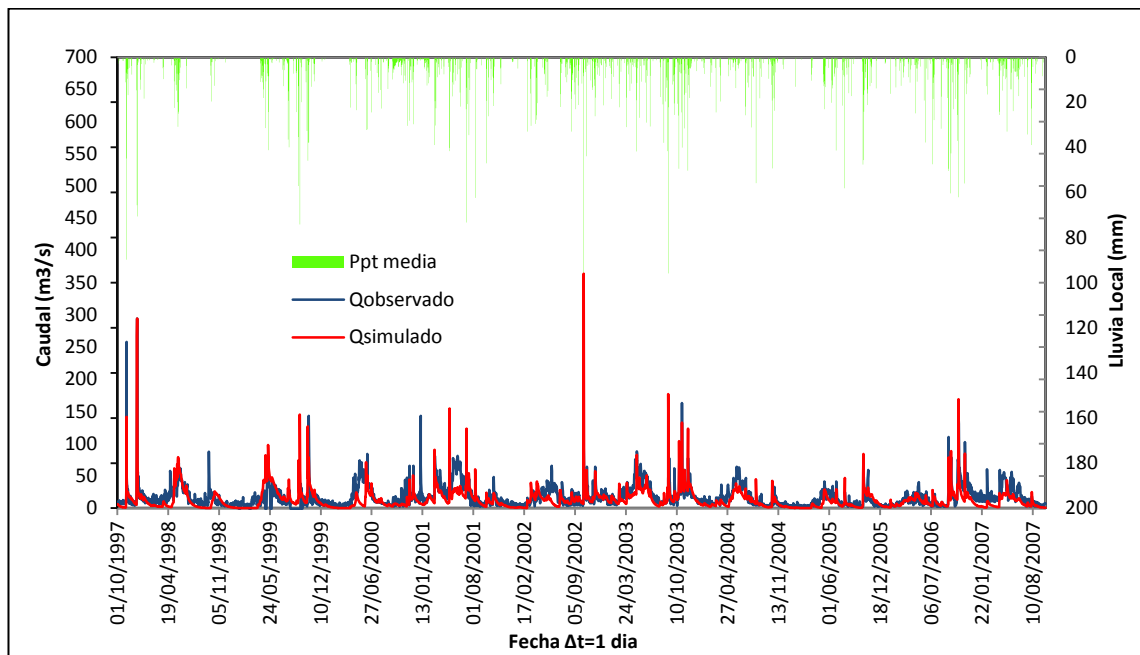


Figura 7.6 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Campo_258.

En la Tabla 7.7 se presenta el balance hídrico el cual indica que el mayor aporte al hidrograma de salida está dado por flujo subsuperficial (89.7%), luego la escorrentía directa (10.2%) y en menor medida el flujo base (0.1%). Al igual que en el anterior caso el aporte de la nieve es significativo, aumentando en un 87% el excedente. Con respecto a los demás flujos de salida, el correspondiente al del agua capilar en el suelo es un 36% de la entrada por lluvia, la evaporación por interceptación 18% y las pérdidas subterráneas relativamente despreciables (1%).

Tabla 7.7 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.691
Entrada por Lluvia [Hm3]:	4816.271
Flujo de salida E directa [Hm3]:	849.842
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	99.244
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	3966.404
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	1739.047

Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00028
Excedente de Ppt [Hm3]:	4157.230
Escorrentía directa [Hm3]:	421.502
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	27.583
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	3735.671
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	3707.048
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	15.655
Entrada por Percolación [Hm3]:	36.193
Flujo Base [Hm3]:	3.142
Perdidas subterráneas [Hm3]:	36.193
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	4131.747

El índice de Nash obtenido es de $NSE=0.28$ (Tabla 7.8). Este resultado se debe a que existen eventos simulados los cuales no corresponden a los observados, por otra parte la influencia de la nieve, que hace presencia en la mayoría de los eventos resultantes en todo el periodo de validación. Adicionalmente, la serie de caudal observado presenta numerosas pequeñas fluctuaciones, probablemente debidas al fenómeno de deshielo, que tiende a disminuir el índice de Nash- Sutcliffe.

Tabla 7.8 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.2783
RMSE (m^3/s)	14.434

La cuenca aforada en Capella_047 tiene un área de aproximadamente 426 km^2 . A continuación se presentan la validación del modelo hidrológico a escala diaria (Figura 7.7) y el balance hídrico producto de la validación determinada por el modelo TETIS (Tabla 7.9).

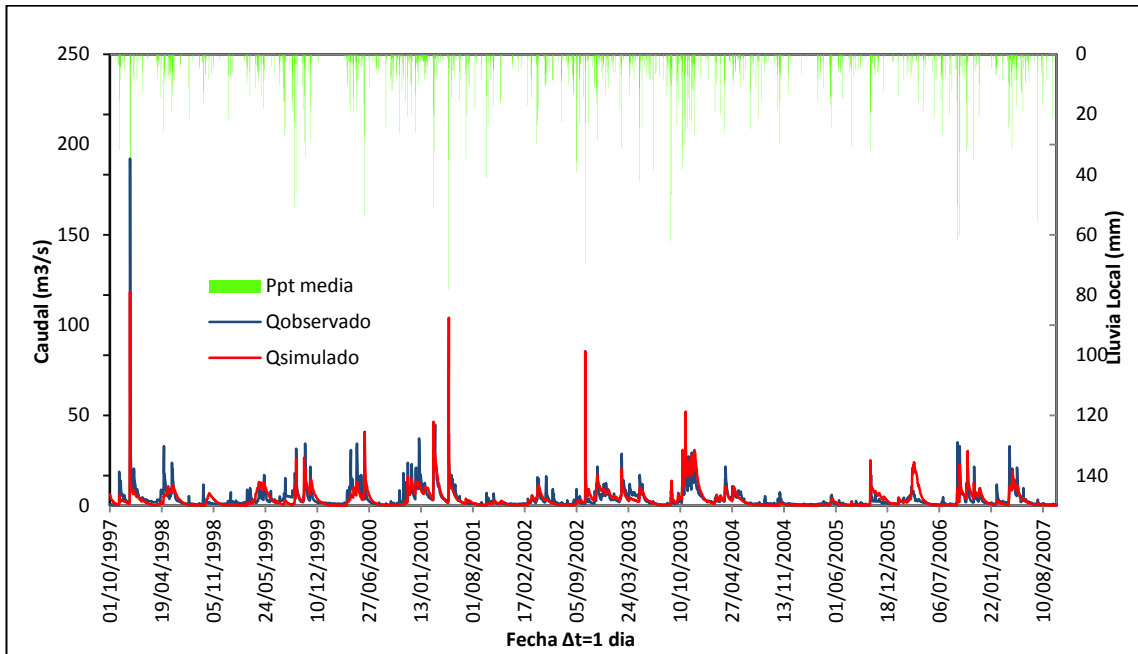


Figura 7.7 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Capella_047.

Tabla 7.9 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.604
Entrada por Lluvia [Hm3]:	3052.888
Flujo de salida E directa [Hm3]:	697.210
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	167.427
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	2355.668
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	1638.691
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00010
Excedente de Ppt [Hm3]:	1234.060
Escorrentía directa [Hm3]:	90.980
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	11.100
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	1143.093
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	1081.632
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	17.171

Entrada por Percolación [Hm3]:	67.669
Flujo Base [Hm3]:	1.345
Perdidas subterráneas [Hm3]:	67.669
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	1173.996

En los hidrogramas de la Figura 7.7, se observa una mejor representación del modelo TETIS: en todos los eventos se puede observar un buen ajuste entre los hidrogramas observados y los hidrógramas simulados, en cuanto a su magnitud, cubre un rango bastante amplio, el ajuste es satisfactorio. El caudal máximo simulado frente al caudal máximo observado, es subestimado obteniendo $Q_{sim}=118.44 \text{ m}^3/\text{s}$ frente $Q_{obs}=192.20 \text{ m}^3/\text{s}$, el error en tiempo al pico es relativamente despreciable (1.27%). Por su parte la influencia de la nieve es significativa, aumentando en un 72% el excedente. El caudal base y la recesión de los eventos simulados concuerdan en el conjunto de eventos, obteniendo un $NSE=0.48$ (Tabla 7.10) demostrando el buen desempeño del modelo ante eventos de distintos órdenes de magnitud, manteniendo coherencia y robustez.

Tabla 7.10 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.4787
RMSE (m^3/s)	4.219

7.1.3. Calibración cuenca del río Siurana.

Al igual que en la anterior cuenca, en este punto ya se cuenta con los datos necesarios para realizar la modelación en TETIS. Por lo tanto el periodo seleccionado para la calibración es un año hidrológico, comprendido entre Octubre 2003 a Septiembre 2004. En la cuenca hidrológica del río Siurana solo se cuenta con una estación de aforo, ubicada en el *Embalse de Ciurana_9868* (Figura 7.8), lo cual se considera un factor limitante al momento de realizar la

validación en otro punto de la cuenca y periodo de tiempo distinto al de calibración (validación espacio-temporal).

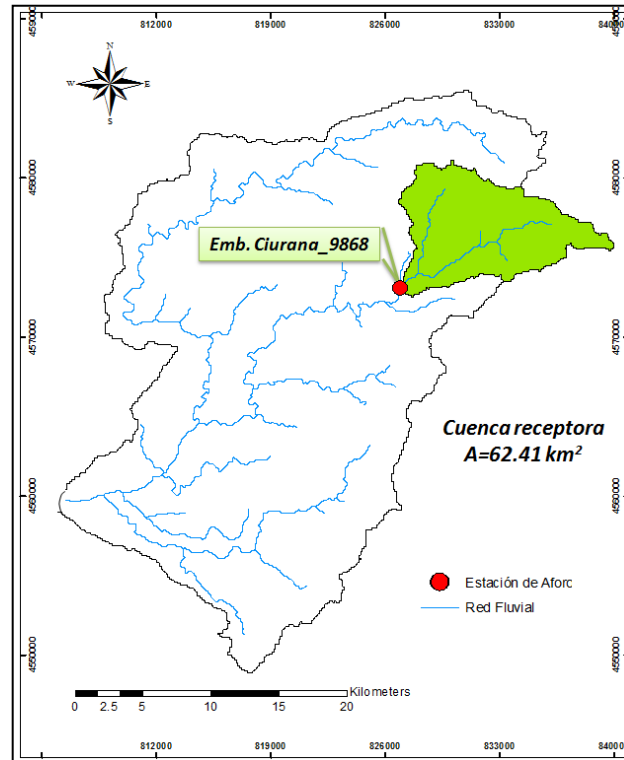


Figura 7.8 Ubicación estación de aforo Embalse Ciurana_9868, utilizada para la calibración del modelo TETIS.

Los valores de los estado iniciales de los seis tanques que representan los distintos almacenamientos del suelo, tampoco fueron calibrados, asumiendo un valor inicial nulo, es decir que la cuenca no presenta humedad desde el inicio del episodio.

Siguiendo con el proceso de calibración se realizaron varias simulaciones con el fin de elegir los FC_s óptimos para implementar el algoritmo de optimización (SCE-UA) que utiliza el modelo TETIS. En la Tabla 7.11 se presentan los FC_s obtenidos con la calibración automática a partir del juego de FC_s que se consideraron representativos. Cabe destacar que para este caso se calibraron automáticamente todos los FC_s que intervienen en el modelo TETIS, debido al tamaño reducido de la cuenca, lo cual es una ventaja ya que se minimiza el tiempo computacional.

Tabla 7.11 Factores Correctores antes y después de la calibración automática.

Factores Correctores	Sin calibración automática	Calibración automática
FC_1 Almacenamiento estático	0.6	0.29409
FC_2 Evaporación	1.00	1.74460
FC_3 Infiltración	10.0	12.85109
FC_4 Escorrentía directa	5.50	11.18369
FC_5 Percolación	4.50	6.31780
FC_6 Interflujo	200.0	164.66239
FC_7 Pérdidas	10.0	15.58010
FC_8 Flujo base	25.0	32.31740
FC_9 Velocidad del flujo	15.0	19.03180

El modelo TETIS fue calibrado en la estación de aforo Embalse de Ciurana_9868, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.9 y en la Tabla 7.12 el índice estadístico NSE y el error cuadrático medio RMSE para la calibración diaria realizada.

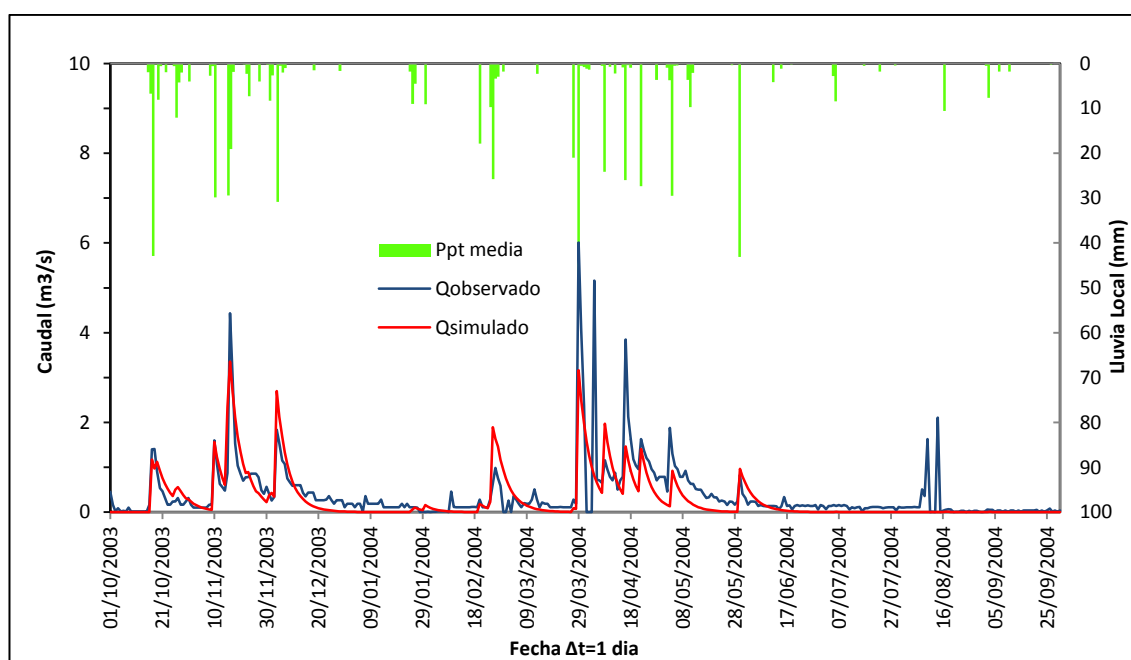


Figura 7.9 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2004 en Embalse Ciurana_9868, con FC_s resultantes del modulo SCEUA.

Tabla 7.12 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Siurana.

Criterio de evaluación	R. Siurana Evento 2003/04
Índice de eficiencia NSE	0.5326
RMSE (m ³ /s)	0.457

En el hidrograma resultante presentado en la Figura 7.9 se puede observar que el evento de calibración es un gran episodio de tipo estacional compuesto por varios sub-eventos al interior del mismo con picos claramente identificables ocasionados por tormentas de algunos días o incluso semanas de duración, algunos de éstos subestimados y otros sobreestimados, obteniendo un error cuadrático medio $RMSE=0.457$. El criterio para aceptar una calibración es subjetivo, a primera vista el hidrograma resultante no es satisfactorio, pero teniendo en cuenta la calidad de los datos se obtuvo un $NSE= 0.53$ (Tabla 7.12), por ende se validará el modelo para constatar si la calibración realizada es adecuada.

7.1.4. Validación cuenca del río Siurana.

Debido a la falta de información de otras estaciones de aforo diferentes a la calibrada no fue posible realizar validación espacio-temporal que permita comprobar la robustez del modelo en otras situaciones. Cabe resaltar que la serie de caudales aforados en el periodo seleccionado para la validación, Octubre de 2003 a Septiembre de 2007, tiene un porcentaje de datos faltantes igual al 12%, lo cual puede influir de forma negativa en los resultados. No obstante, se realizó la validación temporal cuyo objetivo es indicar una adecuada capacidad del modelo para predecir caudales en otro periodo de tiempo, como se mostrará más adelante.

- *Validación temporal.*

En la Figura 7.10, se observa los hidrogramas resultante de la simulación del periodo seleccionado para la validación temporal (Octubre de 2003 a

Septiembre de 2007) y en la Tabla 7.13 el resumen de almacenamientos y flujos medios en la subcuenca aforada en la estación *Embalse Ciurana_9868*.

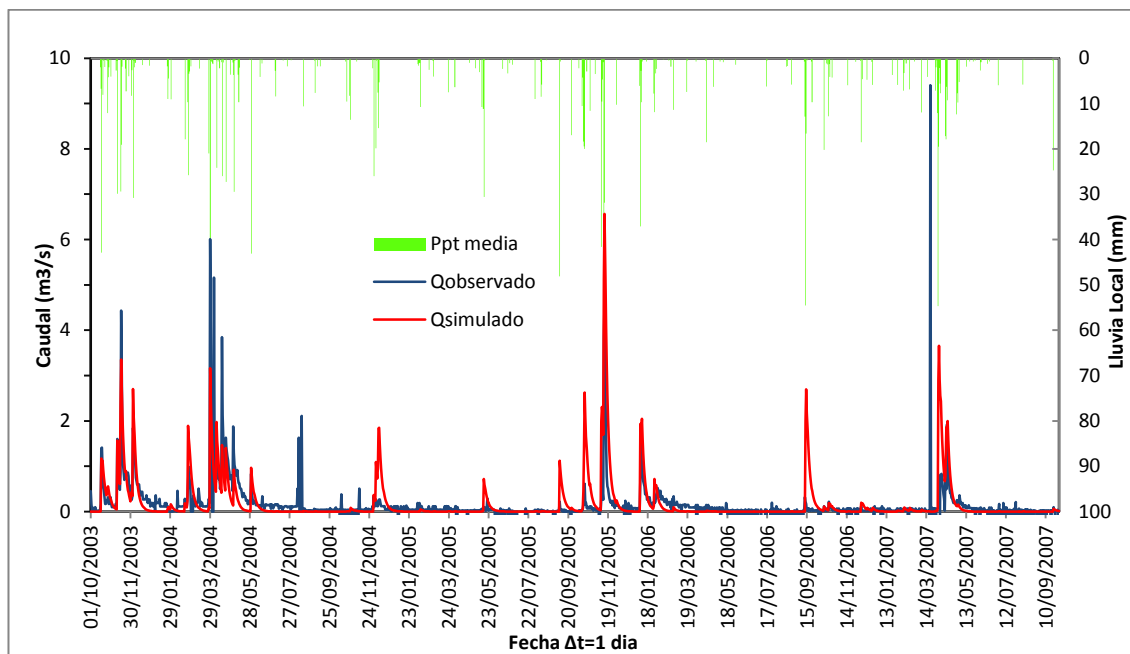


Figura 7.10 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2007 en *Embalse Ciurana_9868*.

Tabla 7.13 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.396
Entrada por Lluvia [Hm3]:	109.037
Flujo de salida E directa [Hm3]:	38.099
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	9.445
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	70.938
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	29.406
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.000
Excedente de Ppt [Hm3]:	41.130
Escorrentía directa [Hm3]:	0.000
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	1.165
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	41.130

Flujo Subsuperficial [Hm3]:	23.786
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.109
Entrada por Percolación [Hm3]:	17.324
Flujo Base [Hm3]:	0.00001
Perdidas subterráneas [Hm3]:	17.313
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	23.800

En la Tabla 7.13 se observa que en el balance hídrico de la cuenca, la mayor aportación a la escorrentía total se da por medio del flujo subsuperficial (99.94%), por lo que se deduce que estamos en presencia de una “Crecida Subsuperficial”, considerado por muchos autores como un gran contribuyente a la generación del caudal pico (Whipkey, 1965; Jones, 1971; Weynman, 1973). El resto del flujo de salida de la cuenca con respecto a la entrada por lluvia se da por evaporación del agua interceptada en la vegetación (35%) y flujo de salida por ET en el suelo (27%).

Lo anteriormente comentado, se demuestra con los estadísticos obtenidos (Tabla 7.14), lo que lleva a deducir, con un valor de NSE de 0.134, que el conjunto de factores correctores estimados inicialmente, no son los más adecuados para que el modelo TETIS represente de forma favorable los diferentes procesos caracterizados.

Tabla 7.14 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Siurana.

Criterio de evaluación	R. Siurana Evento 2003/07
Índice de eficiencia NSE	0.134
RMSE (m ³ /s)	0.473

7.1.5. Calibración cuenca del río Júcar.

La calibración en la estación de aforo *Pajaroncillo_8090* con una cuenca receptora de 860.7 Km² frente a 21430 Km² de la cuenca en general (Figura

7.11), se comenzó realizando previamente el calentamiento del modelo con la finalidad de obtener las condiciones de humedad antecedentes del sistema y comportamiento del acuífero al inicio del periodo de calibración.

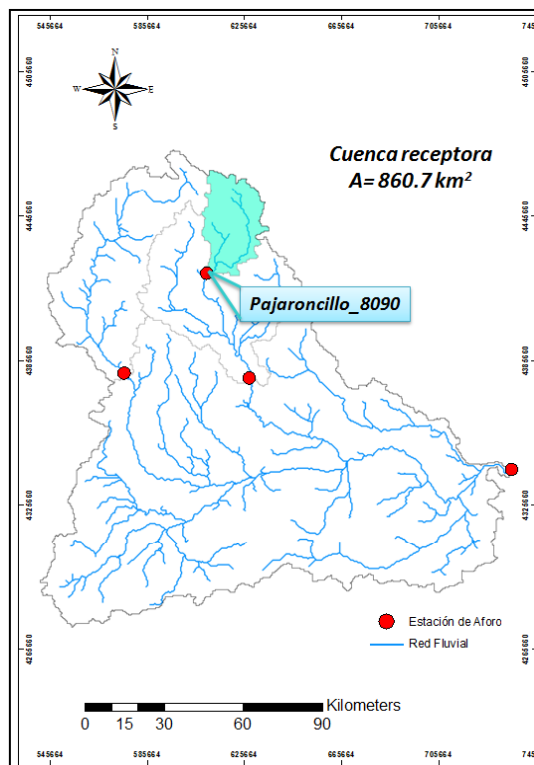


Figura 7.11 Ubicación estación de aforo Pajaroncillo_8090, utilizada para la calibración del modelo TETIS.

Las condiciones iniciales se obtuvieron de la simulación encadenada de periodos de tiempo. Es decir, el resultado final de los tanques en la simulación del periodo de calentamiento (Octubre de 1999-Septiembre de 2002) fueron las condiciones iniciales para el periodo Octubre de 2002-Septiembre de 2003 (calibración) y la salida de este último para la validación (Octubre de 2003-Setiembre de 2008) para cada juego de factores correctores. En tal sentido el proceso es limpio ya que mantiene inalterados los resultados que se obtienen con los factores correctores, mostrando así, que si los resultados de validación son aceptables o buenos, el modelo es robusto. Mucho más en el caso de las cuencas mediterráneas, donde las condiciones iniciales influyen en gran medida debido a que la escorrentía superficial es principalmente hortoniana. En

la Tabla 7.15 y 7.16 se listan los valores de los almacenamientos iniciales y los FC_s usados en el proceso de calibración.

Tabla 7.15 Valores de los almacenamientos iniciales resultantes del periodo de calentamiento.

Humedad inicial	Valores
H_1 Almacenamiento estático (%)	28.844
H_2 Agua en superficie (mm)	0.008
H_3 Almacenamiento gravitacional (mm)	11.153
H_4 Nivel del acuífero (mm)	5.198
H_5 Cauce a sección llena (%)	0.001
H_6 Intercepción por la vegetación (%)	0.00

Tabla 7.16 Factores correctores de la calibración resultantes del periodo de calentamiento.

Factores Correctores	Valores
FC_1 Almacenamiento estático	1.5797
FC_2 Evaporación	0.6343
FC_3 Infiltración	0.3228
FC_4 Escorrentía directa	0.003
FC_5 Percolación	0.1913
FC_6 Interflujo	58.7452
FC_7 Pérdidas	0.0074
FC_8 Flujo base	17.9703
FC_9 Velocidad del flujo	0.9812

La calibración final del modelo en la estación de aforo *Pajaroncillo_8090* obtenida en el periodo de un año hidrológico Octubre 2002 a Septiembre 2003 (Figura 7.12), tomando como información hidrometeorológica puntual la presentada en el apartado 5.1.1, donde para este caso se combinaron datos puntuales de AEMET y SAIH de la CHJ, con el objetivo de tener mayor información de lluvia; generó resultados óptimos con valores de criterios de evaluación detallados en la Tabla 7.17.

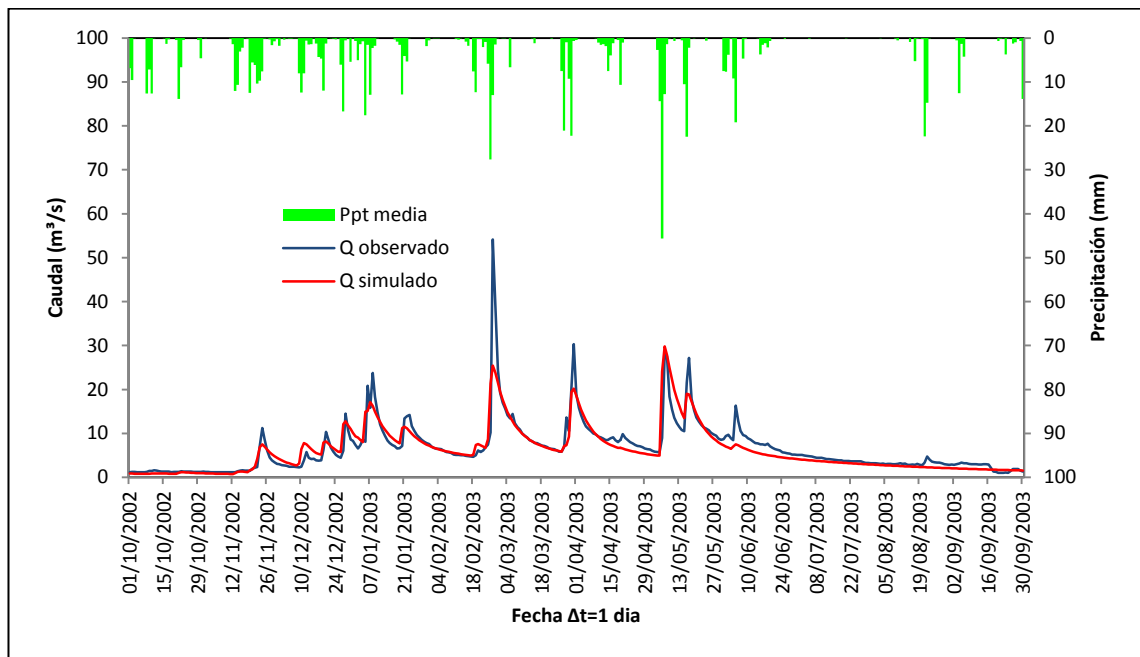


Figura 7.12 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC_s resultantes del periodo de calentamiento. . Información puntual SAIH y AEMET.

Tabla 7.17 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2002/03
Índice de eficiencia NSE	0.786
RMSE (m^3/s)	2.681

En un análisis visual de los resultados presentados en la Figura 7.12 se puede observar que al inicio del episodio el modelo TETIS representa de forma satisfactoria el caudal base simulado frente al observado, lo que indica que las condiciones impuestas de los almacenamientos y aportaciones subterráneas fueron las adecuadas. En el evento donde se presenta el caudal pico máximo, se puede observar que no se llega a reproducir similitud entre los picos con un $Q_{sim}=29.78 m^3/s$ frente a un $Q_{obs}= 54.12 m^3/s$, resultando un índice $RMSE=2.681$. A pesar de lo anteriormente expuesto el valor del índice de eficiencia $NSE=0.79$ obtenido indica que los resultados se puede considerar óptimos.

Adicionalmente se realizó otras modelaciones teniendo en cuenta solo datos de lluvia puntual de AEMET y SAIH CHJ por separado, para analizar la influencia de la densidad de las estaciones. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la calibración, para cada uno de los casos mencionados.

- *Calibración datos puntuales AEMET.*

En la Figura 7.13 y Tabla 7.18 se presentan los resultados obtenidos del modelo usando parámetros distribuidos e información puntual de la fuente de datos AEMET.

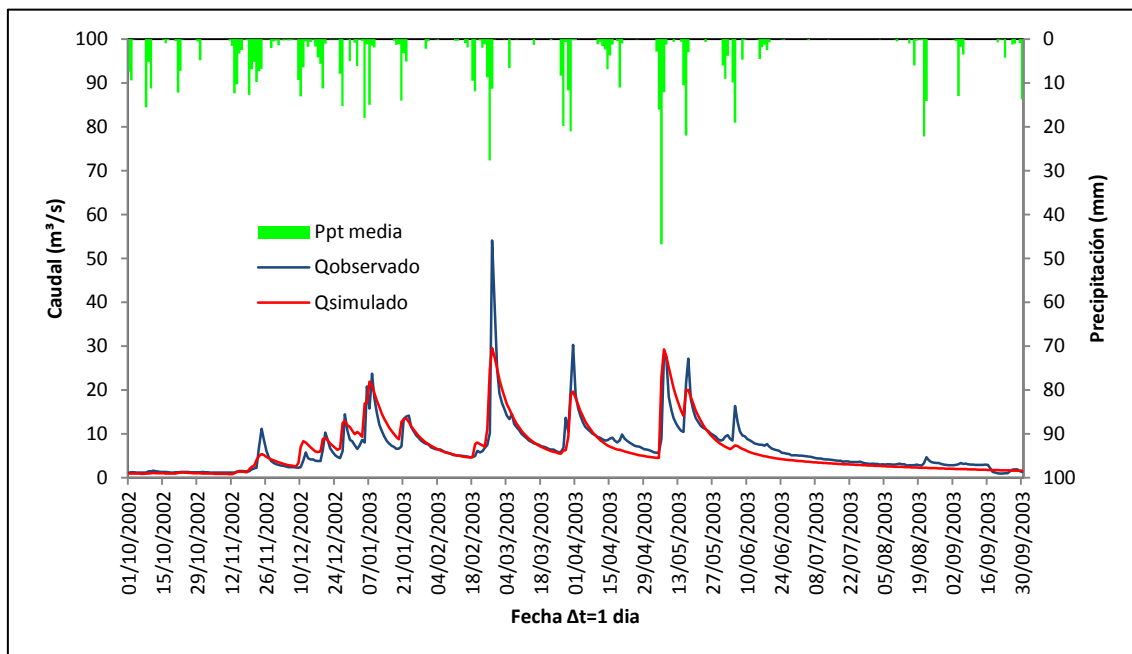


Figura 7.13 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC_s resultantes del periodo de calentamiento. Información puntual AEMET.

Tabla 7.18 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2002/03
Índice de eficiencia NSE	0.7814
RMSE (m^3/s)	2.71

- *Calibración datos puntuales SAIH CHJ.*

En la Figura 7.14 y Tabla 7.19 se presentan los resultados obtenidos del modelo usando parámetros distribuidos e información puntual de la fuente de datos del SAIH de la CHJ.

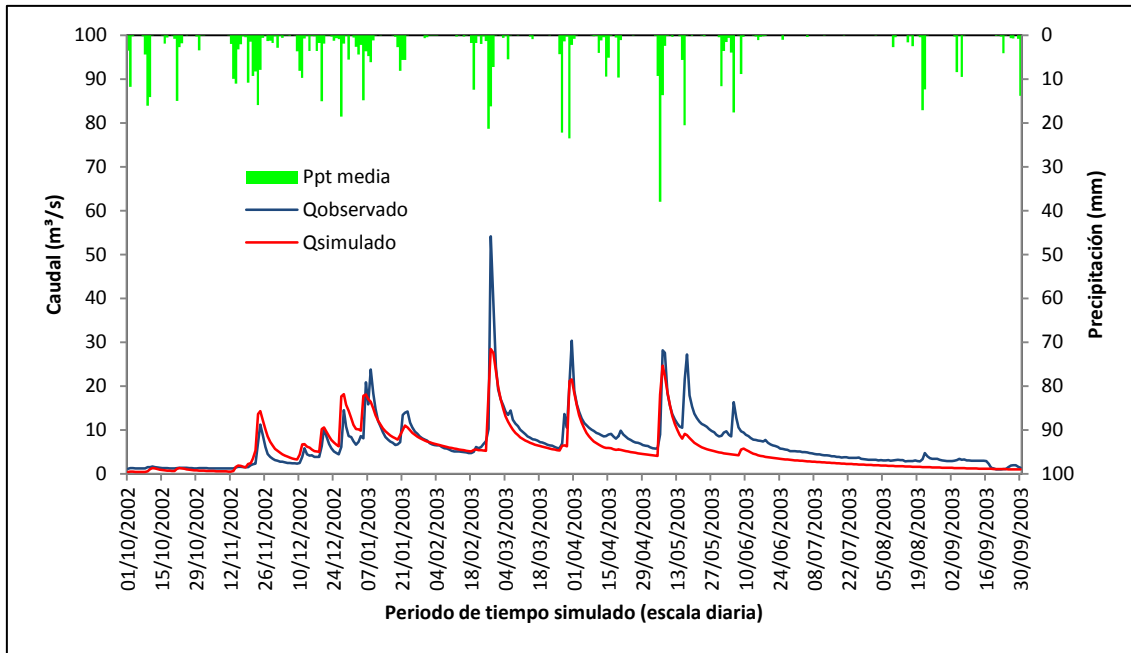


Figura 7.14 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en Pajaroncillo_8090, con FC_s resultantes del periodo de calentamiento. Información puntual SAIH CHJ.

Tabla 7.19 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2002/03
Índice de eficiencia NSE	0.6868
RMSE (m^3/s)	3.244

7.1.6. Validación cuenca del río Júcar.

Para la validación del modelo TETIS en la cuenca del río Júcar, se seleccionó el periodo de episodios desde Octubre de 2003 a Septiembre de 2008. Se procedió a realizar la validación temporal en la subcuenca aforada en la estación *Pajaroncillo_8090* y para la validación espacio-temporal en las

subcuencas con estación de aforo *Contreras_8130* y *Alarcón_8107* (Figura.7.15), usando la combinación de datos puntuales SAIH y AEMET. Adicionalmente se realizó la validación con el grupo de datos por separado.

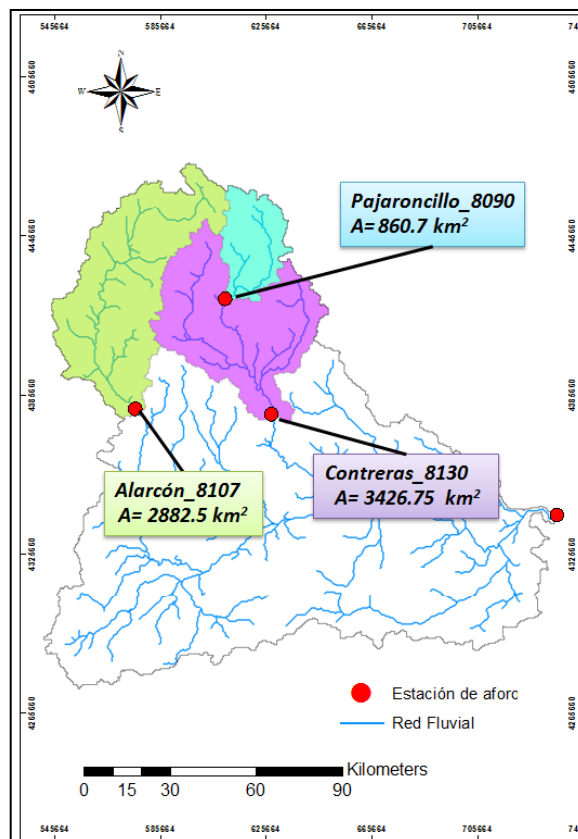


Figura 7.15 Estaciones de aforo *Pajaroncillo_8090*, *Contreras_8130* y *Alarcón_8107* utilizadas para la validación del modelo TETIS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las validaciones en los dos escenarios, validación temporal y validación espacio – temporal.

- *Validación temporal usando datos SAIH y AEMET.*

Con los factores correctores de la calibración, se realizó la validación temporal en Pajaroncillo, período octubre del 2003 a septiembre del 2008, obteniéndose buenos resultados que se visualizan en la Figura 7.16 y en la Tabla 7.20 se presenta el resumen de almacenamientos y flujos medios en la subcuenca aforada.

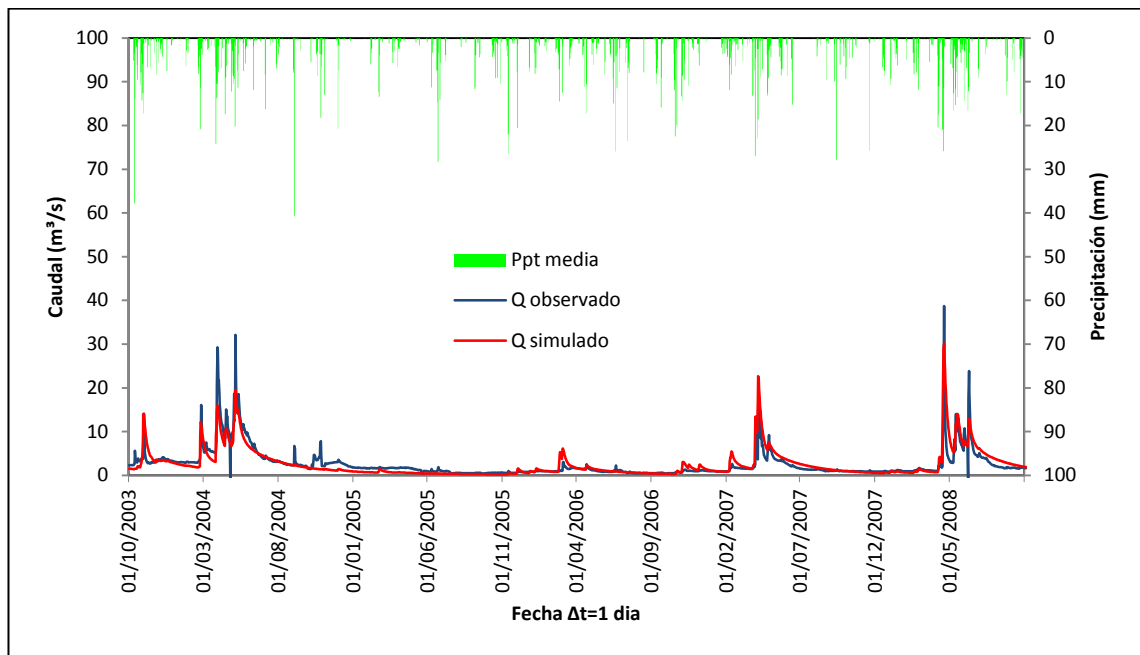


Figura 7.16 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual AEMET y SAIH.

Tabla 7.20 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.978
Entrada por Lluvia [Hm3]:	3709.317
Flujo de salida E directa [Hm3]:	1110.570
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	73.421
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	2601.675
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	1606.876
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.705
Excedente de Ppt [Hm3]:	972.767
Escorrentía directa [Hm3]:	209.779
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	19.599
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	762.985
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	251.245
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	15.288

Entrada por Percolación [Hm3]:	506.060
Flujo Base [Hm3]:	279.885
Perdidas subterráneas [Hm3]:	220.469
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	740.894

En la Tabla 7.20 se observa que en el balance hídrico de la cuenca, el mayor porcentaje de salida con respecto a la entrada por lluvia está dado por el flujo de salida proveniente del agua capilar en el suelo (43%) seguido de la evaporación de intercepción originada desde la cobertura vegetal (30%). Por otra parte la mayor aportación al caudal total de salida de la cuenca está dada por el flujo base (38%), seguido del flujo subsuperficial y escorrentía directa, con un 34 y 28%, respectivamente.

Según el índice de NSE obtenido, $NSE=0.75$, se demuestra que el modelo TETIS representa de forma favorable los diferentes procesos caracterizados en otro periodo de tiempo en el mismo punto de calibración (Tabla 7.21).

Tabla 7.21 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.745
RMSE (m^3/s)	2.385

- *Validación temporal usando datos puntuales AEMET.*

En la Figura 7.17 y Tabla 7.22 se presentan los resultados de validación temporal obtenidos del modelo usando parámetros distribuidos e información puntual de la fuente de datos AEMET.

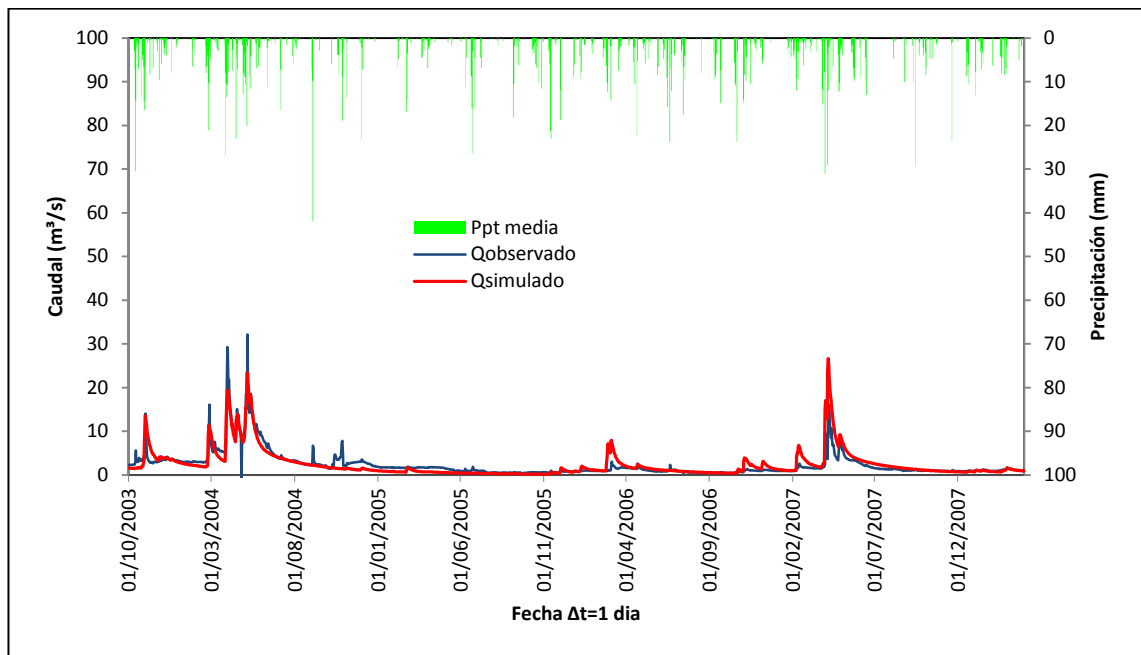


Figura 7.17 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual AEMET.

Tabla 7.22 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.7167
RMSE (m^3/s)	1.579

- Validación temporal usando datos puntuales SAIH CHJ.

En la Figura 7.18 y Tabla 7.23 se presentan los resultados de validación temporal obtenidos del modelo usando parámetros distribuidos e información puntual de la fuente de datos AEMET.

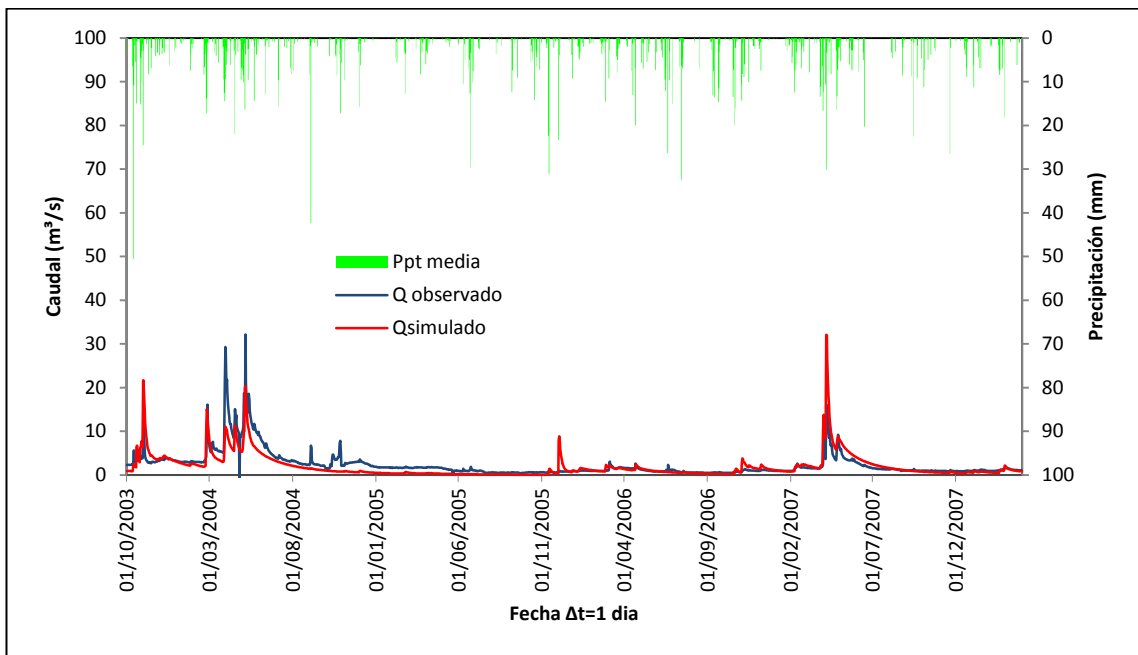


Figura 7.18 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información puntual SAIH CHJ.

Tabla 7.23 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.578
RMSE (m ³ /s)	1.927

- *Validación Espacio-Temporal usando datos puntuales AEMET y SAIH.*

Con los factores correctores de la calibración, se realizó la validación espacio-temporal a la entrada del embalse Contreras y embalse Alarcón, período octubre de 2003 a septiembre de 2008, obteniéndose en general, buenos resultados, a pesar de la alteración del régimen hidrológico generado por la presencia de estos embalses.

El embalse Contreras tiene un volumen almacenado de 852 hm³ y una superficie de 2748 has. La validación espacio-temporal del modelo hidrológico a escala diaria a la entrada del embalse Contreras con el grupo de datos puntuales AEMET y SAIH se visualiza en la Figura 7.19; evaluándose el

rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio (Tabla 7.24).

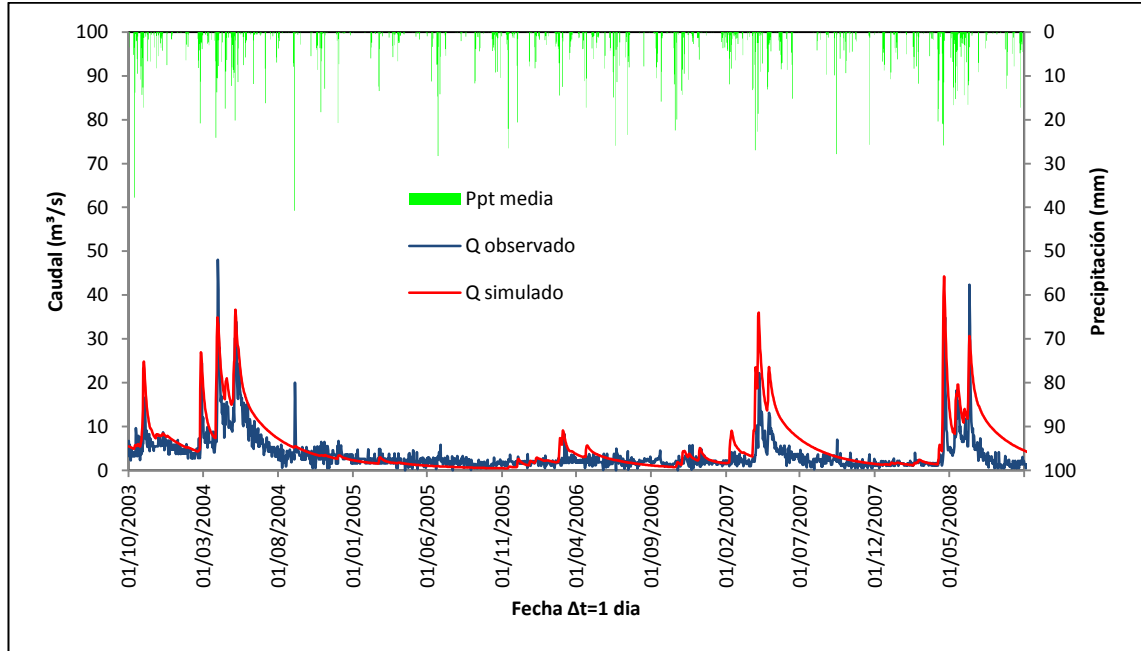


Figura 7.19 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual AEMET y SAIH.

Tabla 7.24 Criterio de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.560
RMSE (m ³ /s)	4.716

El SAIH de la CHJ obtiene por balance (Figura 7.20) el caudal de entrada $I(t)$ con datos medidos del caudal de salida $O(t)$ y variación del nivel del embalse. Esta variación del nivel del embalse origina las oscilaciones (pelos) que se visualiza en el caudal diario observado (Figura 7.19) originando el deterioro de los estadísticos obtenidos, pero en términos generales se puede considerar una validación aceptable.

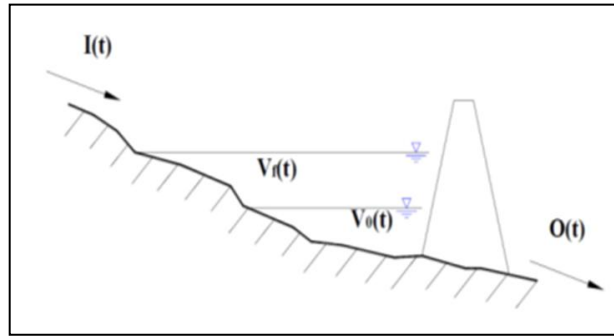


Figura 7.20 Esquema en un embalse.

Al realizar el balance de la cuenca, se evidencia el incremento de las pérdidas que podrían deberse a la simplificación del modelo de identificar el embalse en una sola celda, es decir no se estaba considerando la evaporación de las 2700 has de superficie del embalse Contreras, una posible solución sería la calibración del factor corrector de pérdidas, para mejorar el balance de la cuenca. En la Tabla 7.25 se indica un resumen de los almacenamientos y flujos medios en la cuenca.

Tabla 7.25 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.927
Entrada por Lluvia [Hm3]:	9210.340
Flujo de salida E directa [Hm3]:	2817.966
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	67.163
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	6392.376
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	4033.738
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.438
Excedente de Ppt [Hm3]:	2358.645
Escorrentía directa [Hm3]:	349.574
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	14.693
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	2009.098
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	535.256
Nivel del acuífero:	

Nivel medio en la cuenca [mm]:	22.887
Entrada por Percolación [Hm3]:	1473.816
Flujo Base [Hm3]:	777.212
Perdidas subterráneas [Hm3]:	689.360
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	1662.043

El embalse Alarcón tiene un volumen almacenado de 1105 hm³ y una superficie de 6840 has. La validación espacio-temporal del modelo hidrológico a escala diaria a la entrada del embalse Alarcón se visualiza en la Figura 7.21; evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio (Tabla 7.26).

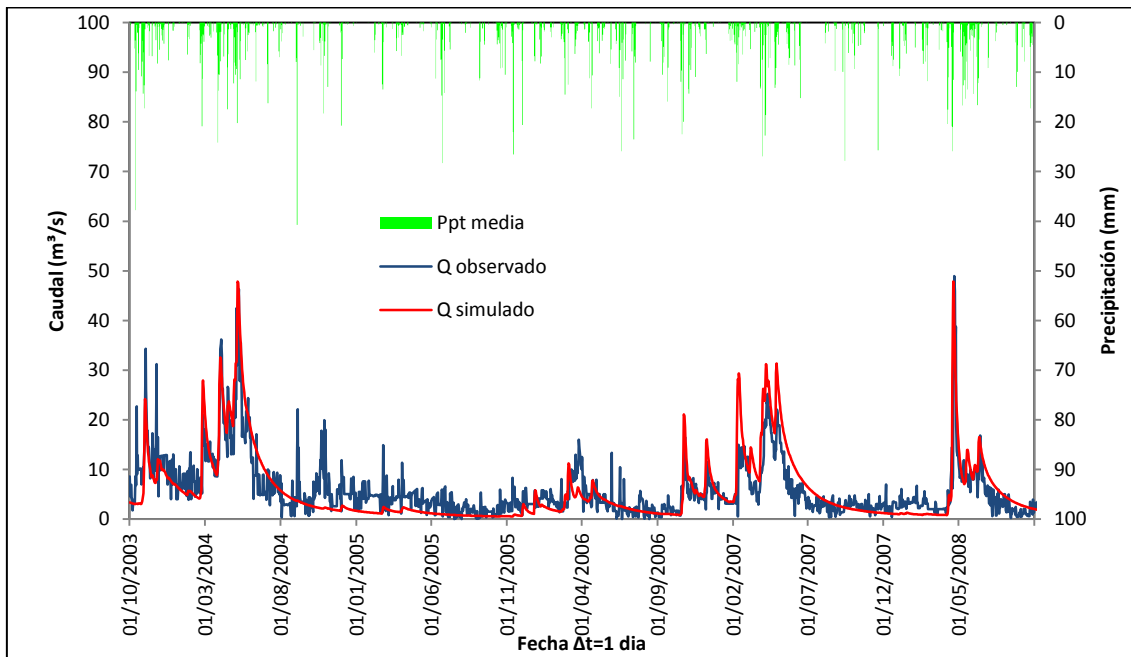


Figura 7.21 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual AEMET y SAIH.

Tabla 7.26 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.760
RMSE (m ³ /s)	4.572

Observando el resultado en la Figura 7.21 se puede deducir que el modelo permite obtener los caudales esperados en cualquier punto de la cuenca, a la vez se comprueba con el valor del índice de Nash= 0.760, que indica la validez satisfactoria del modelo.

Es importante resaltar que la validación a la entrada del embalse Alarcón corresponde a un régimen natural, ya que en este proceso no ha influido el trasvase Tajo-Segura. En la Tabla 7.27 se indica un resumen de los almacenamientos y flujos medios en la cuenca.

Tabla 7.27 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.742
Entrada por Lluvia [Hm3]:	8373.023
Flujo de salida E directa [Hm3]:	2154.826
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	96.458
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	6218.196
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	3993.088
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.462
Excedente de Ppt [Hm3]:	2225.109
Escorrentía directa [Hm3]:	343.684
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	17.566
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	1881.435
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	964.810
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	47.185
Entrada por Percolación [Hm3]:	916.605
Flujo Base [Hm3]:	339.212
Perdidas subterráneas [Hm3]:	557.776
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	1647.709

Al igual que en los casos anteriores se realizó la validación del modelo usando datos puntuales AEMET y SAIH con el fin de validar el modelo con cada grupo de datos independientes a la entrada del embalse de Contreras y Alarcón. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

- *Validación Espacio-Temporal usando datos puntuales AEMET y SAIH independientes.*

Los resultados de la validación espacio-temporal del modelo hidrológico a escala diaria a la entrada del embalse Contreras con el grupo de datos puntuales AEMET se visualiza en la Figura 7.22; evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio (Tabla 7.28).

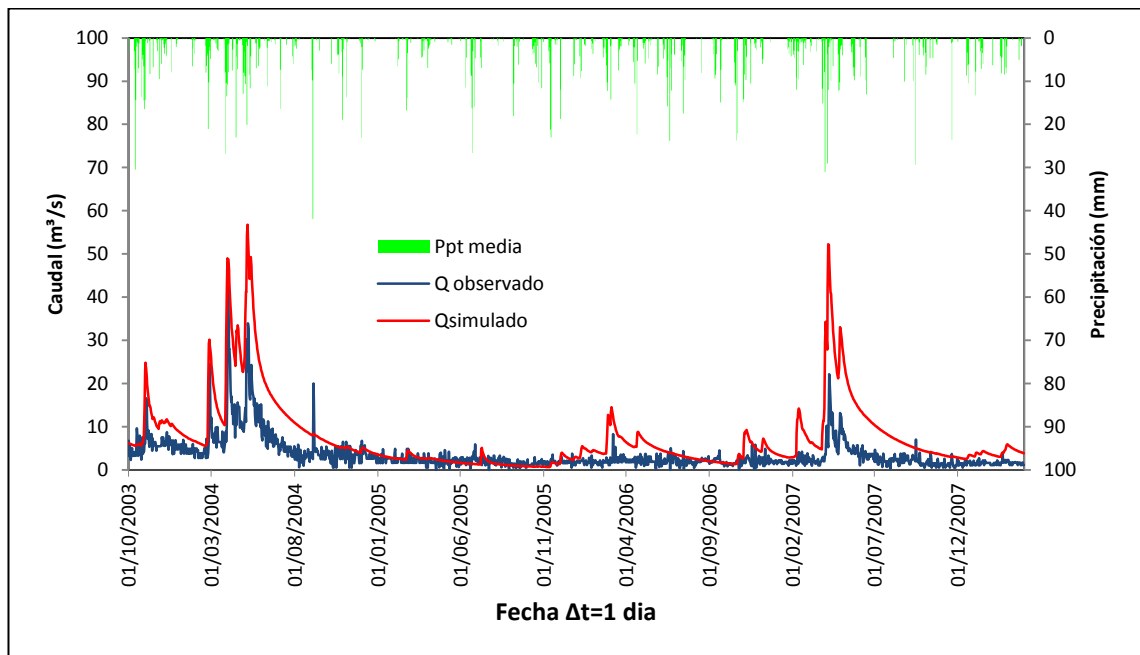


Figura 7.22 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual AEMET.

Tabla 7.28 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	-2.1599
RMSE (m ³ /s)	6.787

La modelación con solo datos SAIH a la entrada del embalse de Contreras al igual que en el caso anterior presenta resultados no aceptables. En la Figura 7.23 se presentan los resultados y en la Tabla 7.29 los respectivos criterios de evaluación.

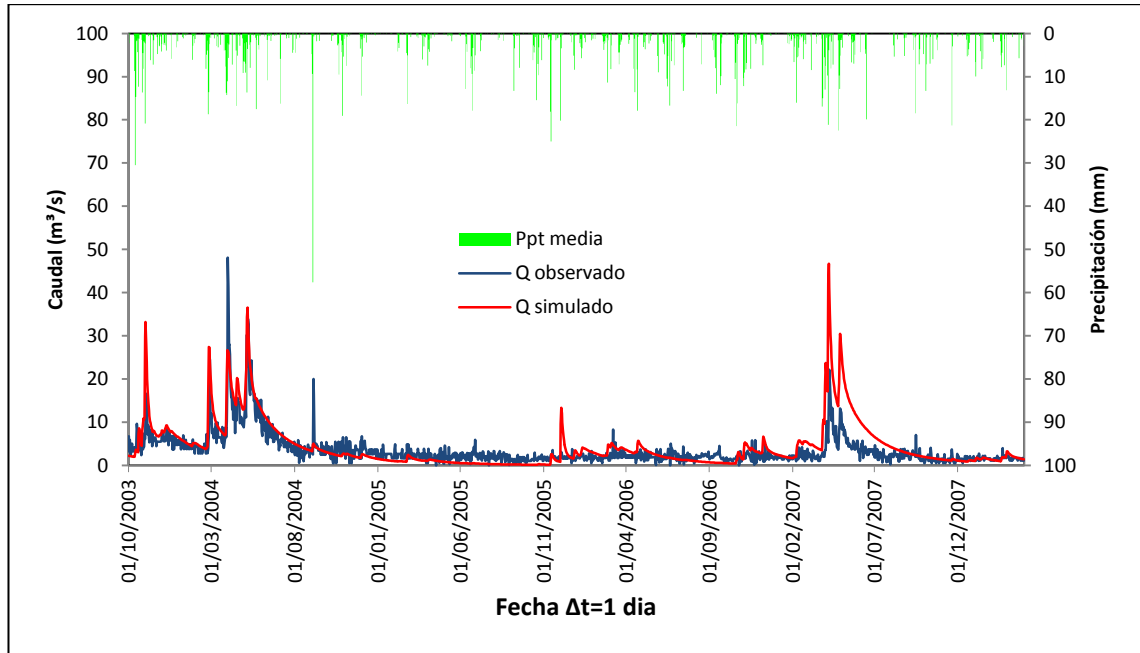


Figura 7.23 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información puntual SAIH.

Tabla 7.29 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.1221
RMSE (m^3/s)	3.578

Para el caso del embalse de Alarcón la validación espacio-temporal con solo datos AEMET arrojó los resultados obtenidos en la Figura 7.24. En la Tabla 7.30 se listan los índices obtenidos.

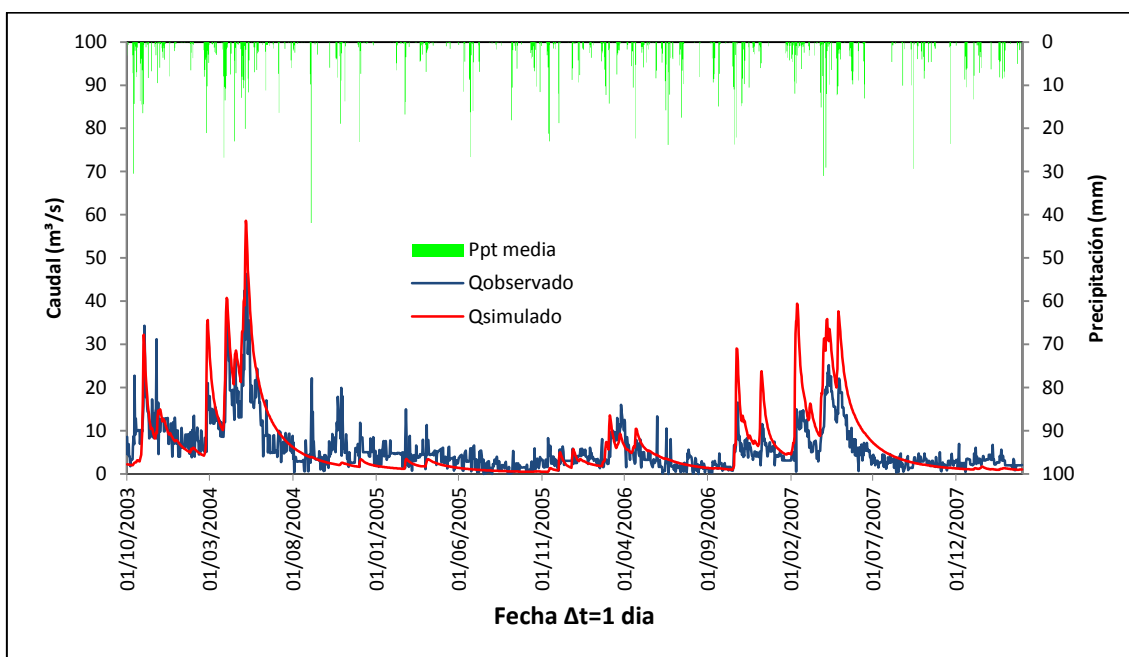


Figura 7.24 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual AEMET.

Tabla 7.30 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.2208
RMSE (m^3/s)	4.981

En la Figura 7.25 se presentan los resultados correspondientes a los hidrogramas resultantes en la validación espacio-temporal usando solo datos SAIH de la CHJ. Los criterios de evaluación se detallan en la Tabla 7.31.

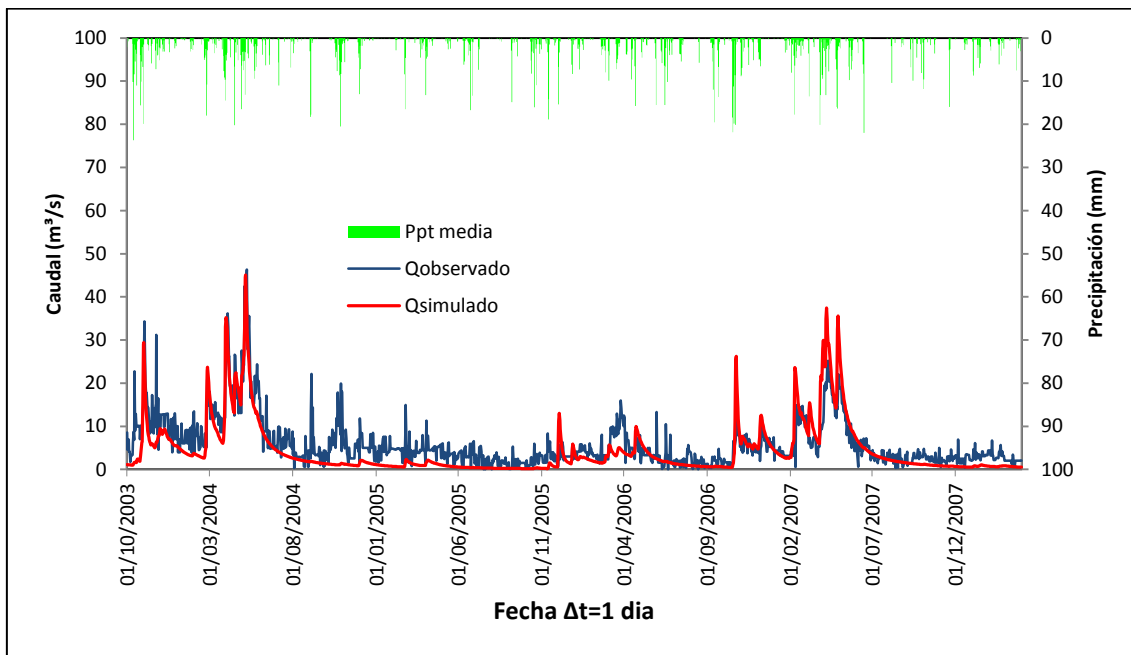


Figura 7.25 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información puntual SAIH.

Tabla 7.31 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.5128
RMSE (m^3/s)	3.939

7.2. Calibración y validación con información hidrometeorológica interpolada.

Debido a que las series puntuales diarias de precipitación y temperatura se encontraban alteradas, con porcentaje de datos faltantes significativos, se recurrió a la serie de datos del proyecto *Spain02*, descritas en el apartado 5.1.2, denominadas información hidrometeorológica interpolada o Grid. Con la misma serie de caudales medios diarios observados en las estaciones de aforo y usando los parámetros distribuidos obtenidos para cada una de las cuencas, se realizó la modelación hidrológica a escala diaria con el modelo TETIS.

La metodología a seguir fue la explicada en los apartados anteriores, por lo tanto para simplificar el contenido, a continuación solo se presentan los

resultados y un breve análisis de los mismos para cada una de las cuencas en estudio.

7.2.1. Calibración cuenca del río Ésera.

Tomando los factores correctores resultado de la calibración hecha en la cuenca del río Ésera con información puntual, se realizaron diferentes simulaciones y con un análisis de sensibilidad se determinaron los FC_s idóneos para realizar la calibración automática con el modulo SCE-UA. Se decidió calibrar automáticamente los siguiente FC_s : FC_1 , FC_3 , FC_6 y FC_9 y las respectivas variables correspondiente a la fusión de nieve. Por otra parte se cambiaron las condiciones de humedad inicial, se determinaron valores iniciales aproximados los cuales al igual que en los casos anteriores no fueron calibradas automáticamente. A continuación en la Tabla 7.32 se presentan los valores de humedad inicial y en la Tabla 7.33 se listan los FC_s resultado del proceso de calibración automática.

Tabla 7.32 Valores de los almacenamientos iniciales.

Humedad inicial	Valores
H_1 Almacenamiento estático (%)	45.00
H_2 Agua en superficie (mm)	0.00
H_3 Almacenamiento gravitacional (mm)	0.00
H_4 Nivel del acuífero (mm)	20.00
H_5 Cauce a sección llena (%)	0.00
H_6 Intercepción por la vegetación (%)	0.00

Tabla 7.33 Factores Corrector y variables de fusión de nieve resultantes del modulo de Calibración Automática (SCEUA) del modelo TETIS.

Factores Correctores	Sin calibración automática
FC_1 Almacenamiento estático	1.72820
FC_2 Evaporación	0.80015
FC_3 Infiltración	0.18580
FC_4 Escorrentía directa	1.00000
FC_5 Percolación	0.00020
FC_6 Interflujo	34.50860

FC_7 Pérdidas	0.10500
FC_8 Flujo base	15.50930
FC_9 Velocidad del flujo	0.04070
Variables Fusión de Nieve	
Coeficiente de fusión de nieve (mm/°C día)	2.66950
Coeficiente de fusión de nieve por lluvia (mm/°C día)	4.05810
Temperatura base para fusión de nieve (°C)	1.61720

El modelo TETIS fue calibrado en la estación de aforo Graus_013, seleccionado un año hidrológico, comprendido entre Octubre 1997 a Septiembre 1998. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.26 y en la Tabla 7.34 los criterios de evaluación NSE y RMSE para la calibración diaria realizada.

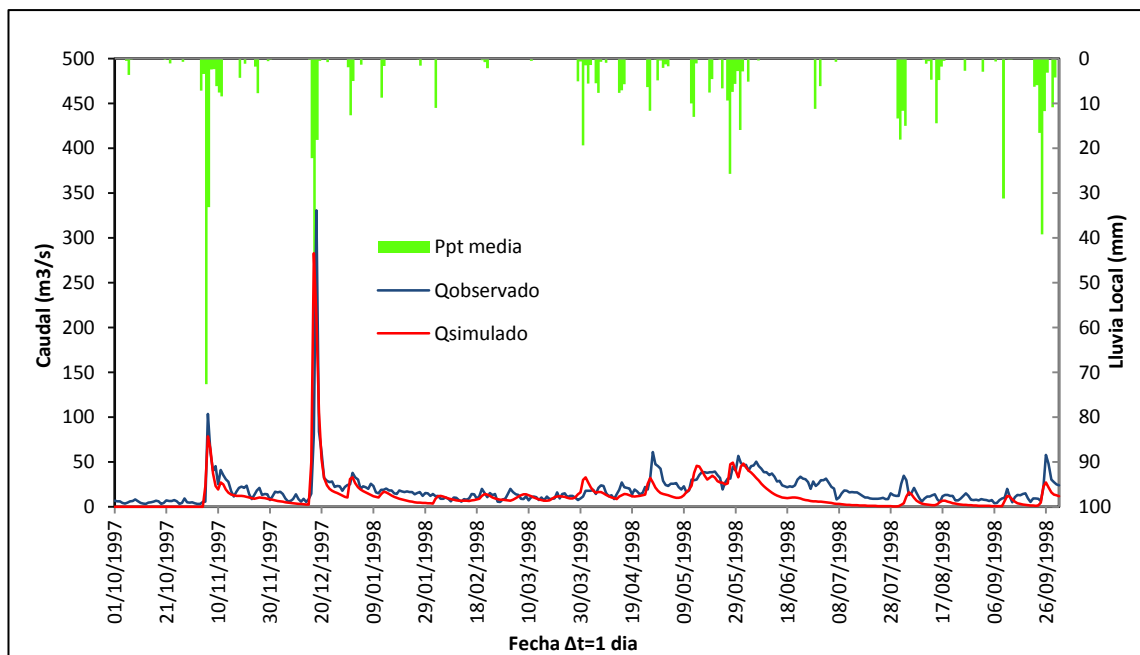


Figura 7.26 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 1998 en Graus_013, con FC_s resultantes del modulo SCEUA. Información interpolada.

Tabla 7.34 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de calibración en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/98
Índice de eficiencia NSE	0.6074
RMSE (m ³ /s)	13.209

En la Figura 7.26 se puede observar un ajuste satisfactorio entre los hidrogramas observados y los hidrogramas simulados. El caudal máximo simulado frente al caudal máximo observado es subestimado ($Q_{sim}=282.87$ m³/s, $Q_{obs}= 330.75$ m³/s), el porcentaje de error de tiempo al pico es de $t_p=0.0\%$. Por otra parte la nieve tiene una mejor distribución en todo el periodo de calibración.

Los resultados descritos se revalidan con el índice $NSE=0.61$ obtenido (Tabla 7.34) que indica la mejoría de los resultados y el buen desempeño del modelo manteniendo coherencia y robustez.

7.2.2. Validación cuenca del río Ésera.

Siguiendo con el procedimiento se validó con TETIS, teniendo en cuenta dos escenarios, validación temporal en la estación *Graus_013* y validación espacio-temporal, en las subcuencas con estación de aforo *Campo_258* y *Capella_047*. A continuación se presenta los resultados obtenidos y un breve análisis de los mismos.

- *Validación temporal.*

En la Figura 7.27, se observa el hidrograma resultante de la simulación del periodo seleccionado para la validación temporal (Octubre de 1997 a Septiembre de 2007), de la subcuenca aforada en la estación *Graus_013* usando los factores correctores definidos mediante el modulo de Calibración Automática (SCE-UA) del modelo TETIS; y en la Tabla 7.35 se presenta el resumen de almacenamientos y flujos medios obtenidos mediante el balance hídrico.

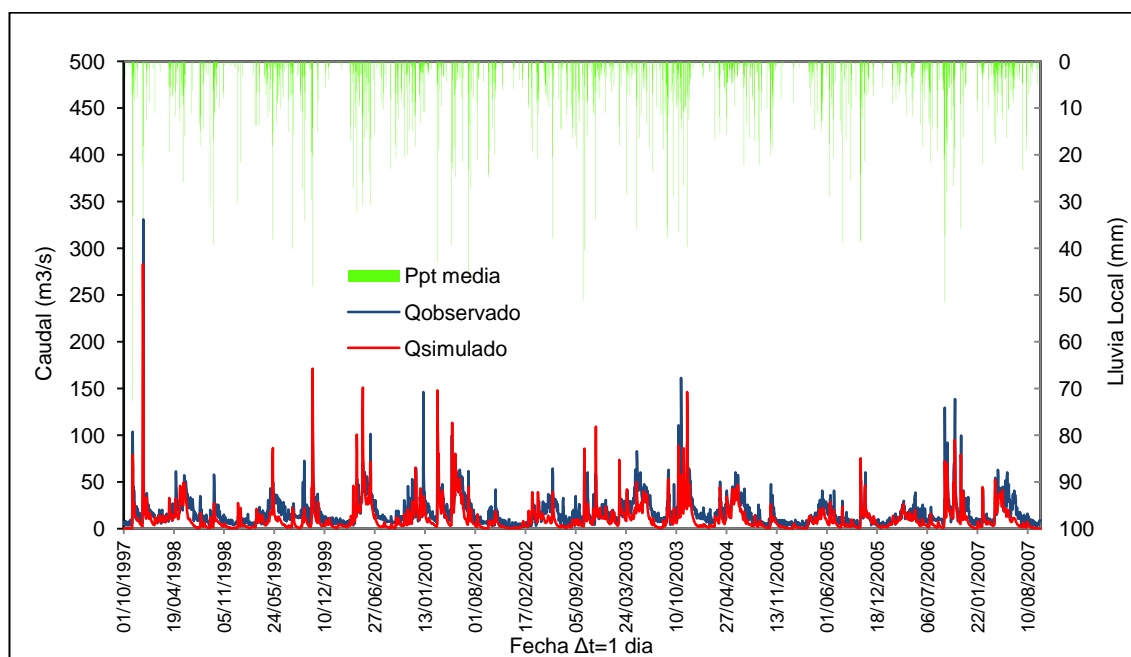


Figura 7.27 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Graus_013. Información interpolada.

Tabla 7.35 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.875
Entrada por Lluvia [Hm3]:	6576.958
Flujo de salida E directa [Hm3]:	1416.905
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	98.943
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	5159.761
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	2268.473
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00024
Excedente de Ppt [Hm3]:	4268.998
Escorrentía directa [Hm3]:	478.428
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	23.337
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	3790.375
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	3742.813
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	16.123

Entrada por Percolación [Hm3]:	46.145
Flujo Base [Hm3]:	4.278
Perdidas subterráneas [Hm3]:	46.145
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	4225.049

En los resultados de la Figura 7.27, se puede observar como el modelo TETIS reproduce casi todos los eventos presentes en el periodo simulado, presentando una adecuada distribución temporal de los caudales picos, sin embargo no llega a reproducir los picos de los eventos subestimándolos en la mayoría de ellos, algunos no se llegan a representar. La recesión del evento, así como el caudal base simulado, concuerdan en la mayor parte de los eventos

Con respecto a los valores listados en la Tabla 7.35 correspondientes al balance hídrico, la mayor aportación al caudal de salida de la cuenca está dada por el flujo subsuperficial (88.6%), seguido por la escorrentía directa con un (11.3%) y finalmente el flujo base (0.1%). En este caso el aporte de la nieve hace que el excedente aumente su valor en un 48%.

Con el índice de Nash obtenido, $NSE=0.56$, se demuestra que el modelo TETIS representa de forma satisfactoria los diferentes procesos caracterizados. En la Tabla 7.36 se presentan los criterios de evaluación obtenidos en la validación temporal.

Tabla 7.36 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.5569
RMSE (m^3/s)	10.453

- *Validación Espacio-Temporal.*

Para la validación espacio-temporal, se utilizó el periodo de episodio Octubre de 1997 a Septiembre de 2007 y se escogieron dos estaciones de aforo Campo_258 y Capella_04.

A continuación se presenta la validación del modelo hidrológico a escala diaria (Figura 7.28) en la cuenca aforada en Campo_258 y el balance hídrico producto de la validación determinada por el modelo TETIS (Tabla 7.37).

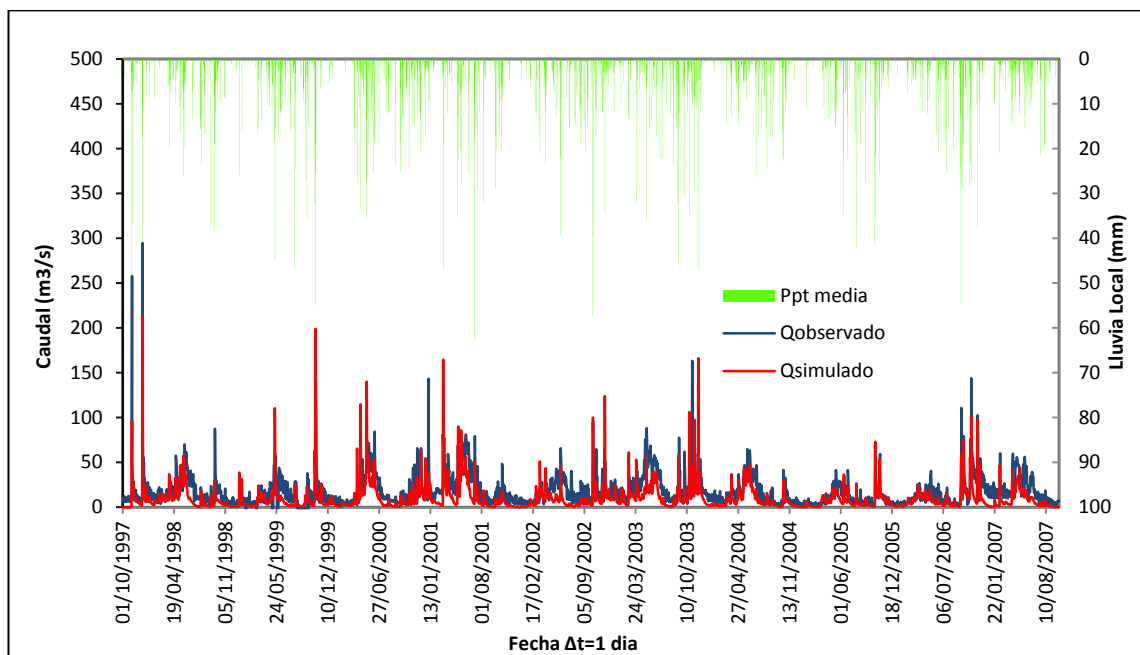


Figura 7.28 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Campo_258. Información interpolada.

En la Tabla 7.37 se presenta el balance hídrico el cual indica que el mayor aporte al hidrograma de salida está dado por flujo subsuperficial (87.8%), luego la escorrentía directa (12.1%) y en menor medida el flujo base (0.1%). Al igual que en el anterior caso el aporte de la nieve es significativo, aumentando alrededor de un 56% el excedente. Con respecto a los demás flujos de salida, el flujo de salida correspondiente al agua capilar en el suelo es un 29% de la entrada por lluvia, la evaporación por interceptación 19% y las pérdidas subterráneas relativamente despreciables (1%).

Tabla 7.37 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.887
Entrada por Lluvia [Hm3]:	4352.817
Flujo de salida E directa [Hm3]:	844.462
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	75.058
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	3508.164
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	1242.522
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00034
Excedente de Ppt [Hm3]:	3542.940
Escorrentía directa [Hm3]:	423.566
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	30.706
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	3119.325
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	3081.383
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	15.655
Entrada por Percolación [Hm3]:	36.556
Flujo Base [Hm3]:	3.142
Perdidas subterráneas [Hm3]:	36.556
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	3507.836

El índice de Nash obtenido $NSE=0.41$ (Tabla 7.38), demuestra una mejora en el resultado, aunque sigue siendo no completamente satisfactorio.

Tabla 7.38 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.4136
RMSE (m^3/s)	13.010

Con la cuenca aforada en Capella_047 se optó para realizar la validación espacio-temporal el mismo periodo (Octubre de 1997 a Septiembre de 2007). A continuación se presentan la validación del modelo hidrológico a escala diaria (Figura 7.29) y el balance hídrico producto de la validación determinada por el modelo TETIS (Tabla 7.39).

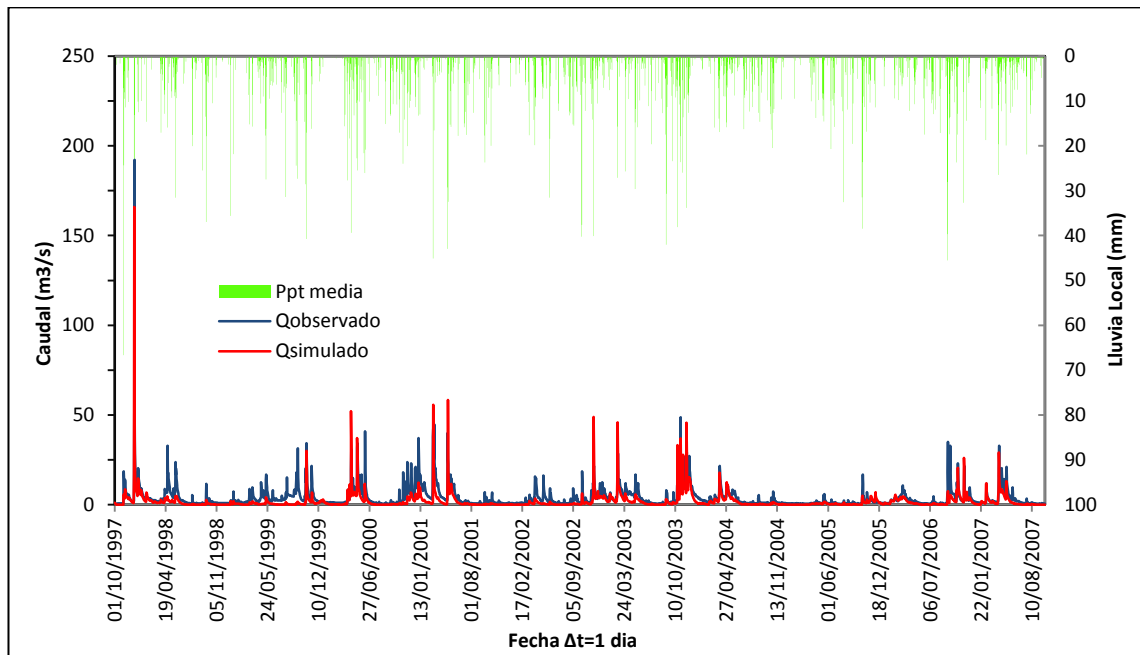


Figura 7.29 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 1997 a sept' 2007 en Capella_047. Información interpolada.

Tabla 7.39 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.679
Entrada por Lluvia [Hm3]:	2734.736
Flujo de salida E directa [Hm3]:	701.987
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	114.036
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	2032.467
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	1310.627
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.00011
Excedente de Ppt [Hm3]:	929.094

Esorrentía directa [Hm3]:	95.663
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	10.639
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	833.412
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	784.458
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	17.171
Entrada por Percolación [Hm3]:	48.851
Flujo Base [Hm3]:	1.345
Perdidas subterráneas [Hm3]:	48.851
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	881.428

En el balance hídrico presentado en la Tabla 7.39 se nota la disminución de la influencia de la nieve en el excedente, el incremento es de un 29%, mejorando los hidrogramas de salida presentados en la Figura 7.29. Con respecto a los demás flujos de salida, el correspondiente al agua capilar en el suelo es un 48% de la entrada por lluvia, la evaporación por intercepción 26% y las pérdidas subterráneas 2%. El índice de Nash obtenido $NSE=0.59$ (Tabla 7.40) demuestra el buen desempeño del modelo ante eventos de distintos órdenes de magnitud y en un punto diferente al calibrado.

Tabla 7.40 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Ésera.

Criterio de evaluación	R. Ésera Evento 1997/07
Índice de eficiencia NSE	0.5872
RMSE (m^3/s)	3.7540

7.2.3. Calibración cuenca del río Siurana.

La única estación de aforo ubicada en la cuenca del río Siurana fue la escogida para realizar la calibración, como se menciono anteriormente esta el periodo seleccionado es un año hidrológico, comprendido entre Octubre 2003 a Septiembre 2004. Al igual que en el primer caso los valores de los estado iniciales de los seis tanques que representan los distintos almacenamientos del

suelo, tampoco fueron calibrados, asumiendo un valor inicial nulo, es decir que la cuenca no presenta humedad desde el inicio del episodio.

Se variaron manualmente los FC_s obtenidos en el primer caso, con información hidrometeorológica puntual, hasta encontrar los que representaran de manera adecuada los procesos hidrológicos usando información hidrometeorológica interpolada. Seguidamente se implemento el algoritmo de optimización (SCE-UA) que aplica el modelo TETIS y se obtuvieron los FC_s que se listan en la Tabla 7.41.

Tabla 7.41 Factores Corrector obtenidos en la calibración automática.

Factores Correctores	Calibración automática
FC_1 Almacenamiento estático	0.54280
FC_2 Evaporación	1.08820
FC_3 Infiltración	11.97230
FC_4 Escorrentía directa	10.57500
FC_5 Percolación	5.61220
FC_6 Interflujo	194.81010
FC_7 Pérdidas	15.05790
FC_8 Flujo base	41.65570
FC_9 Velocidad del flujo	21.94580

El modelo TETIS fue calibrado en la estación de aforo Embalse de Ciurana_9868, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 7.30 y en la Tabla 7.42 los criterios de evaluación NSE y RMSE para la calibración diaria realizada.

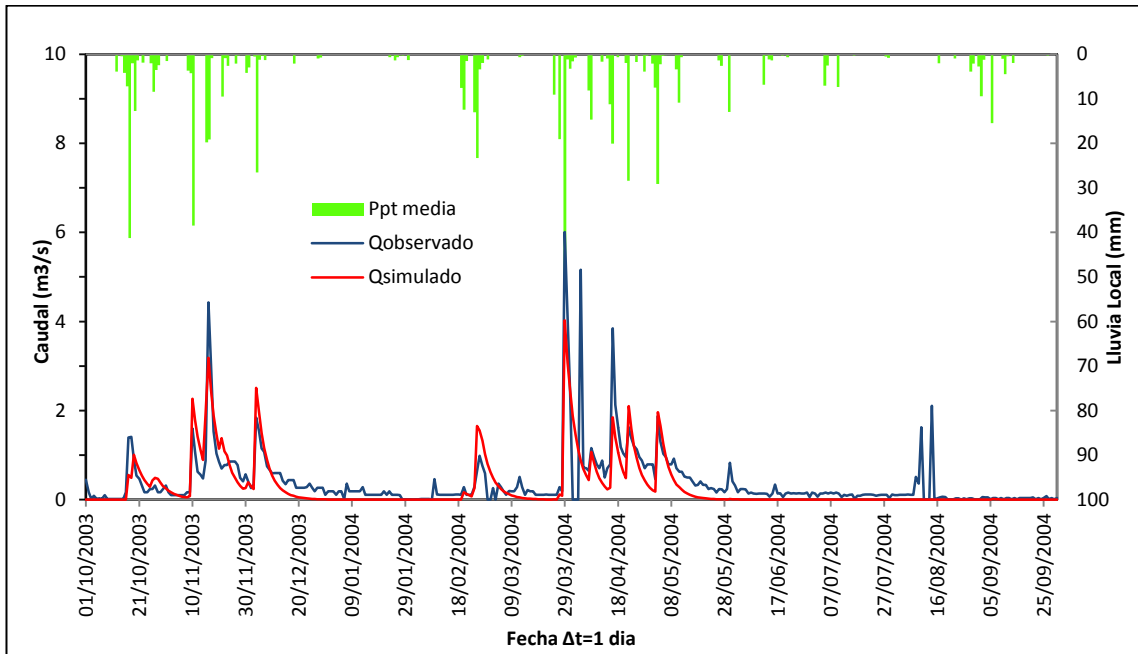


Figura 7.30 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2004 en Embalse Ciurana_9868, con FC_s resultantes del modulo SCEUA. Información interpolada.

Tabla 7.42 Criterios evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Siurana.

Criterio de evaluación	R. Siurana Evento 2003/04
Índice de eficiencia NSE	0.6224
RMSE (m^3/s)	0.424

En el hidrograma resultante presentado en la Figura 7.30 se puede observar que el evento de calibración presenta una mejoría en el caudal simulado, aunque aún se evidencias eventos donde el caudal es subestimados y otros casos sobreestimados, obteniendo un error cuadrático medio $RMSE=0.424$, además un error $t_p= 0.0\%$. Se obtiene una mejoría en el índice $NSE=0.62$ (Tabla 7.42), lo que indica que los FC_s usados en la modelación representan de forma aceptable los procesos hidrológicos en la cuenca de estudio.

7.2.4. Validación cuenca del río Siurana.

Como se indicó anteriormente por falta de información de otras estaciones de aforos diferentes a la calibrada, en esta cuenca no es posible validar el modelo en un punto diferente al calibrado, por ende solo se hará una validación temporal. Se seleccionó el periodo de episodios desde Octubre de 2003 a Septiembre de 2007.

- *Validación temporal.*

En la Figura 7.31, se observa los hidrogramas resultante de la simulación del periodo seleccionado para la validación temporal y en la Tabla 7.43 el resumen de almacenamientos y flujos medios en la subcuenca aforada en la estación Embalse Ciurana_9868.

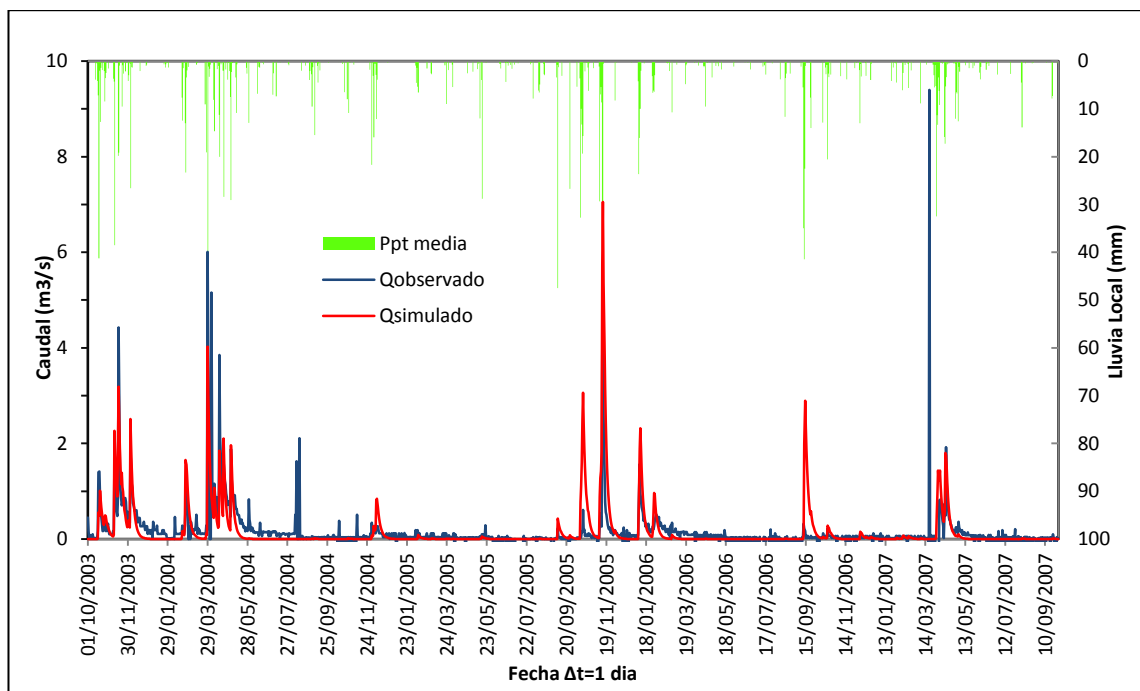


Figura 7.31 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2007 en Embalse Ciurana_9868. Información interpolada.

Tabla 7.43 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.642
Entrada por Lluvia [Hm3]:	113.269
Flujo de salida E directa [Hm3]:	42.229
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	20.327
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	71.039
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	34.626
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.000
Excedente de Ppt [Hm3]:	36.172
Escorrentía directa [Hm3]:	0.000
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.872
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	36.172
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	20.624
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.104
Entrada por Percolación [Hm3]:	15.536
Flujo Base [Hm3]:	0.00001
Perdidas subterráneas [Hm3]:	15.526
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	20.636

En la Tabla 7.43 se observa que en el balance hídrico de la cuenca, la mayor aportación a la escorrentía total se da por medio del flujo subsuperficial (99.94%), presentándose nuevamente el fenómeno denominado "Crecida Subsuperficial", ratificando la sobrestimación de los caudales pico observados en los hidrogramas de salida presentes en la Figura 7.31. El resto del flujo con respecto a la entrada por lluvia se presenta por evaporación del agua interceptada en la vegetación (37%) y flujo de salida por ET en el suelo (31%).

Lo anteriormente comentado, se demuestra con el índice de Nash obtenido $NSE=0.21$ (Tabla 7.44), indicando que el modelo tiene un comportamiento no

completamente satisfactorio para reproducir de forma favorable los diferentes procesos hidrológicos característicos de esta cuenca.

Tabla 7.44 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Siurana.

Criterio de evaluación	R. Siurana Evento 2003/07
Índice de eficiencia NSE	0.207
RMSE (m ³ /s)	0.453

7.2.5. Calibración cuenca del río Júcar.

Siguiendo el procedimiento implementado en el apartado 7.1.5 correspondiente al análisis en la cuenca del río Júcar con información hidrometeorológica puntual, se realizó la calibración en la estación de aforo *Pajaroncillo_8090* se comenzó realizando previamente el calentamiento del modelo con la finalidad de obtener las condiciones de humedad antecedentes del sistema y comportamiento del acuífero al inicio del periodo de calibración.

En la Tabla 7.45 y 7.46 se listan los valores de los almacenamientos iniciales y los FC_s usados en el proceso de calibración.

Tabla 7.45 Valores de los almacenamientos iniciales resultantes del periodo de calentamiento.

Humedad inicial	Valores
H_1 Almacenamiento estático (%)	25.728
H_2 Agua en superficie (mm)	0.015
H_3 Almacenamiento gravitacional (mm)	7.218
H_4 Nivel del acuífero (mm)	3.817
H_5 Cauce a sección llena (%)	0.001
H_6 Intercepción por la vegetación (%)	0.00

Tabla 7.46 Factores correctores de la calibración resultantes del periodo de calentamiento.

Factores Correctores	Valores
FC_1 Almacenamiento estático	1.37510
FC_2 Evaporación	0.68710
FC_3 Infiltración	0.43000
FC_4 Escorrentía directa	0.00210

FC_5 Percolación	0.26730
FC_6 Interflujo	85.03140
FC_7 Pérdidas	0.00710
FC_8 Flujo base	25.00160
FC_9 Velocidad del flujo	0.98290

La calibración final del modelo en la estación de aforo *Pajaroncillo_8090* obtenida en el periodo de un año hidrológico Octubre 2002 a Septiembre 2003 (Figura 7.32); generó resultados óptimos con valores de criterios de evaluación detallados en la Tabla 7.47.

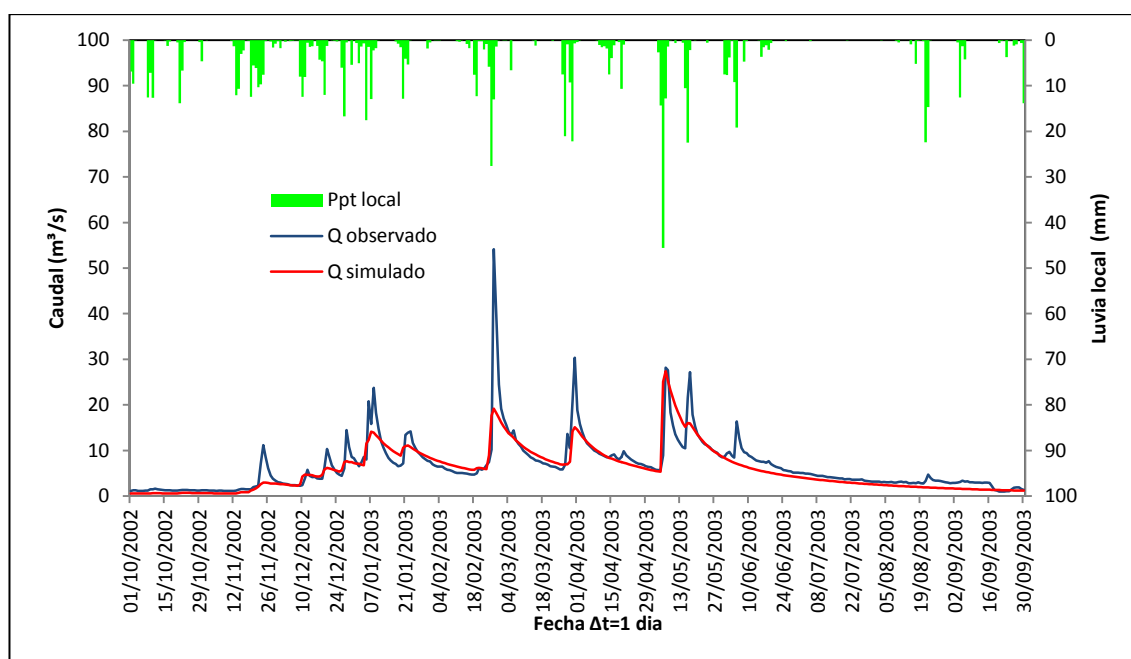


Figura 7.32 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2002 a sept' 2003 en *Pajaroncillo_8090*, con FC_s resultantes del periodo de calentamiento. Información interpolada.

Tabla 7.47 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Eventos de calibración en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2002/03
Índice de eficiencia NSE	0.695
RMSE (m^3/s)	3.201

Observando los resultados presentados en la Figura 7.32 se puede determinar que al inicio del episodio el modelo TETIS representa de forma satisfactoria el caudal base simulado frente al observado, es decir, que las condiciones resultantes de los almacenamientos y aportaciones subterráneas del periodo del calentamiento fueron las adecuadas. Por otra parte el modelo no reproduce los caudales picos, $Q_{sim}=27.42 \text{ m}^3/\text{s}$ frente a un $Q_{obs}= 54.12 \text{ m}^3/\text{s}$, subestimándolos hasta llegar a tener un $RMSE= 3.20$. A pesar de los anteriormente expuesto el valor del índice de eficiencia $NSE=0.70$ obtenido indica que los resultados se puede considerar óptimos.

7.2.6. Validación cuenca del río Júcar.

Para la validación del modelo TETIS en la cuenca del río Júcar, se seleccionó el periodo de episodios desde Octubre de 2003 a Septiembre de 2008. Se procedió a realizar la validación temporal en la subcuenca aforada en la estación Pajaroncillo_8090 y para la validación espacio-temporal en las subcuencas con estación de aforo Contreras_8130 y Alarcón_8107.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las validaciones en los dos escenarios, validación temporal y validación espacio – temporal.

- *Validación temporal.*

Con los factores correctores de la calibración, se realizó la validación temporal en Pajaroncillo, período octubre del 2003 a septiembre del 2008, obteniéndose los resultados que se visualizan en la Figura 7.33 y en la Tabla 7.48 se presenta el resumen de almacenamientos y flujos medios en la subcuenca aforada.

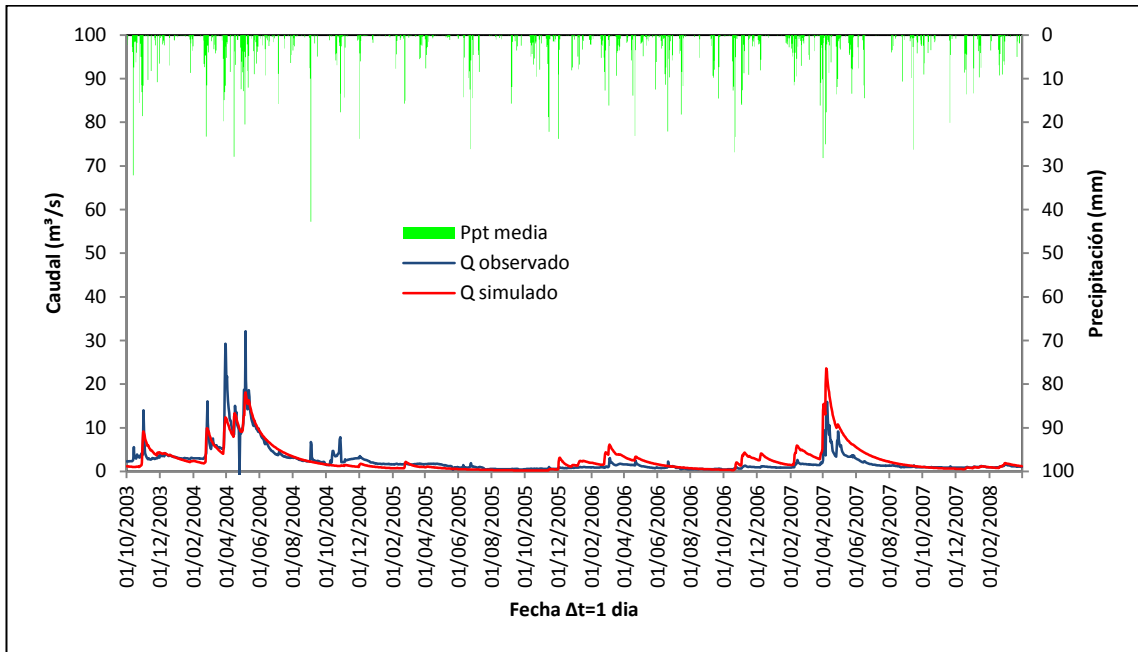


Figura 7.33 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Pajaroncillo_8090. Información interpolada.

Tabla 7.48 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.965
Entrada por Lluvia [Hm3]:	2223.656
Flujo de salida E directa [Hm3]:	746.504
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	65.640
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	1480.358
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	908.489
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.445
Excedente de Ppt [Hm3]:	519.226
Escorrentía directa [Hm3]:	59.886
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	14.090
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	459.350
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	150.714
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	12.870

Entrada por Percolación [Hm3]:	312.920
Flujo Base [Hm3]:	174.933
Perdidas subterráneas [Hm3]:	135.263
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	385.539

En la Tabla 7.48 se observa que en el balance hídrico de la cuenca, el mayor porcentaje de salida con respecto a la entrada por lluvia está dado por el flujo de salida proveniente del agua capilar en el suelo (41%) seguido de la evaporación de intercepción originada desde la cobertura vegetal (34%). Por otra parte la mayor aportación al caudal total de salida de la cuenca está dada por el flujo base (45%), seguido del flujo subsuperficial y escorrentía directa, con un 39 y 16%, respectivamente.

Según el índice de NSE obtenido, $NSE=0.59$, se demuestra que el modelo TETIS representa de forma aceptable los diferentes procesos caracterizados en otro periodo de tiempo en el mismo punto de calibración (Tabla 7.49)

Tabla 7.49 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.5921
RMSE (m^3/s)	1.894

- *Validación Espacio-Temporal.*

Con los factores correctores de la calibración, se realizó la validación espacio-temporal a la entrada del embalse Contreras y embalse Alarcón, período octubre de 2003 a septiembre de 2008.

La validación espacio-temporal del modelo hidrológico a escala diaria a la entrada del embalse Contreras se visualiza en la Figura 7.34; evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio. Estos índices se detallan en la Tabla 7.50.

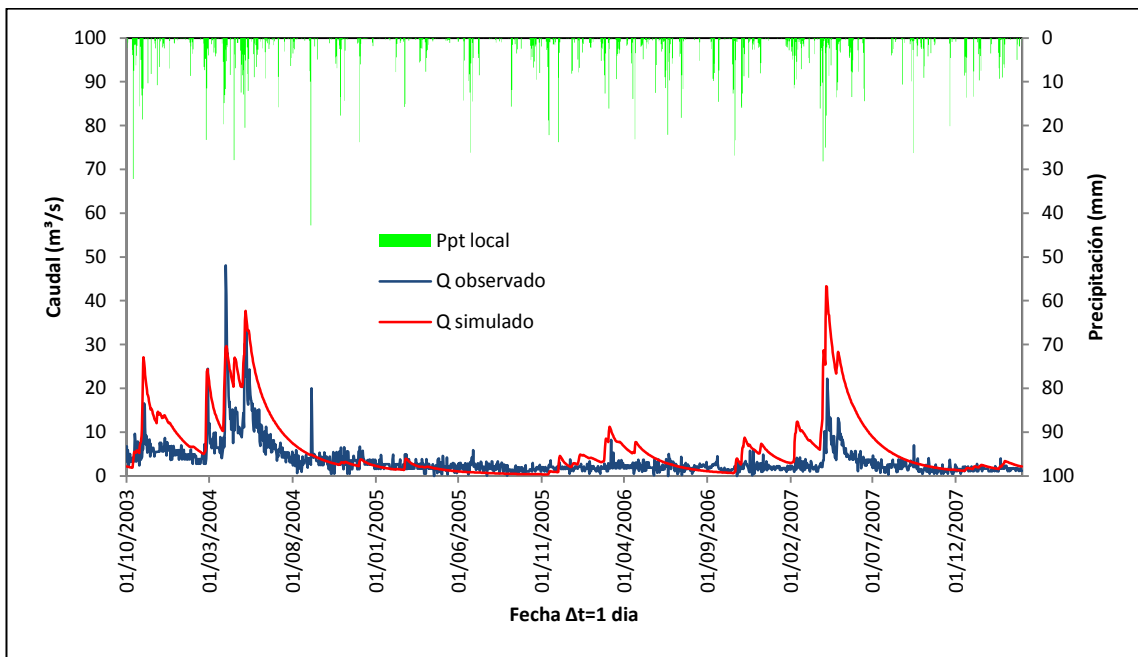


Figura 7.34 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Contreras_8130. Información interpolada.

Tabla 7.50 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	-1.0854
RMSE (m ³ /s)	5.514

Se observa en los hidrogramas resultantes que el modelo no representa de forma adecuada el caudal de salida simulado en la cuenca en estudio. Esto se demuestra con el índice de Nash obtenido $NSE = -1.09$, presentado en la Tabla 7.50.

Al analizar el balance hídrico obtenido, se evidencia que la mayor aportación al caudal de salida de la cuenca está dada por el flujo base (52%), seguido por el flujo subsuperficial (36%) y finalmente la escorrentía directa (12%). Cabe destacar nuevamente el incremento de las pérdidas subterráneas que podrían deberse a la simplificación del modelo de identificar el embalse en

una sola celda. En la Tabla 7.51 se indica un resumen de los almacenamientos y flujos medios en la cuenca.

Tabla 7.51 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.867
Entrada por Lluvia [Hm3]:	5489.168
Flujo de salida E directa [Hm3]:	1886.295
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	60.369
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	3602.879
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	2318.090
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.293
Excedente de Ppt [Hm3]:	1284.789
Escoorrentía directa [Hm3]:	104.532
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	9.833
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	1180.263
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	320.604
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	18.252
Entrada por Percolación [Hm3]:	859.646
Flujo Base [Hm3]:	395.951
Perdidas subterráneas [Hm3]:	395.951
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	883.110

La validación espacio-temporal del modelo hidrológico a escala diaria a la entrada del embalse Alarcón se visualiza en la Figura 7.35; evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe y el error cuadrático medio listados en la Tabla 7.52.

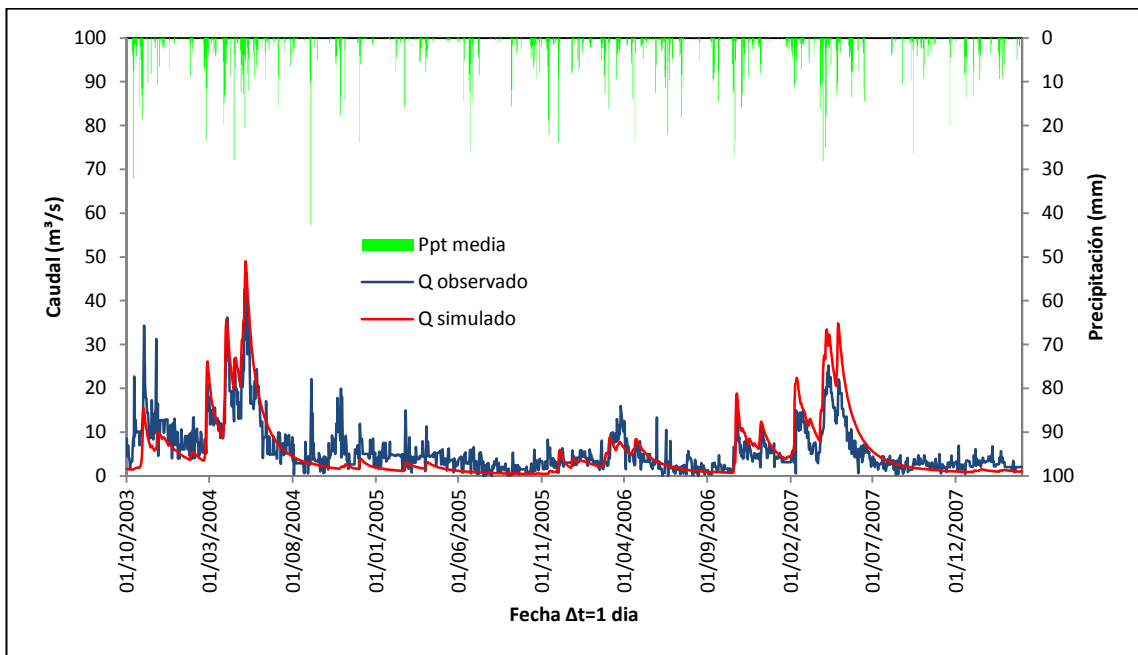


Figura 7.35 Hidrograma resultante de simulación en el periodo oct' 2003 a sept' 2008 en Alarcón_8107. Información interpolada.

Tabla 7.52 Criterios de evaluación del modelo TETIS. Evento de validación en la cuenca del río Júcar.

Criterio de evaluación	R. Júcar Evento 2003/08
Índice de eficiencia NSE	0.4898
RMSE (m^3/s)	4.031

Observando el resultado en la Figura 7.35 y teniendo en cuenta el índice de Nash obtenido, $NSE=0.49$, se deduce que el modelo representa de forma medianamente aceptable el caudal de salida de la cuenca, frente al caudal observado. En algunos eventos sobrestima el caudal observado frente al simulado y en otros casos lo subestima, obteniendo un $RMSE=4.03$.

En la Tabla 7.53 se indica un resumen de los almacenamientos y flujos medios en la cuenca, obteniendo mayor aportación al caudal de salida de la cuenca por parte del flujo subsuperficial (61%), escorrentía directa y flujo base, 15 y 24% respectivamente.

Tabla 7.53 Resumen de almacenamientos y flujos medios en la cuenca obtenidos de la simulación en el periodo de validación.

Agua interceptada por la vegetación:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.704
Entrada por Lluvia [Hm3]:	4856.629
Flujo de salida E directa [Hm3]:	1390.394
Agua capilar en el suelo:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	80.1825
Entrada por "throughfall" [Hm3]:	3470.700
Flujo de salida Es+T [Hm3]:	2249.098
Agua en superficie:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	0.345
Excedente de Ppt [Hm3]:	1126.279
Escorrentía directa [Hm3]:	116.607
Almacenamiento gravitacional:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	11.486
Cantidad de Infiltración [Hm3]:	1009.693
Flujo Subsuperficial [Hm3]:	490.070
Nivel del acuífero:	
Nivel medio en la cuenca [mm]:	32.681
Entrada por Percolación [Hm3]:	528.312
Flujo Base [Hm3]:	192.258
Perdidas subterráneas [Hm3]:	324.820
Caudal de salida de la cuenca [Hm3]:	798.984

7.3. Comparación de resultados y Análisis Estadístico

Los modelos matemáticos son una alternativa para la evaluación de la calidad y cantidad del agua en una zona determinada, en este caso, para cuencas hidrológicas. Sin embargo, hay un grado de incertidumbre asociado entre los valores observados frente a los simulados, la cual se define como la cantidad estimada en que un valor observado puede desviarse del valor real.

Con base a lo anteriormente expuesto a continuación se hará un análisis realizando diferentes comparaciones entre los resultados obtenidos a través del modelo TETIS en las cuencas hidrológicas de los ríos Ésera, Siurana y Júcar.

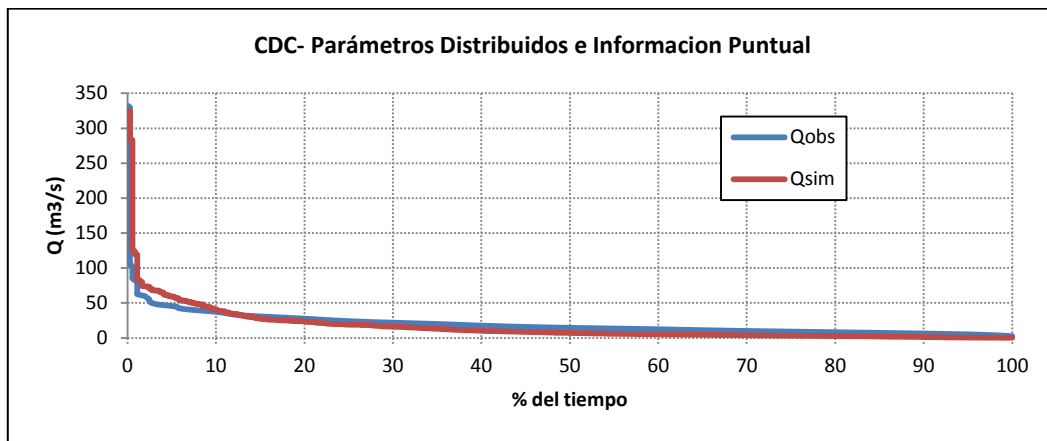
7.3.1. Comparación entre modelos usando parámetros distribuidos con información hidrometeorológica puntual e interpolada.

7.3.1.1. Cuenca del río Ésera.

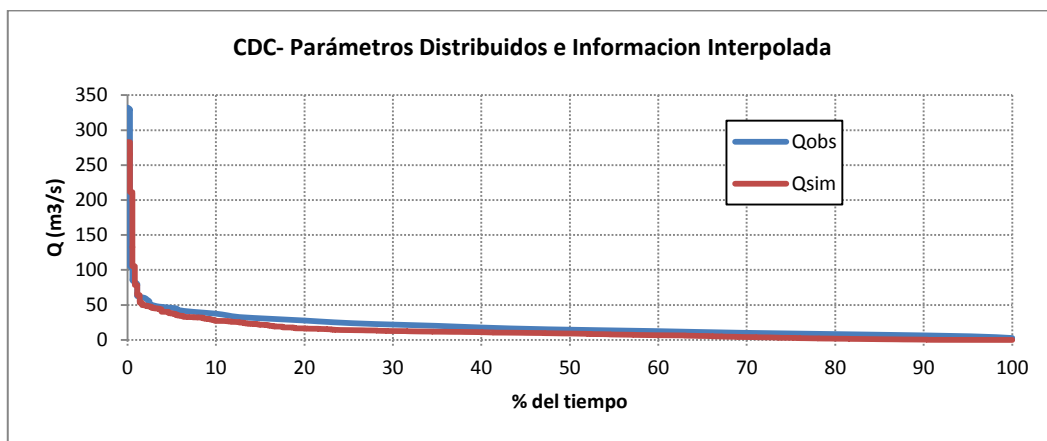
Tomando los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas en la cuenca del río Ésera, donde se aplicó el modelo TETIS usando parámetros distribuidos con información hidrometeorológica puntual e información interpolada, se realizaron diferentes análisis y comparaciones con el fin de identificar el mejor comportamiento y las diferencias presentadas antes los dos grupos de inputs escogidos.

En primer lugar como herramienta de tipo hidrológico utilizada para representar el comportamiento del caudal en una corriente se utilizó las curvas de duración de caudales (CDC). Son curvas de frecuencia acumulada que muestran el porcentaje del tiempo que valores específicos de caudal son igualados o excedidos durante cierto periodo de tiempo, que suele ser generalmente de un año (Searcy, 1963). Análogamente, gracias a que describen las características de la distribución de caudales propia de un río, son útiles para realizar comparaciones entre corrientes.

Para ejemplificar lo anterior en las Figuras 7.36 se muestra las CDC construidas a partir de datos diarios, con los resultados obtenidos en la estación de aforo Graus_013, donde se calibró el modelo con parámetros distribuidos usando información hidrometeorológica puntual e interpolada, éstas se comparan con los respectivos caudales observados.



(a)



(b)

Figura 7.36 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Graus_013. Información puntual (a), Información interpolada (b).

La forma de la CDC es un indicativo de las características de drenaje de la cuenca: una CDC con una pendiente muy pronunciada representa un río con gran variabilidad en el intervalo de caudales transportados, indicando que su caudal proviene principalmente de la escorrentía superficial; en cambio, una CDC con baja pendiente indica que su caudal proviene del flujo subsuperficial y almacenamiento en aguas subterráneas (Searcy 1963), lo que mantiene un valor de caudal estable o permanente, como es para el caso de la estación *Graus_013*, presentada en la Figura 7.36 para cada una de la información hidrometeorológica utilizada. El área bajo la curva representa el volumen transportado anualmente por la corriente. Este valor dividido sobre los 365 días del año representa el caudal medio diario. Además, el caudal igualado o

excedido para el punto del 50% del tiempo representa el caudal mediano de la serie.

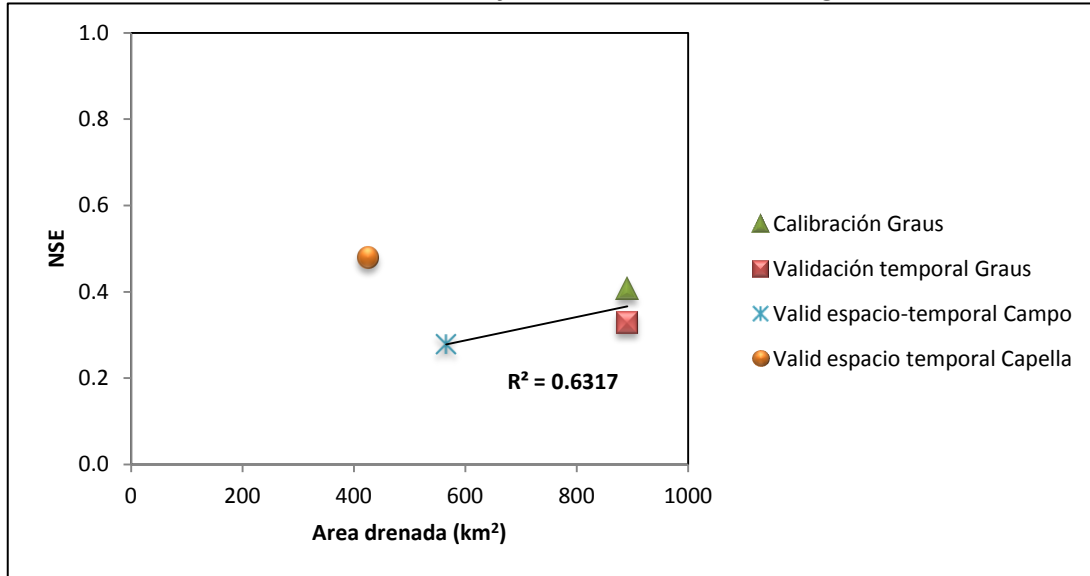
En la CDC estimada con la serie de caudales observados contrastada con la CDC para series de caudales simulados, para el caso de parámetros distribuidos e información puntual (Figura 7.36a), se observa que existe una diferencia entre los caudales igualadas o excedidos entre el 2 y el 10% de aproximadamente $20 \text{ m}^3/\text{s}$, donde la curva del caudal simulado se encuentra por encima del observado. Por su parte para el caso presentado en la Figura 7.36b sucede lo contrario, el modelo subestima los caudales resultantes, presentando una diferencia entre los caudales igualadas o excedidos entre el 15 y el 40% de aproximadamente $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Otro análisis realizado fue la comparación entre el índice de Nash-Sutcliffe frente al área drenada en cada estación de aforo en el proceso de calibración y validación del modelo. En la Tabla 7.54 se presentan los valores de Nash en cada estación de aforo en el periodo de calibración y validación seleccionado para la cuenca del río Ésera. En la Figura 7.37 se ilustran los valores obtenidos.

Tabla 7.54 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe frente al área drenada.

PARAMETROS DISTRIBUIDOS			
Estación de Aforo (Calibración/Validación)	Área Drenada (Km^2)	Info. Puntual	Info. Interpolada
		NSE	NSE
Calibración Graus	890.46	0.406	0.607
Validación temporal Graus	890.46	0.328	0.557
Valid espacio-temporal Campo	565.29	0.278	0.414
Valid espacio temporal Capella	425.93	0.479	0.587

Parámetros Distribuidos con Información hidrometeorológica Puntual.



Parámetros Distribuidos con Información hidrometeorológica Interpolada.

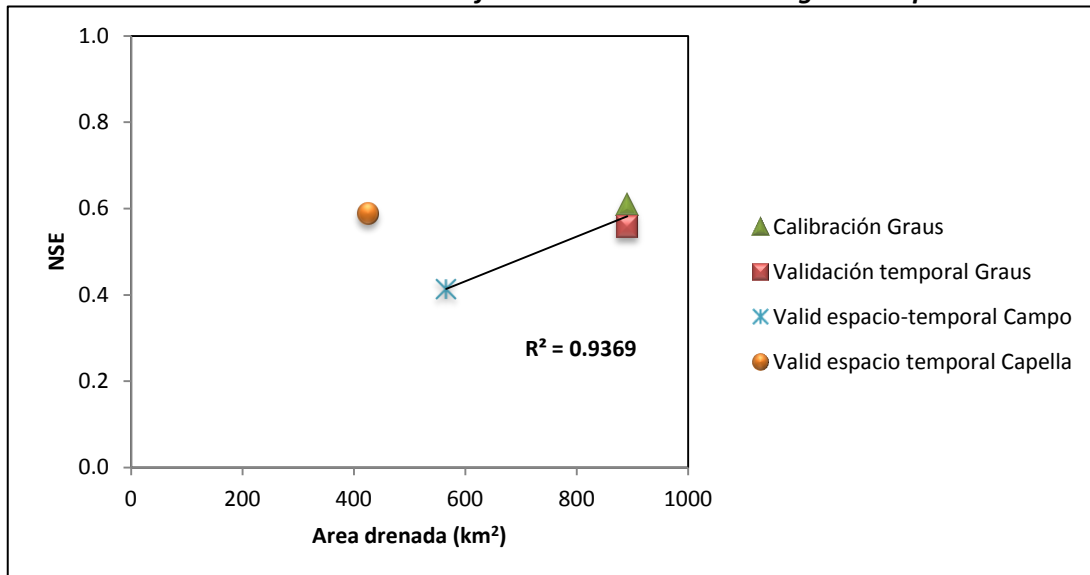


Figura 7.37 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe obtenido en la calibración y validación del modelo.

Como se ha mencionado el criterio para aceptar una calibración es muy subjetivo. En la literatura parece que es aceptable una calibración con un índice de Nash superior a 0.6, y se considera como excelente un valor superior a 0.8. Por su parte, los criterios de ajuste en validación son peores que en calibración. Por ello, se considera como aceptable un índice de Nash superior a 0.5, siendo excelente las validaciones por encima de 0.7.

Con base a lo anterior en términos generales se puede considerar que el modelo donde se utilizó la información hidrometeorológica interpolada representa de forma aceptable los procesos caracterizados en la cuenca del río Ésera.

Es importante resaltar la validez del modelo en un sistema independiente, como es el caso de la cuenca del río Isábena, aforada en la estación Capella, presentando un NSE aproximado y/o superior que el resultante de la calibración. También se destaca el ajuste entre los NSE obtenidos para las estaciones de aforo ubicadas sobre el río Ésera (Graus y Campo) indicando la relación que hay entre el NSE y el área drenada, obteniendo un $R^2=0.94$ en el modelo con parámetros distribuidos e información interpolada.

A partir de los caudales observados y simulados obtenidos en el periodo de validación se representó mediante el diagramas de cajas y bigotes o *Boxplot* las distribuciones de estos conjuntos de datos, presentando cinco medidas descriptivas, mediana o Q2, primer cuartil (Q1), tercer cuartil (Q3), valor máximo y valor mínimo; con el objetivo de obtener información sobre la tendencia central y simetría de la serie de datos de caudales observados y simulados.

A continuación se presentan las medidas descriptivas y los diagramas boxplot para cada uno de los casos objeto de este apartado, parámetros distribuidos con información hidrometeorológica puntual (Tabla 7.55 y Figura 7.38) e información interpolada (Tabla 7.56 y Figura 7.39).

Tabla 7.55 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual.

	Graus		Campo		Capella	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
Q1	7.47	4.43	6.90	3.67	1.03	0.48
Min	1.86	0.06	1.78	0.03	0.45	0.01
Mediana	12.34	10.77	12.97	9.08	2.00	1.76
Max	330.75	339.82	294.50	363.81	192.20	118.44
Q3	23.19	21.03	23.59	17.58	4.32	5.00

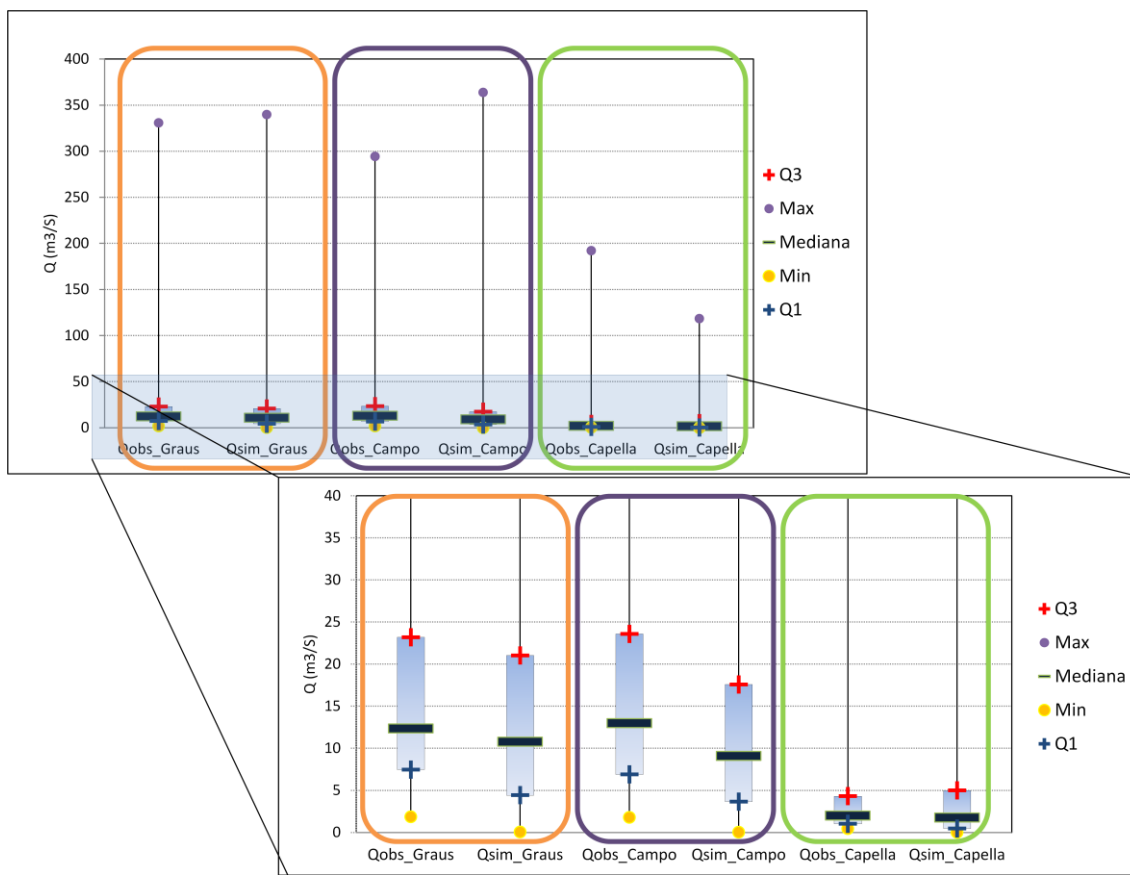


Figura 7.38 Diagramas boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual y periodo de validación.

A partir del diagrama bloxplot (Figura 7.38) y las medidas descriptivas listadas en la Tabla 7.55 se deduce para el caudal simulado en el periodo de validación temporal en la estación *Graus_013* lo siguiente:

- (Min): extremo inferior del bigote, valores por debajo de $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ se consideran atípicos, con respecto al caudal observado, este valor mínimo contribuyen a porcentaje de error en el modelo.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son inferior a $4.43 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de $10.77 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q3): por debajo de $21.03 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.

- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de 339.82 m³/s se consideran atípicos. Con respecto al caudal máximo observado este valor simulado contribuye a porcentaje de error en el modelo.

Cabe señalar que para las demás estaciones de aforo el análisis es el mismo, para simplificar el contenido del documento solo se presentarán los análisis correspondientes a la estación de aforo *Graus_013*.

Tabla 7.56 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.

	Graus		Campo		Capella	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
Q1	7.47	2.58	6.90	2.17	1.03	0.17
Min	1.86	0.09	1.78	0.07	0.45	0.01
Mediana	12.34	6.59	12.97	5.45	2.00	0.59
Max	330.75	282.87	294.50	212.81	192.20	165.93
Q3	23.19	13.82	23.59	11.47	4.32	2.11

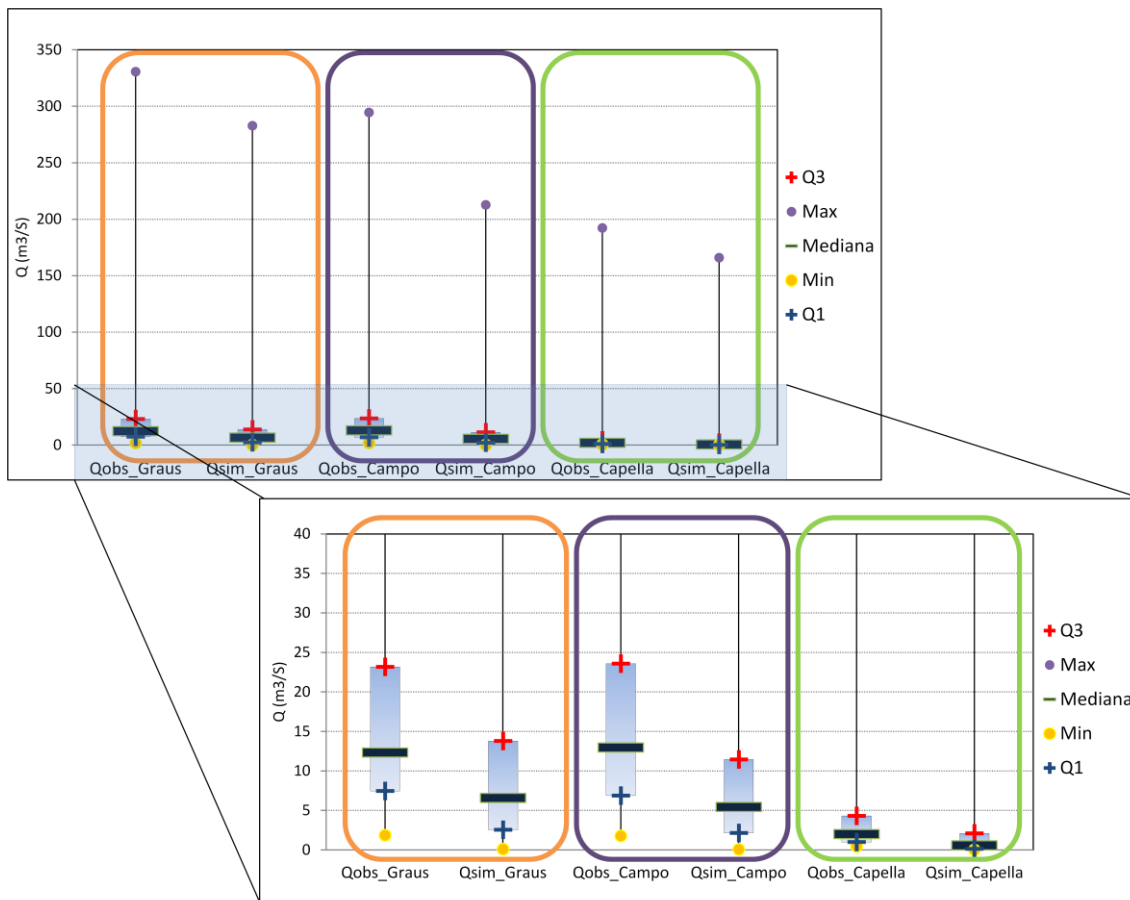


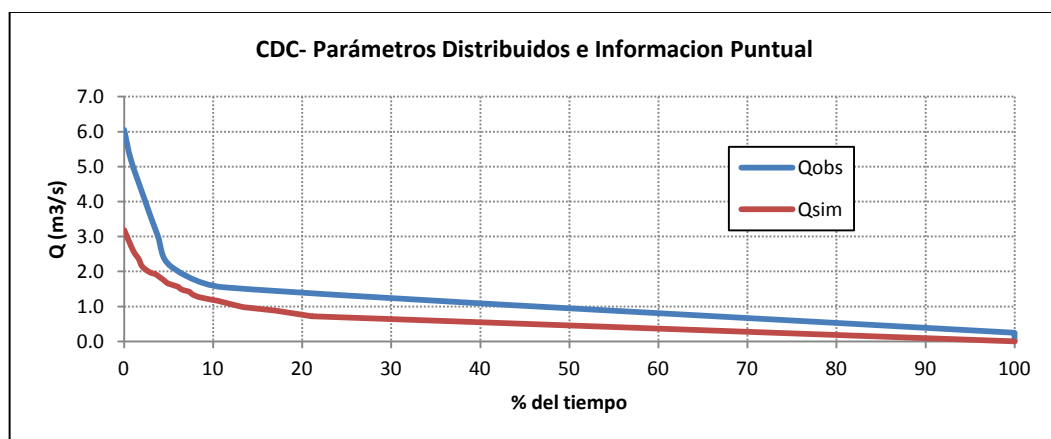
Figura 7.39 Diagrama boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación.

En el diagrama boxplot (Figura 7.39) correspondiente al modelo con parámetros distribuidos e información interpolada se analizaron las medidas descriptivas (Tabla 7.56) en la estación *Graus_013* concluyendo lo siguiente:

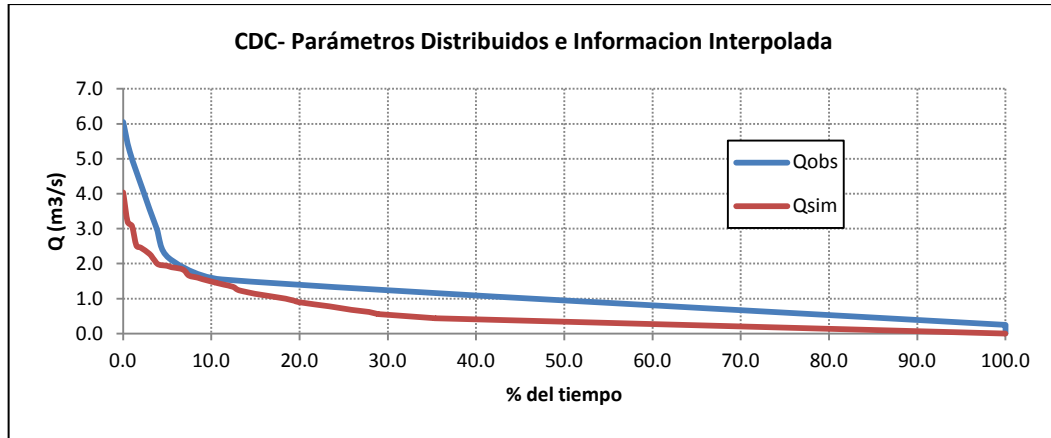
- (Min): extremo inferior del bigote, valores por debajo de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ se consideran atípicos. Con respecto al caudal mínimo observado dicho valor contribuye a porcentaje de error en el modelo.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son inferior a $2.58 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de $6.59 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q3): por debajo de $13.82 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.
- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de $282.87 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta llegar al caudal máximo observado, se consideran mejorables para el modelo.

7.3.1.2. Cuenca del río Siurana.

Como se ha señalado anteriormente la calibración del modelo Siurana ha sido más compleja que las otras cuencas debido a la falta de series de caudal de buena calidad y estaciones de aforo, esto es evidente en la construcción de las CDC, tanto para información puntual como interpolada (Figura 7.40).



(a)



(b)

Figura 7.40 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Embalse Ciurana_9868.
Información puntual (a), Información interpolada (b).

La CDC estimada con los caudales simulados y que representa los parámetros distribuidos e información puntual (Figura 7.40a) muestra una diferencia entre los caudales igualadas o excedidos entre el 0 y el 100% de aproximadamente $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, donde la curva del caudal simulado se encuentra por debajo del observado. Igualmente para el caso presentado en la Figura 7.40b el modelo subestima los caudales simulados, con una diferencia entre los caudales igualadas o excedidos entre el 0 y el 2% con un valor de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y entre 20 y 100% un valor de aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Siguiendo con el análisis de resultados en la Tabla 7.57 se presentan los valores de Nash obtenidos en el periodo de calibración y validación seleccionado para la cuenca del río Siurana, usando información puntual e información interpolada. Cabe destacar que a pesar de la baja calidad de los datos, el modelo TETIS representó de forma aceptable, según literatura, los procesos hidrológicos en el periodo de calibración, obteniendo un $\text{NSE}=0.62$ con el uso de información hidrometeorológica interpolada. En la Figura 7.41 se ilustran los valores obtenidos.

Tabla 7.57 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe frente al área drenada.

	Área Drenada (Km ²)	NSE
Calibración Info. Puntual	60.16	0.533
Validación Info. Puntual	60.16	0.134
Calibración Info. Interpolada	60.16	0.622
Validación Info. Interpolada	60.16	0.207

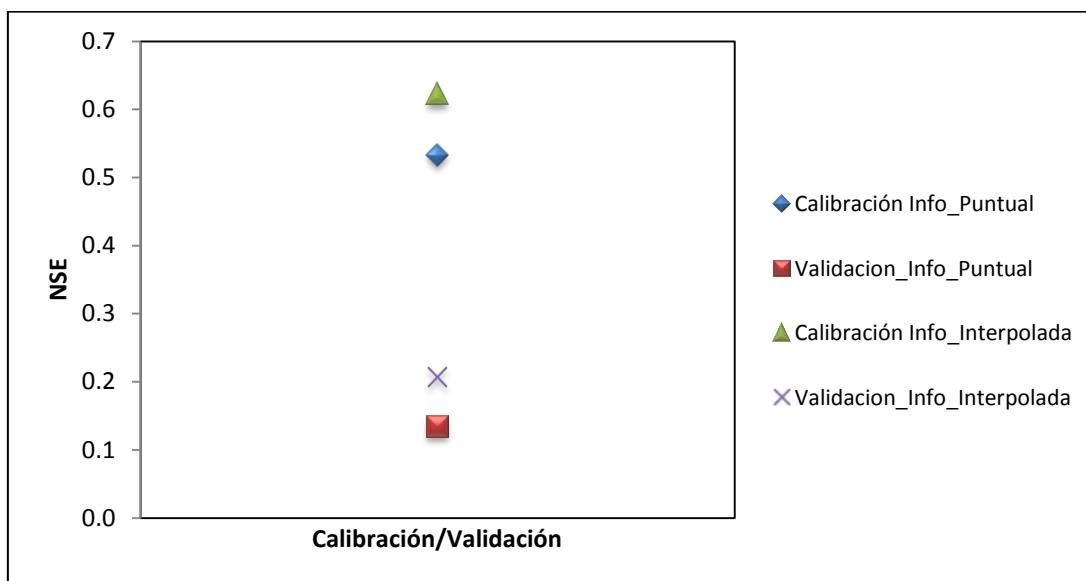


Figura 7.41 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe obtenido en la calibración y validación del modelo con información puntual e interpolada.

Con el conjunto de caudales observados y simulados obtenidos en el periodo de validación se representó el diagrama Boxplot en la cuenca del río Siurana con información puntual e interpolada (Figura 7.42 y 7.43). Las cinco medidas descriptivas se listan en la Tabla 7.58 y 7.59 para las respectivas informaciones hidrometeorológica.

Tabla 7.58 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual.

	Emb_Ciurana	
	Qobs	Qsim
Q1	0.0200	0.0002
Min	0.0000	0.0000
Mediana	0.0700	0.0044
Max	9.4000	6.5650
Q3	0.1500	0.0745

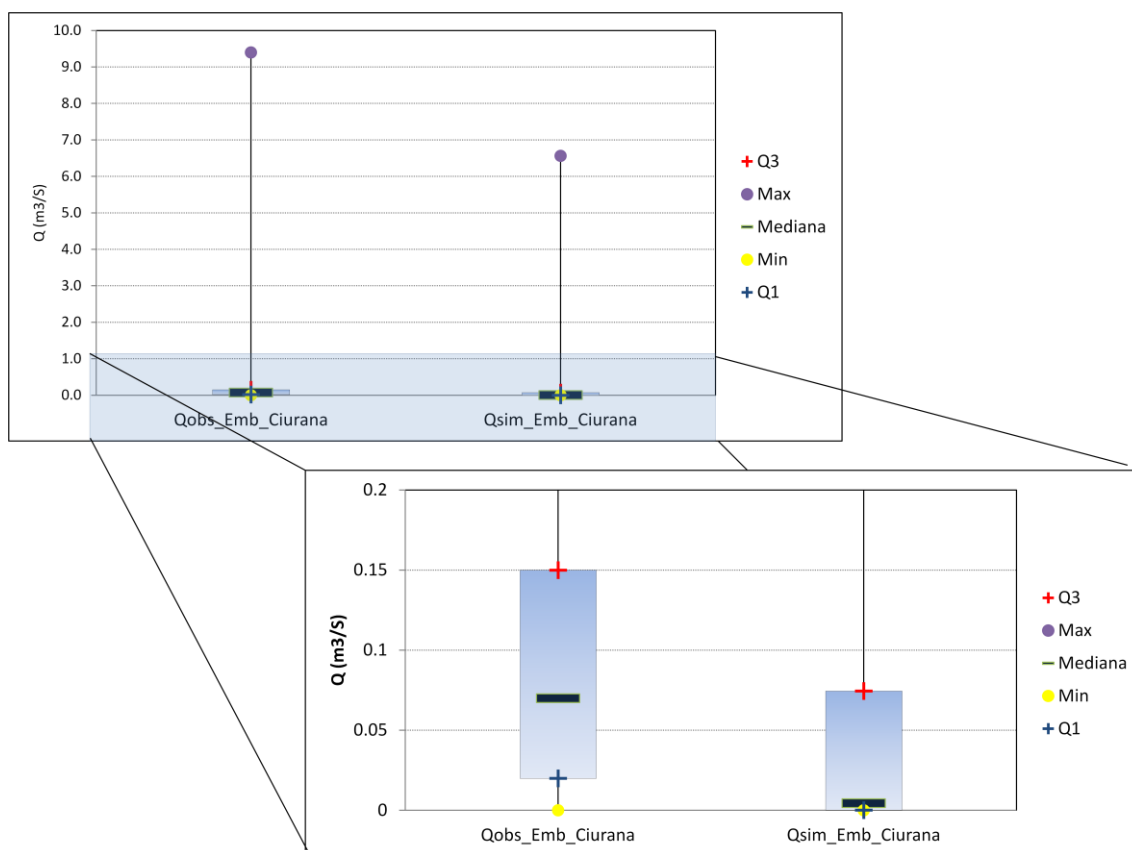


Figura 7.42 Diagramas boxplot correspondientes a la estación Embalse_Ciurana, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual y periodo de validación.

A continuación se realiza un breve análisis de los resultados obtenidos.

- (Min): el valor de 0.00 m³/s simulado no contribuye a porcentaje de error en el modelo ya que coincide con el observado.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son inferior a 0.0002 m³/s.
- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de 0.004 m³/s.
- (Q3): por debajo de 0.0745 m³/s se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.
- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de 6.57 m³/s hasta llegar al caudal máximo observado, se consideran mejorables para el modelo.

Tabla 7.59 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.

	Emb_Ciurana	
	Qobs	Qsim
Q1	0.0200	0.0000
Min	0.0000	0.0000
Mediana	0.0700	0.0013
Max	9.4000	7.0529
Q3	0.1500	0.0406

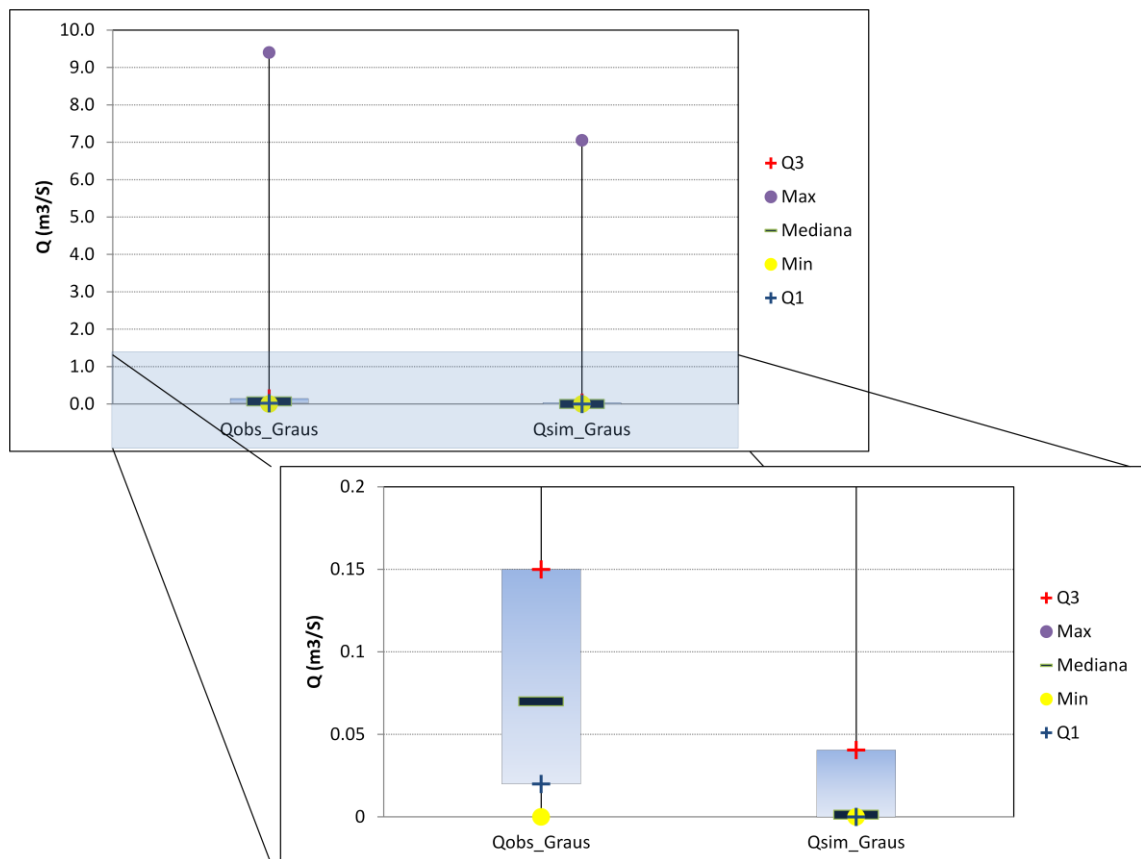


Figura 7.43 Diagramas boxplot correspondientes a la estación Embalse_Ciurana, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación.

Para el modelo con información interpolada se presenta el siguiente análisis.

- (Min): el valor de 0.0 m³/s simulado no contribuye a porcentaje de error en el modelo ya que coincide con el observado.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son igual a 0.0 m³/s.

- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de 0.0013 m³/s.
- (Q3): por debajo de 0.0406 m³/s se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.
- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de 7.05 m³/s hasta llegar al caudal máximo observado, se consideran mejorables para el modelo.

7.3.1.3. Cuenca del río Júcar.

Para analizar los resultados correspondientes a la cuenca del río Júcar, en primer lugar se hará una comparación entre los modelos donde se usaron las diferentes series de datos puntuales y a la vez se contrastarán con los índices de Nash obtenidos con información interpolada, con el objetivo de seleccionar los resultados donde se obtuvieron un mejor ajuste. A continuación en la Tabla 7.60 se presentan un resumen de los índices de Nash obtenidos con información puntual e interpolada y en la Figura 7.44 la respectiva ilustración.

Tabla 7.60 Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe obtenidos en la cuenca del río Júcar.

PARAMETROS DISTRIBUIDOS			
Estación de Aforo (Calibración/Validación)		Info. Puntual (NSE)	Info. Interpolada (NSE)
Cal. Pajaroncillo	AEMET+SAIH	0.786	0.695
Val. Pajaroncillo		0.745	0.592
Val. Alarcón		0.760	0.490
Val. Contreras		0.560	-1.085
Cal. Pajaroncillo	AEMET	0.781	0.695
Val. Pajaroncillo		0.717	0.592
Val. Alarcón		0.221	0.490
Val. Contreras		-2.160	-1.085
Cal. Pajaroncillo	SAIH	0.687	0.695
Val. Pajaroncillo		0.578	0.592
Val. Alarcón		0.513	0.490
Val. Contreras		0.122	-1.085

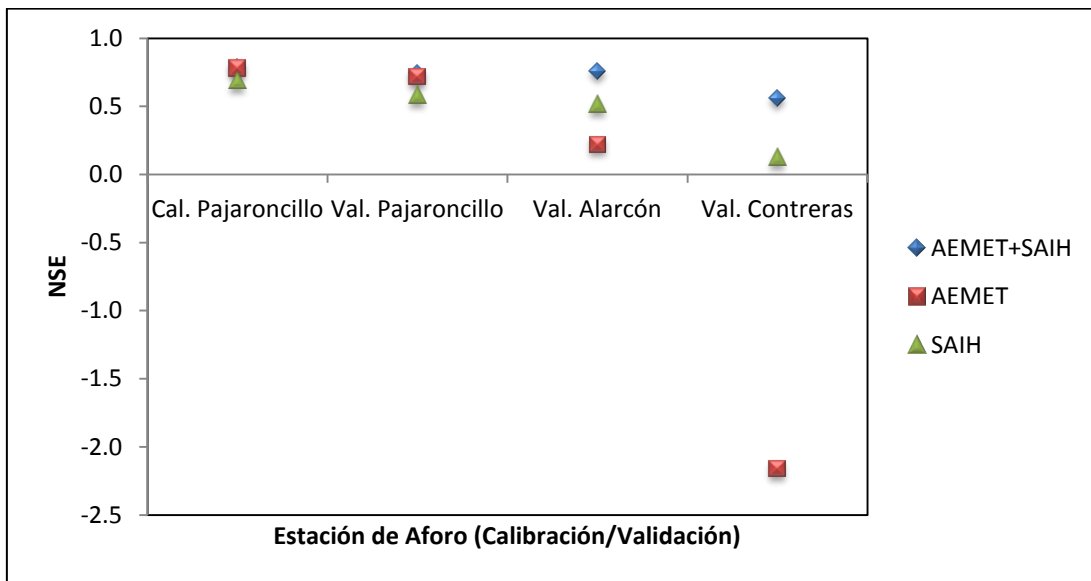
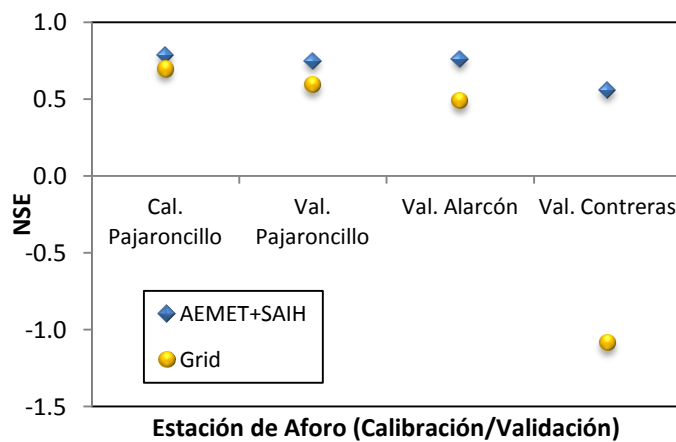


Figura 7.44 Índices de Nash obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo con información puntual.

Según la Figura 7.44 la serie de datos de información hidrometeorológica puntual con la cual se obtiene un mejor resultado en el modelo TETIS es donde se combinan datos SAIH y AEMET. Con respecto a la comparación entre información puntual e interpolada, se puede concluir que el modelo presenta mejores ajustes cuando se introduce mayor densidad de información de lluvia puntual, mientras que con menor o similar densidad de estaciones puntuales (SAIH o AEMET por separado), el modelo obtiene resultados e índices de Nash parecidos (Figura 7.45).



(a)

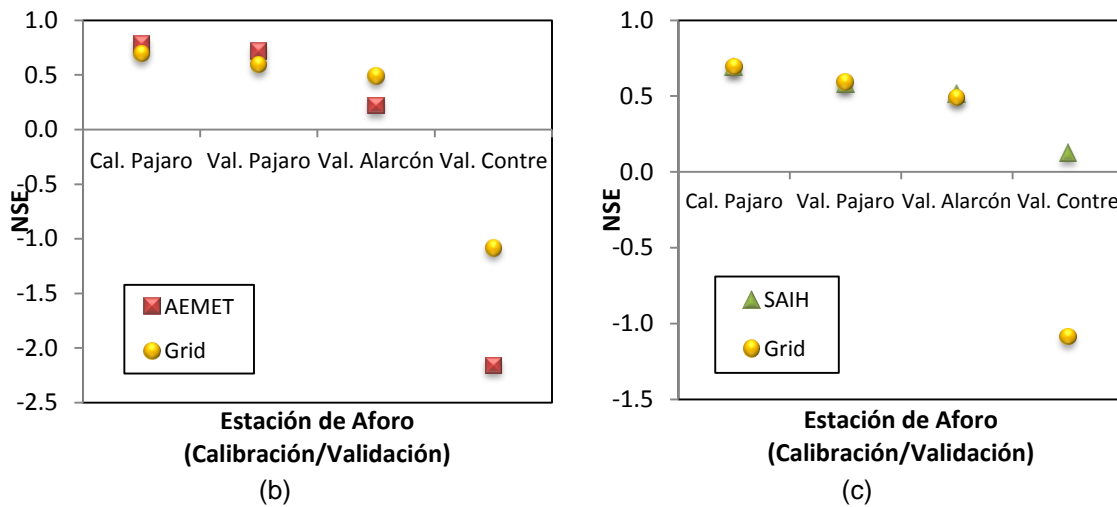
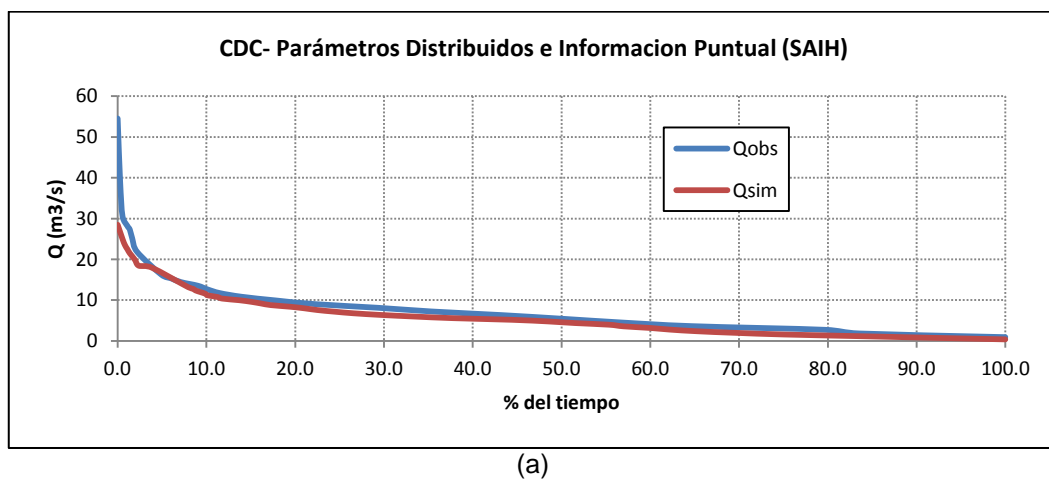


Figura 7.45 Índices de Nash información puntual frente índices de Nash información interpolada obtenidos en el proceso de calibración y validación del modelo.

Explicado lo anterior, a continuación se contrastarán mediante las CDC los caudales simulados con información puntual (SAIH) e información interpolada en el periodo de calibración en la estación de aforo *Pajaroncillo_8090*, con los caudales observados en cada uno de los casos (Figura 7.46). Se escogió estos dos grupos de datos (SAIH; grid) debido a que presentan similares resultados de índices de Nash en el periodo de calibración y validación del modelo.



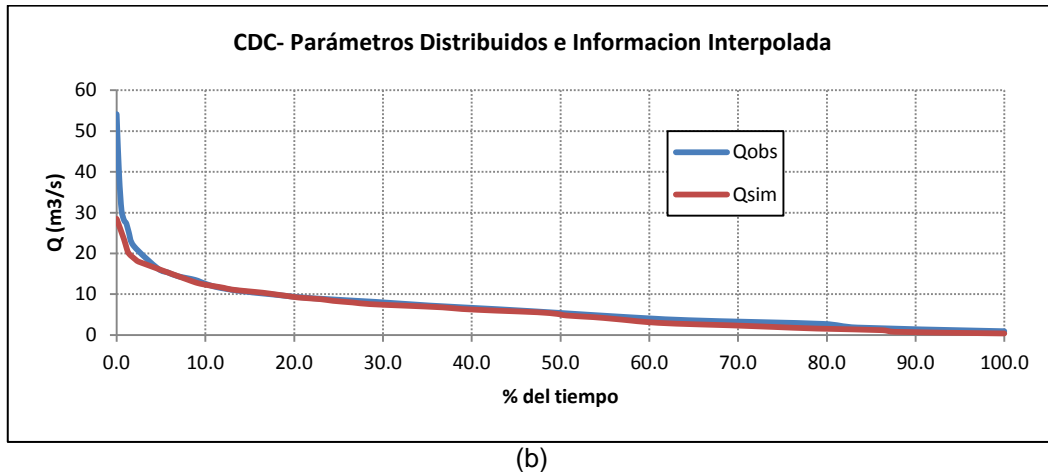


Figura 7.46 Curvas de duración de Caudales. Calibración en Pjaroncillo_9868. Información puntual (a), Información interpolada (b).

En términos generales las CDC construidas en ambos casos no presentan diferencias significativas; para el caso de parámetros distribuidos e información puntual (Figura 7.46a), se observa que existe una diferencia entre los caudales igualadas o excedidos entre el 20 y el 40% de aproximadamente $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$, donde la curva del caudal simulado se encuentra por debajo del observado. Por su parte para el caso presentado en la Figura 7.46b, al igual que en el caso anterior el modelo subestima los caudales resultantes entre los caudales igualadas o excedidos entre el 60 y el 80% de aproximadamente $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Al igual que en las anteriores cuencas, se realizó un análisis para determinar la distribución de la serie de caudales observadas y simuladas en el periodo de validación, representándolas mediante el diagrama *Boxplot*. A continuación se muestran los análisis solo para la estación de Pajaroncillo_8090 con información hidrometeorológica puntual SAIH (Tabla 7.61 y Figura 7.47) e información interpolada (Tabla 7.62 y Figura 7.48); para las demás estaciones de aforo el procedimiento de análisis es el mismo.

Tabla 7.61 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica puntual (SAIH).

	Pajaroncillo		Alarcón		Contreras	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
Q1	0.90	0.46	2.50	0.81	1.60	1.17
Min	0.38	0.05	0.00	0.19	0.00	0.13
Mediana	1.34	0.95	4.10	1.79	2.32	2.45

Max	32.16	32.03	46.33	45.04	48.07	46.66
Q3	2.78	2.17	7.22	5.08	3.81	4.99

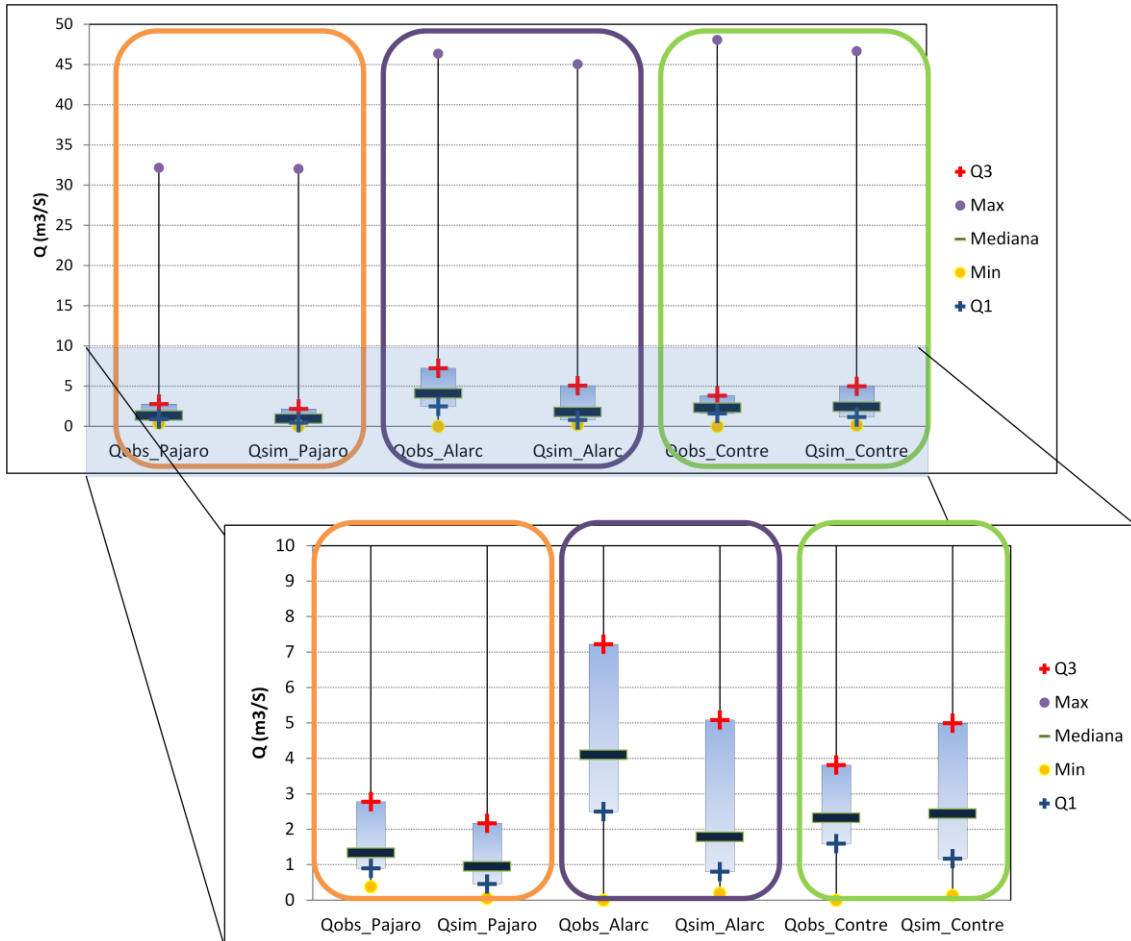


Figura 7.47 Diagramas boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información puntual (SAIH) y periodo de validación.

A partir del diagrama bloxplot (Figura 7.47) y las medidas descriptivas listadas en la Tabla 7.61 se deduce para el caudal simulado en el periodo de validación temporal en la estación *Pajaroncillo_8090* lo siguiente:

- (Min): extremo inferior del bigote, valores por debajo de $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ se consideran atípicos, con respecto a caudal observado, este valor mínimo contribuyen a porcentaje de error en el modelo.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son inferior a $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$.

- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de 0.95 m³/s.
- (Q3): por debajo de 2.17 m³/s se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.
- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de 32.03 m³/s hasta alcanzar el caudal máximo observado contribuyen a la mejora del modelo.

Tabla 7.62 Medidas descriptivas. Información hidrometeorológica interpolada.

	Pajaroncillo		Alarcón		Contreras	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
Q1	0.81	1.35	2.50	1.24	1.60	1.73
Min	0.18	0.55	0.00	0.45	0.00	0.34
Mediana	1.56	2.68	4.10	2.57	2.32	3.32
Max	23.63	8.06	46.33	49.03	48.07	43.28
Q3	3.36	5.14	7.23	6.69	3.81	7.64

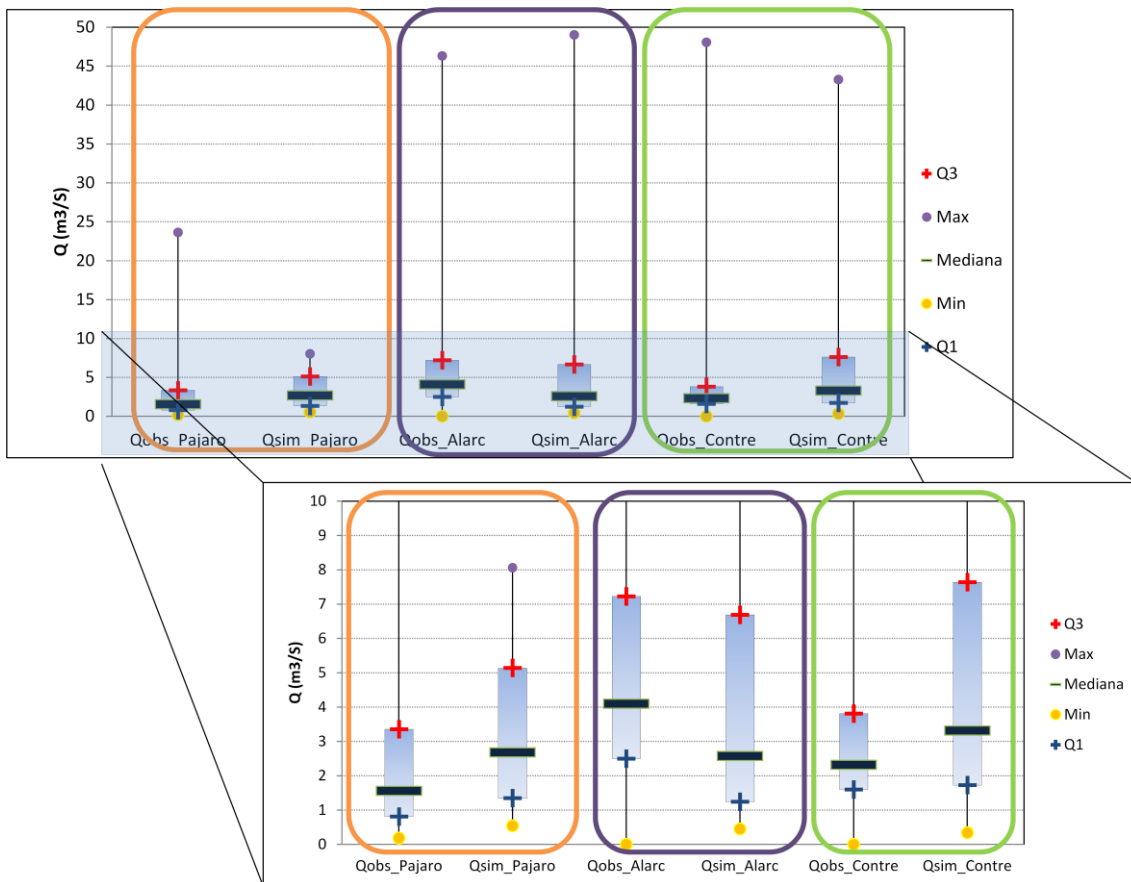


Figura 7.48 Diagrama boxplot correspondiente a cada estación, con los datos de la relación entre los caudales observados y los caudales simulados, información interpolada y periodo de validación.

En el diagrama boxplot (Figura 7.48) correspondiente al modelo con parámetros distribuidos e información interpolada se analizaron las medidas descriptivas (Tabla 7.62) en la estación *Pajaroncillo_8090* concluyendo lo siguiente:

- (Min): extremo inferior del bigote, con valores por debajo de $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta llegar al caudal mínimo observado se aportaría mejoría a los resultados del modelo.
- (Q1): en un 25% los caudales simulados son inferior a $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q2): en un 50% se encuentran caudales con valores por encima y por debajo de $2.68 \text{ m}^3/\text{s}$.
- (Q3): por debajo de $5.14 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentran como máximo el 75% de los caudales simulados.
- (Máx): es el extremo superior del bigote, valores por encima de $8.06 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta llegar al caudal máximo observado contribuirían a la mejoría del modelo.

8. CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones del trabajo.

El *objetivo general* de este trabajo es la aplicación de un modelo hidrológico, conceptual, distribuido en el espacio y en el tiempo, llamado TETIS desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, para predecir la respuesta hidrológica ante un evento de lluvia en las cuencas de los ríos Ésera, Siurana y Júcar, ubicadas en la península Ibérica.

Para alcanzar este objetivo general se desarrolló una nueva propuesta metodológica, que combina la hidrología con el aprovechamiento de información estándar, de libre acceso y disponible online, como mapas de suelos elaborados por la Comunidad Europea o mapas de precipitación elaborados por AEMET. Este es el primer trabajo en el que se involucran estos elementos, lográndose un mayor conocimiento de los fenómenos que ocurren en las cuencas y a la vez simplificando los procedimientos en la obtención de resultados.

La ventaja del uso de mapas denominados estándar que describen la variabilidad espacial de las características de los suelos, del sustrato y de la cubierta vegetal a escala de cuenca, para estimar los parámetros espaciales para la modelización, se vio reflejada en la simplificación y homogeneización del proceso de estimación de los parámetros del modelo TETIS en todas las cuencas estudiadas.

Por otra parte para justificar el uso de estos mapas estándar, donde se obtuvieron parámetros hidráulicos del suelo llamados distribuidos, se realizaron diferentes pruebas, que no se han presentado en el apartado de resultados de este documento por razones de espacio, comparando modelaciones con el uso de parámetros homogéneos, donde se asumió la capacidad de almacenamiento estático del suelo igual a 1 mm y la conductividad hidráulica del suelo y del acuífero con valor de 1 mm/h.

A modo de ejemplo a continuación se presentan los resultados obtenidos en la cuenca del río Ésera, donde se simuló con parámetros homogéneos y parámetros distribuidos usando información interpolada, obteniendo los índices de Nash listados en la Tabla 8.1 los cuales se representan en la Figura 8.1. Cabe señalar que estas pruebas se realizaron en las otras cuencas hidrológicas presentadas en este estudio obteniendo iguales resultados, es decir el ajuste es satisfactorio usando los parámetros distribuidos en vez de los homogéneos.

Tabla 8.1 Índices de Nash obtenidos simulando con parámetros homogéneos y distribuidos e información interpolada.

CUENCA RÍO ESERA		
Estación de Aforo (Calibración/Validación)	Param. Homogéneos	Param. Distribuidos
	Info. Interpolada (NSE)	Info. Interpolada (NSE)
Cal. Graus	0.504	0.607
Val. Graus	0.460	0.557
Val. Campo	0.319	0.414
Val. Capella	0.466	0.587

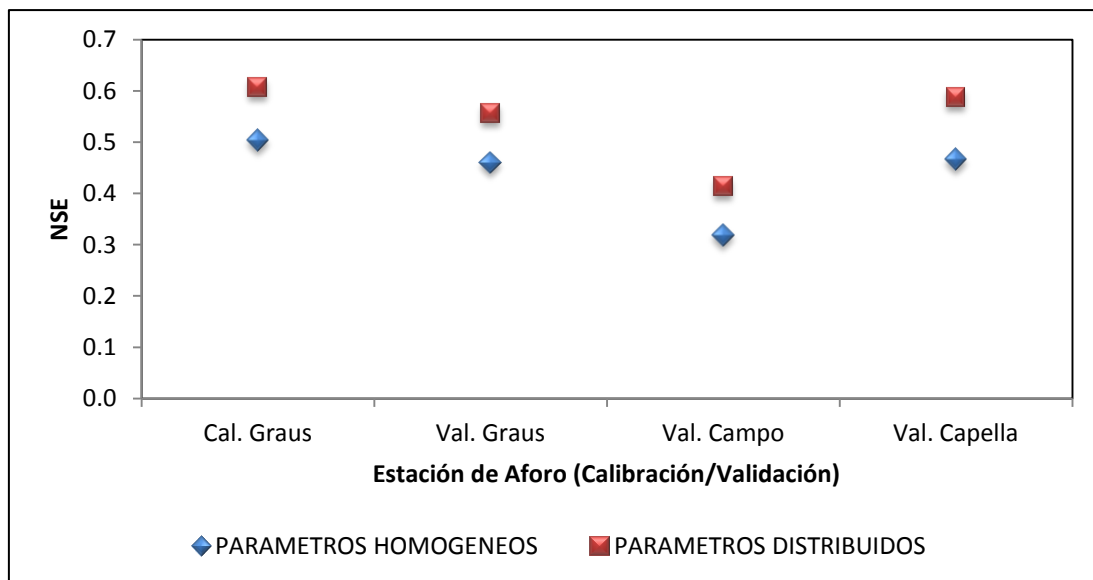


Figura 8.1 Índices de Nash obtenidos de la simulación con parámetros homogéneos y parámetros distribuidos usando información interpolada. Calibración y validación del modelo en la cuenca del río Ésera

Es importante señalar que la metodología de estimación de los parámetros involucra una serie de incertidumbres debidas principalmente a la cantidad, calidad y grado de definición espacial de la información básica empleada. Ante esto, la ventaja del modelo TETIS es que permite “corregir” en gran medida todos estos errores, calibrando los factores correctores del modelo.

La calibración del modelo en cada una de las cuencas se efectuó usando información hidrometeorológica de lluvia puntual, adquirida a través del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), para la cuenca de río Ésera, Agencia estatal de Meteorología (AEMET), para la cuenca del río Siurana y del SAIH de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), para la cuenca del río Júcar.

La calidad y la precisión de los datos es un problema en la modelación hidrológica, por tanto, se recurrió al proyecto *Spain02*, datos de lluvia interpolada a partir de los datos puntuales de la AEMET, disponible online y de libre acceso.

Respecto a los resultados obtenidos en las comparaciones entre información de lluvia puntual e interpolada con parámetros distribuidos se determinó que los resultados óptimos se esperan de los modelos donde se tenga mayor densidad de información lo cual ayuda a distribuir mejor la entrada de precipitación. Por lo tanto, el tipo de precipitación es más importante que la elección del modelo hidrológico en términos de producir simulaciones hidrológicas más robustas.

En el análisis detallado de los resultados obtenidos con el modelo TETIS para cada una de las cuencas hidrológicas hay que destacar las siguientes conclusiones:

- En la validación temporal, se observa que el modelo TETIS reproduce casi todos los eventos presentes en el periodo simulado, presentando una adecuada distribución temporal de los caudales picos. Sin embargo, al comparar los caudales máximos observados frente a los caudales

máximos simulados, el modelo presenta en la mayoría de los casos tendencia a subestimar los caudales picos.

- Los estadísticos obtenidos en la validación espacio temporal del modelo, indican que existe una tendencia a disminuir el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe, al aumento del área de la cuenca. Pudiendo ser la razón el encontrarse a mayor distancia de la cuenca calibrada, entendiendo que presenta una mayor variabilidad en sus condiciones propias de respuesta.
- En los balances hídricos de las cuencas modeladas, en el caso donde se uso información de lluvia puntual e interpolada, se observó una gran similitud en el comportamiento de las mismas, resultando la mayor aportación a la escorrentía total, el flujo subsuperficial, seguido por la escorrentía directa y luego por el flujo base, esto para el caso de las cuencas Ésera y Siurana. Para la cuenca del río Júcar, la mayor aportación a la escorrentía total está dada en primer lugar por el flujo base, seguido el flujo subsuperficial y finalmente aporte de la escorrentía directa.

En términos generales los resultados indican que los conjuntos de datos interpolados y mapas globales se están acercando a una resolución estándar y que pueden ser utilizados para predicciones hidrológicas en las regiones donde existen datos dispersos.

Finalmente es importante tener en cuenta la presencia de datos faltantes en las series de caudales diarios y de lluvia puntual, siendo un factor influyente en los resultados obtenidos por el modelo TETIS.

8.2. Aportes del trabajo.

El interés de aplicar el modelo hidrológico distribuido TETIS, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, usando conjuntos de datos estándar globales y regionales se baso específicamente en las limitaciones de disponibilidad de

datos de buena calidad para la representación de los procesos a escala de cuenca.

Un aporte de la tesis deriva en la aplicación del modelo TETIS en tres cuencas ubicadas en la península ibérica: Ésera, Siurana y Júcar, con características diferentes y respuestas hidrológicas particulares, en donde se representaron procesos hidrológicos usando conjuntos de datos estándar globales, de libre acceso requeridos para la modelación hidrológica.

En términos generales los resultados encontrados fueron satisfactorios, el modelo hidrológico distribuido TETIS fue capaz de reproducir los diferentes eventos al usar serie de datos de precipitación puntual e interpolada.

Entre las innovaciones propuestas, se destaca el uso de la base de datos interpolada del proyecto *Spain02*, la cual demostró que es capaz de reproducir satisfactoriamente la intensidad de los valores medios y extremos de precipitación, así como la evolución temporal al momento de ser contrastada con la lluvia puntual.

Por su parte el uso de los mapas estándar marca una pauta importante a la hora de realizar estudios hidrológicos, son de libre acceso y disponibles online, además para el objetivo de este trabajo describen de forma aceptable la variabilidad espacial de las zonas en estudio.

Como último aporte cabe señalar la metodología implementada para obtener algunos parámetros de entrada como los factores de vegetación para el cálculo de la evapotranspiración, los cuales se determinaron teniendo en cuenta la dinámica propia de cada tipo de cobertura vegetal existente en cada cuenca hidrológica, con base a lo planteado en el Documento No. 56 de la FAO.

8.3. Futuras líneas de investigación.

Se considera interesante el presente trabajo para abrir puertas a nuevos estudios o aplicaciones en las que se consideren diferentes fuentes de información global o estándar y la influencia de las mismas en aspectos

relacionados con el régimen hídrico. Algunos de estos estudios o aplicaciones podrían ser los siguientes:

- Estudios sobre calidad de las fuentes de información: estudios para distinguir entre las fuentes específicas de los errores en las bases de datos requeridas en los modelos y las posibilidades de mejoras.
- Estudio correspondiente a mapas globales de suelo: estimación de mapas globales con mayor variabilidad espacial.
- Planificación del recurso a largo plazo: estimación de los recursos y planificación de los mismos, considerando las consecuencias hídricas presentadas ante la variación y/o diferencias entre las fuentes de información.
- Con respecto a la estimación de parámetros: cabe decir que algunos de los parámetros de entrada como la interceptación o los factores de vegetación de las diferentes categorías de aprovechamientos del suelo, podrían estimarse sobre métodos más concretos y cuantificados empíricamente para que la modelización ajustara más a la realidad, aunque también se debe considerar la gran variabilidad existente bajo una misma categoría.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandersson, H. (1986). *A homogeneity test applied to precipitation data*. Journal of Climatology, 6:661–675.
- Alexandersson, H. and Moberg, A. (1997a). *Homogeneization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends*. Int. J. Climatol., 17:25–34.
- Alexandersson, H. and Moberg, A. (1997b). *Homogeneization of Swedish temperature data. Part II: Homogenized gridded air temperature compared with a subset of global gridded air temperature since 1861*. Int. J. Climatol., 17:35–54.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO: riego y drenaje, 56: 64.
- Álvarez, J., Sánchez, A., Quintas, L. (2004). *SIMPA, a GRASS based tool for Hydrological Studies*. Proceedings of the FOSS/GRASS Users Conference. Bangkok, Thailand.
- Abbott, M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A, O’Connel P.E. and Refsgaard J.C. (1986a). *An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, “SHE”, 1, History and Philosophy of a physically-based, distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87: 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A, O’Connel P.E. and Refsgaard J.C. (1986b). *An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen, “SHE”, 2, Structure of a physically-based, distributed modelling system*. Journal of Hydrology, 87: 61-77.
- Adler, R. F., Huffman, G., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., and Arkin, P. (2003). *The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present)*. Journal of Hydrometeorology, 4:1147–1167.



- Beasley, D.B., Huggings, L.F. and Monke, E.J. (1980). *ANSWERS: A model for watershed planning*. Trans.Am.Soc.Agric.Engrs, 23 (4): 938-944.
- Beven, K.J. and Kirkby M.B. (1979). *A physically based, variable contributing area model of basin hydrolog.*, Hydrol. Sci. Bull, 24 (1): 43-69.
- Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jr., Donigian, A.S., Jr., Johanson, R.C. (1997). *Hydrological Simulation Program-Fortran, User's manual for version 11*. U.S.
- Bouwman, A. F., Fung, I., Matthews, E. and John, J. (1993). *Global analysis of the potential for nitrous oxide (N₂O) production in natural soils*. Global Biogeochemical Cycles, 7(3): 557-597.
- Burlando, P., Mancini, M. & R. Rosso (1994). *FLORA: a distributed flood risk analyser, in: Computer Support for Environmental Impact Assessment*. (Edt. G. Guariso and B. Page). Elsevir Science B.V. North-Holland, Amsterdam.
- Bussi, G. (2010). *Calibración de un modelo conceptual distribuido del ciclo de sedimentos. Aplicación a la cuenca experimental de Goodwin Creek (EEUU)*. Trabajo de Investigación. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- CHE (2007). *Plan Hidrológico del río Ésera*. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio del Medio Ambiente. España.
- CHE (2008). *Plan Hidrológico del eje del río Ebro desde el río Martín hasta su desembocadura*. Confederación Hidrográfica del Ebro. Ministerio del Medio Ambiente. España.
- CHJ (2007). *Estudio general sobre la demarcación hidrográfica del Júcar*. Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio del Medio Ambiente. España.
- Chow, V. T., D. R. Maidment (1994). *Hidrología Aplicada*. Sta. Fe de Bogotá, Colombia, McGraw-Hill.

- Crawford, N.H., Linsley, R. K., (1966). *Digital simulation in hydrology: Standford Watershed Model Mark IV*. Dept. of Civil Engineering, Tech. Rep. 39, Standford University, Standford.
- DIHMA (2001). *Un Modelo de Predicción de Crecidas para el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Tajo*. Informe Final para UTE SAIH TAJO.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1976). *Las necesidades de agua en los cultivos*. Estudio FAO: riego y drenaje, 24: 194.
- Duan, Q., Sorooshian, S., y Gupta, V. K (1992). *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water Resources Research, 28 (4).
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. K. (1994). *Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models*. Journal of Hydrology, 158:265-284.
- Environmental Protection Agency. National Exposure Research Laboratory, EPA/600/R-97/080: 755.
- Escrivà, A. (2006). *Estudi sobre la influència dels canvis dels usos del sòl en el règim hídric de recursos i crescudes a la Rambla del Poyo (València)*. Proyecto final de carrera. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Farr, T.G., Kobrick, M. (2000). *Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data*. Amer. Geophys. Union Eos, 81: 583-585.
- Fernández, C.P. (2002). *Estudio del Impacto del Cambio Climático Sobre los Recursos Hídricos. Aplicación en diecinueve cuencas en España*. Tesis Doctoral. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

- Francés, F., V. J. J., et al. (2002). *Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain*. Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference. Las Vegas, USA.
- Francés, F., Vélez, J. I., et al. (2007). *Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models*. Journal of Hydrology, 332: 226 - 240.
- Garrote, L. and Bras, R.L. (1995^a). *A distributed model for real-time flood forecasting using digital elevation models*. Journal of Hydrology, 167: 279-306.
- Garrote, L. and Bras, R.L. (1995^b). *An integrated software environment for real-time use of a distributed hydrologic model*. Journal of Hydrology, 167: 397-326.
- Gleeson, T., Smith, L., Moosdorf, N., Hartmann, J., Dürr, H. H., Manning, H. A., van Beek, L. P.H. and Jellinek, A. M. (2011). *Mapping permeability over the surface of the Earth*. Geophys. Res. Lett, 38: L02401.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A. (1992^a). *Physically based hydrologic modeling. I. A terrain based model for investigative purposes*. Water Resources Research, 26 (10): 2639-2658.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. and McMahon, T.A. (1992^b). *Physically based hydrologic modeling. II. Is the concept realistic?*. Water Resources Research, 26 (10): 2659-2666.
- Grayson, R., y Blöschl, G. (2001). *Spatial modelling of catchment dynamics*. Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling: 51-81.
- González, J. C., Brunetti, M., and de Luis, M. (2010). *A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: Mopredas database (monthly precipitation trends december 1945–november 2005)*. Int. J. Climatol, –:–.

- Guerra, A. (1968). *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.
- Hargreaves, G.L., Hargreaves, G.H., Riley, J.P. (1985). *Agricultural benefits for Senegal river basin*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 111 (2): 113-124.
- Haylock, M., Hofstra, N., Klein-Tank, A., Klok, E. J., Jones, P., and New, M. (2008). *A european daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*. J. Geophys. Res., 113:D20119.
- Herrera, G. S. (2011). *Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España*. Tesis Doctoral, Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, Universidad de Cantabria.
- Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., and Frei, C. (2008). *The comparison of six methods for the interpolation of daily european climate data*. J. Geophys. Res., 113:D21110.
- Huffman, G. J. (1997). *Estimates of root-mean-square random error for finite samples of estimated precipitation*. J. Appl. Meteor., 36(9):1191– 1201.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Janowiak, A. G. J., McNab, A., Rudolf, B., and Schneider, U. (1997). *The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78: 5– 20.
- Iglesias, A., Estrela, T., Gallart, F. (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Impactos sobre los recursos hídricos*. Capítulo 7: 303– 354.
- Jansson, A., Persson, C. and Strandberg, G. (2007). *2D meso-scale re-analysis of precipitation, temperature and wind over Europe – ERAMESAN. Time period 1980–2004*. SMHI reports: Meteorology and Climatology No. 112.

- Jeffrey, S. J., Carter, J. O., Moodie, K. B., and Beswick, A. R. (2001). *Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data*. Environmental Modelling and Software, 16: 309–330.
- Jones, L. E. (1971). *Linearizing weigh factors for least squares fitting*. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 97 (HY5): 665-675.
- Kothyari, U. C. y Singh, V. P. (1999). *A multiple-input single-output model for flow forecasting*. Journal of Hydrology, 220: 12-26.
- Lee, S., Ni-Mesister, W., Toll, D., Nigro, J., Gutierrez-Magness, A. L., Engman, T. (2010). *Assessing the hydrologic performance of the EPA's nonpoint source water quality assessment decision support tool using North American Land Data Assimilation System (NLDAS) products*. Journal of Hydrology, 387: 212-220.
- Leopold, L. B., y T. Maddock. (1953). *The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications*. United States Government Printing Office.
- Liebmann, B. and Allured, D. (2005). *Daily precipitation grids for South America*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1567–1570.
- Matinec, J. (1960). *The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting*. IUGG General Assembly of Helsinki, Comission of Surface Waters. IAHS, 51: 468-477.
- Martínez - Casasnovas, J.A., Poch, R.M. (1998). *Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse de Joaquín Costa*. Limnética, 14: 83-91.
- Matthews, E. (1983). *Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies*. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22: 474-487.



- Maurer, E. P., Wood, A. W., Adam, J. C., Lettenmaier, D. P., and Nijssen, B. (2002). *A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States*. *J. Climate*, 15(22):3237–3251.
- Meijerink, A. M. J. (1994). *Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology*. Enschede, The Netherlands, –:–.
- Monteith, J.L. (1965). *Evaporation and environment*. Symposium of the Society for Experimental Biology, 19: 205-234
- Montoya, J. J. (2008). *Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Morata, A., L.Martín, M., Luna, M. Y., and Valero, F. (2006). *Selfsimilarity patterns of precipitation in the iberian peninsula*. *Theor. Appl. Climatol.*, 85: 41–59.
- Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. *Water Resour Res.*, 12 (3): 513-522.
- Murai, S., Honda, Y., Asakura, K. and S. Goto. (1990). *An Analysis of Global Environment by Satellite Remote Sensing*. The Institute of Industrial Science, University of Tokyo. Roppingi Minatoku, Tokyo, Japan. 7-22.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles*. *J. Hydrol.*, 10: 282–290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R (2002). *Soil and Water Assessment Tool. User's manual*. Blackland Research & Extension Center. USDA, Agricultural Research Service, Texas.
- Ninyerola, M., Pons, X., and Roure, J. M. (2007). *Monthly precipitation mapping of the iberian peninsula using spatial interpolation tools implemented in a geographic information system*. *Theor. Appl. Climatol.*, 89:195–209.

- O' Loughlin E.M. (1986). *Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis*. Water Resources Research, 22 (5): 794-804.
- Palacios V., O. L. (1986). *El uso de modelos en irrigación y áreas a fines*. Terra, 4: 41-49.
- Papadakis, J. (1980). *El clima. Con especial referencia a los climas de América Latina, Península Ibérica, ex Colonias Ibéricas y sus potencialidades agropecuarias*. Albatros. Buenos Aires, Argentina.
- Penman, H.L. (1956). *Evaporation: An introductory survey*. Netherlands J. Agric. Sci., 4:9-29.
- Perry, M. and Hollis, D. (2005). *The generation of monthly gridded datasets for a range of climatic variables over the UK*. Int. J. Climatol., 25(8):1041–1054.
- Poblete. D. N. (2008). *Modelo hidrológico distribuido para la simulación de recursos hídricos*. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Puricelli, M. M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rafaelli, S. (2003). *Paisaje erosivo en cuencas de montaña. Modelación con extrapolación espacial ascendente*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.
- Samani, Z. (2000). *Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 126 (4): 265-267.
- Searcy, J.K. (1963). *Part 2: Low Flow Techniques. Flow-Duration Curves*. En Manual of Hydrology, de U.S. Geological Survey. Washington: U.S. Government Printing Office.

- Sys, C. (1985). *Land evaluation, part I, II, III*. ITC. University of Ghent. Belgium.
- Soil Survey Staff. (1975). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soils Surveys*. USDA, Agriculture Handbook No. 436. Washington D.C.
- Sorooshian, S., Duan, Q., y Gupta, V. (1993). *Calibration of Rainfall-Runoff Models: Application of Global Optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model*. Water Resources Research.
- Strömqvist, J., Dahne, J., Donnelly, C., Lindström, G., Rosberg, J., Charlotta, P., Yang, W., and Arheimer, B. (2009). *Using recently developed global data sets for hydrological predictions*. In: *New Approaches to Hydrological Prediction in Data-sparse Regions (Proc. of Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009)*. IAHS Publ., 333: 121-127.
- Tank, A. M. G. K., Wijngaard, J. B., Können, G. P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkhlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., Maugeri, M., Leitass, A., Bukantis, A., Aberfeld, R., Engelen, A. F. V. V., Forland, E., Mietus, M., Coelho, F., Mares, C., Razuvaev, V., Nieplova, E., Cegnar, T., López, J. A., Dahlström, B., Moberg, A., Kirchhofer, W., Ceylan, A., Pachaliuk, O., Alexander, L. V., and Petrovic, P. (2002). *Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the european climate assessment*. *Int. J. Climatol.*, 22:1441–1453.
- Thorntwaite, C. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Tucci C.E. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Brasil, Editora da Universidade / UFRGS.
- Yatagai, A., Arakawa, O., Kamiguchi, K., Nodzu, H. K., and Hamada, A. (2008). *A 44-year daily gridded precipitation dataset for asia based on a dense network of rain gauges*. *Scientific online letters on the Atmosphere*, 5: 137–140.

- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- Vélez, J. J.; Vélez J. I. y Francés, F. (2002a). *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.
- Vélez, J. I.; Vélez J. J. y Francés, F. (2002b). *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.
- Vélez, J. J. (2003). *Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real para eventos de crecidas*. PhD Tesis. Universidad Politécnica de Valencia.
- Vélez, J. J. y Francés, F. (2005). *Automatic calibration of initial state variables for flood forecasting using a distributed model*. International conference on innovation advances and implementation of flood forecasting technology, 17 to 19 October 2005, Tromsø, Norway.
- Vélez, J. J. y Francés, F. (2009). *Calibración automática de las condiciones iniciales de humedad para mejorar la predicción de eventos de crecida*. Avances Recursos Hidráulicos.
- Verdú, A. J. M. (2003). *Análisis y modelización de la respuesta hidrológica y fluvial de una extensa cuenca de montaña mediterránea (rio Isábena, Pre-Pirineo)*. Tesis Doctoral. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universidad de Lleida.
- Weynman, D. R. (1973). *Measurement of downslope flow of water in a soil*. Journal of Hydrology, 20: 267-268.
- Whipkey, R. Z. (1965). *Subsurface stormflow from forested slopes*. Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, 10: 74-85.



Yapo, P. O., Gupta, H. V. y Sorooshian, S. (1998). *Multi-objective global optimization for hydrologic models*. Journal of Hydrology, 204: 83-98.

Zucchini, W. and Nenadic, O. (2006). *A web-based rainfall atlas for southern Africa*. Environmetrics, 17:269–283.



10. ANEXOS

TABLA DE CONTENIDO-ANEXOS

<i>ANEXO I. ESTACIONES DE MEDICIÓN DE PRECIPITACIÓN USADAS PARA EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO.....</i>	III
<i>ANEXO II. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE (R_0).....</i>	IX



ANEXO I. ESTACIONES DE MEDICIÓN DE PRECIPITACIÓN USADAS PARA EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO.

Resolución	Nombre	Coordenadas UTM		Periodo	Precipitación media (mm/año)	Datos faltantes (%)
		X	Y			
Cuenca hidrológica del río Ésera						
Estaciones SAIH CHE						
Diaria	CAMPO	778816	4702708	1997-2007	765	2%
Diaria	ERISTE	784995	4720101	1997-2007	902	3%
Diaria	CAPELLA	780464	4677088	1997-2007	656	3%
Diaria	BARASONA	773968	4669121	1997-2007	590	8%
Cuenca hidrológica del río Siurana						
Estaciones AEMET						
Diaria	CABACÉS	812416	4573151	2003-2007	209	5%
Diaria	CORNUDELLA	827169	4575299	2003-2007	309	0%
Diaria	SERRA D'ALMÓS	813729	4555001	2003-2007	315	8%
Cuenca hidrológica del río Júcar						
Estaciones AEMET						
Diaria	ALBACETE (CASA CEJALBO)	597732	4336498	1999-2010	230	2.1%
Diaria	ALBACETE, OBSERVATORIO	598629	4318164	1999-2010	157	2.5%
Diaria	ALBACETE (LOS LLANOS 'BASE AEREA')	598513	4312089	1999-2010	159	6.2%
Diaria	CASAS IBAÑEZ (POLIDEPORTIVO)	632308	4349649	1999-2010	397	2.3%
Diaria	PEÑASCOSA	551198	4280722	1999-2010	547	46.3%
Diaria	CAÑADA DEL HOYO (LAS LAGUNAS)	595876	4427128	1999-2010	213	1.8%
Diaria	CUENCA (ALBALADEJITO)	567806	4436384	1999-2010	197	3.4%
Diaria	LA ALMARCHA	552946	4393102	1999-2010	227	0.0%



Diaria	LA ALMARCHA (MOLINILLO)	556757	4393129	1999-2010	238	3.8%
Diaria	MINGLANILLA	620616	4377213	1999-2010	302	3.8%
Diaria	PANTANO DE ALARCON	578335	4379444	1999-2010	174	1.6%
Diaria	CUENCA	573499	4435512	1999-2010	192	2.9%
Diaria	ALBERIC SANT JORDI	709927	4333765	1999-2010	299	0.3%
Diaria	ALGEMESI CENTRO EXPERIENCIAS	721201	4343023	1999-2010	346	55.0%
Diaria	ALMUSSAFES	723111	4352410	1999-2010	391	60.1%
Diaria	ALZIRA TORRECHO	720895	4332616	1999-2010	521	19.1%
Diaria	ANNA (AYUNTAMIENTO)	703739	4322186	1999-2010	393	2.3%
Diaria	ANTELLA FUENTE DULCE	708568	4330643	1999-2010	436	1.4%
Diaria	BENIATJAR LES PLANISES	725248	4302191	1999-2010	417	0.2%
Diaria	BENIMODO	723381	4337315	1999-2010	476	8.8%
Diaria	BOLBAITE	700758	4325812	1999-2010	316	1.3%
Diaria	CAMPORROBLES COOPERATIVA	637698	4390112	1999-2010	345	2.9%
Diaria	CANALS (FINCA FERRI)	707531	4315878	1999-2010	595	74.8%
Diaria	CARCAIXENT E.E.A.	718297	4328347	1999-2010	429	6.1%
Diaria	CARRICOLA	719455	4302245	1999-2010	482	0.4%
Diaria	CASTELLO DE LA RIBERA (AYUNTAMIENTO)	723114	4326415	1999-2010	324	4.0%
Diaria	COTES	708260	4325945	1999-2010	388	1.0%
Diaria	ENGUERA - NAVALON	683671	4310383	1999-2010	504	2.6%
Diaria	JALANCE AGROMET	666547	4340034	1999-2010	211	4.1%
Diaria	LA POBLA DEL DUC	723726	4309060	1999-2010	358	1.3%
Diaria	LLOMBAY 'AGRO'	708784	4350160	1999-2010	822	75.5%
Diaria	MOGENTE	694807	4304449	1999-2010	584	44.4%
Diaria	ONTINYENT	707744	4300726	1999-2010	248	3.2%
Diaria	PAIPORTA CAIXA RURAL	722525	4366421	1999-2010	352	0.8%



Diaria	POLINYA (PISCIFACTORIA)	727012	4341338	1999-2010	400	1.0%
Diaria	PRESA DE CONTRERAS	629210	4377382	1999-2010	232	8.6%
Diaria	REQUENA	663455	4372941	1999-2010	241	0.3%
Diaria	REQUENA-REBOLLAR	669389	4371526	1999-2010	256	0.2%
Diaria	SINARCAS	651458	4399654	1999-2010	323	2.7%
Diaria	SUECA	732454	4342455	1999-2010	344	1.5%
Diaria	SUMACARCER	705685	4330567	1999-2010	418	3.0%
Diaria	UTIEL	654284	4382191	1999-2010	242	0.3%
Diaria	VALLADA BOQUELLA	694793	4304376	1999-2010	593	9.1%
Diaria	XATIVA (EL REALENGO)	697375	4307217	1999-2010	454	1.9%
Estaciones SAIH CHJ						
Diaria	PLUVIÓMETRO DE LA RODA	573265	4340794	1999-2010	117	0.0%
Diaria	AFORO EN LOS FRAILES	608192	4333000	1999-2010	149	48.6%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE TIRIEZ	563668	4306268	1999-2010	166	41.3%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ALBACETE	593532	4315774	1999-2010	142	0.1%
Diaria	AFORO TRASVASE TAJO-SEGURA	590160	4299604	1999-2010	154	0.1%
Diaria	MARCO EN BARRC. ESCARTANA	606321	4302645	1999-2010	136	43.7%
Diaria	AFORO EN MONTEMAYOR	567535	4286768	1999-2010	153	49.2%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE HIGUERUELA	636266	4313542	1999-2010	140	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE AYORA LA HUNDE	654505	4327997	1999-2010	181	0.0%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE AYORA	664362	4324316	1999-2010	163	0.0%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO CAROIG	680413	4329023	1999-2010	181	42.9%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ENGUERA LA MATEA	680131	4314504	1999-2010	182	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ENGUERA BENALI	696243	4319548	1999-2010	234	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE FONT DE LA FIGUERA	683851	4297251	1999-2010	171	0.2%
Diaria	MARCO EN RIO CAÑOLES	694507	4305089	1999-2010	243	0.1%



Diaria	PLUVIÓMETRO DE BENEJAMA	695900	4290236	1999-2010	195	0.0%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE SERRA GROSSA	702174	4303910	1999-2010	232	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ONTINYENT	707675	4298033	1999-2010	226	0.1%
Diaria	AFORO EN MONTAVERNER	717275	4307905	1999-2010	256	43.7%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE AGRES	716774	4294188	1999-2010	216	0.2%
Diaria	MARCO EN RIO ALBAIDA	716940	4324600	1999-2010	260	0.1%
Diaria	MARCO VILLANUEVA CASTELLON	714924	4327209	1999-2010	260	48.6%
Diaria	MARCO EN EL RIO SELLENT	710275	4326795	1999-2010	241	76.9%
Diaria	MARCO EN RIO SELLENT	706250	4321725	1999-2010	256	0.1%
Diaria	AZUD DE ANTELLA	707980	4328700	1999-2010	243	0.2%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO CASA DEL BARÓN	679975	4338980	1999-2010	199	0.0%
Diaria	MARCO EN BARRANC DE LA CASELLA	721060	4336550	1999-2010	286	54.5%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE CERRO DEL AGUILA	628409	4346601	1999-2010	142	0.1%
Diaria	AFORO EN ALCALÁ DEL JÚCAR	636013	4339904	1999-2010	151	0.3%
Diaria	MARCO EN RIO CABRIEL	642870	4356038	1999-2010	168	42.0%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE VILLAMALEA	620399	4358270	1999-2010	131	0.1%
Diaria	M.C. QUINTANAR DEL REY	592100	4356727	1999-2010	163	65.3%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE EL PICAZO	577800	4367000	1999-2010	160	2.0%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO TÍO CALORES	590644	4392000	1999-2010	153	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ALMODÓVAR DEL PINAR	594060	4398019	1999-2010	169	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE BELMONTEJO	557000	4408000	1999-2010	154	0.1%
Diaria	AFORO EN SAN LORENZO DE LA PARRILLA	561000	4411799	1999-2010	170	38.1%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO DE TALAYUELO	579455	4423035	1999-2010	164	0.1%
Diaria	AFORO EN CUENCA	573385	4436619	1999-2010	166	0.2%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO LA CIERVA	598150	4434921	1999-2010	198	46.4%
Diaria	AFORO EN PAJARONCILLO	610193	4422128	1999-2010	155	0.1%



Diaria	AFORO EN ENGUIDANOS	619111	4392336	1999-2010	160	59.8%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO DE CUERDA	615775	4422450	1999-2010	176	0.3%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO DE ZARZUELA	573590	4457374	1999-2010	178	0.2%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO CIUDAD ENCANTADA	580764	4451890	1999-2010	201	0.1%
Diaria	AFORO EN MOLINO DE JUAN ROMERO	598177	4453261	1999-2010	222	67.1%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO LAGUNA DEL MARQUESADO	613137	4448492	1999-2010	221	0.3%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO SALVACAÑETE	627473	4440466	1999-2010	204	43.1%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO EN TRAGACETE	599526	4467858	1999-2010	202	68.2%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO DE VALDECUENCA	635108	4462315	1999-2010	170	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE LANDETE	639290	4419350	1999-2010	168	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE ALIAGUILLA	643532	4400767	1999-2010	179	0.0%
Diaria	PLUVIONIVÓMETRO REMEDIO DE UTIEL	661000	4384000	1999-2010	156	0.6%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE CAUDETE DE LAS FUENTES	647804	4378961	1999-2010	152	0.3%
Diaria	AFORO EN REQUENA	661991	4371596	1999-2010	174	69.5%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE SIETE AGUAS	679927	4372973	1999-2010	193	0.1%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE CHIVA	694943	4370179	1999-2010	257	44.6%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE SIERRA AVE	693096	4351474	1999-2010	252	0.1%
Diaria	ACUEDUCTO DE MILLARES	695873	4344149	1999-2010	267	54.0%
Diaria	MARCO EN REAL DE MONTROY	707847	4355733	1999-2010	241	65.1%
Diaria	BARRANCO DE PRADA	712264	4345066	1999-2010	201	84.4%
Diaria	AFORO EN ACEQUIA REAL (GUADASSUAR)	718487	4342304	1999-2010	233	0.0%
Diaria	AFORO EN HUERTO MULET	723840	4341828	1999-2010	288	0.1%
Diaria	AZUD DE SUECA	730150	4342750	1999-2010	286	0.3%
Diaria	CANAL JÚCAR-TURIA EN PICASSENT	717115	4363575	1999-2010	249	0.1%
Diaria	MARCO DE CONTRO EN EL RIO VACA	729975	4325186	1999-2010	249	86.4%
Diaria	PLUVIÓMETRO DE PINET	730950	4318604	1999-2010	376	0.1%



Diaria	AFORO EN COFRENTES	664345	4347828	1999-2010	155	0.1%
Diaria	TOUS	703250	4334250	1999-2010	220	0.2%
Diaria	LA TOBA	591600	4451750	1999-2010	206	0.3%
Diaria	LA MUELA	679750	4344750	1999-2010	175	56.2%
Diaria	ESCALONA EMB.	698250	4333750	1999-2010	207	48.5%
Diaria	EL NARANJERO	684250	4349750	1999-2010	189	55.7%
Diaria	CORTES II	678750	4346750	1999-2010	188	55.9%
Diaria	CONTRERAS	628250	4378250	1999-2010	169	0.6%
Diaria	BELLUS	718750	4312750	1999-2010	247	0.1%
Diaria	ALMANSA EMB.	659750	4304750	1999-2010	159	50.3%
Diaria	ALARCON	576250	4380250	1999-2010	173	0.5%
Diaria	FORATA	683750	4357250	1999-2010	230	0.2%



ANEXO II. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE (R_0).

Northern Hemisphere												Lat. deg.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0	70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0	68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5	50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0	28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5	22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	10	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6