



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Hidráulica Y Medio Ambiente
Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos

Programa de Doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental

Tesis Doctoral

**METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DE
MODELOS DE ACUÍFERO EN SISTEMAS
DE USO CONJUNTO, MEDIANTE LA
EVALUACIÓN EFICIENTE DE
CONDICIONES DE CONTORNO NO
LINEALES PRESENTES EN RELACIONES
RÍO-ACUÍFERO**

Presentada por:

Mario Alberto Hernández Hernández

Dirigida por:

Abel Solera Solera

Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Valencia, España. Diciembre de 2015

"Se me hace tan difícil comprender al científico que no reconoce la presencia de una racionalidad superior detrás de la existencia del universo, como comprender al teólogo que niega los adelantos de la ciencia".

Wernher von Braun.

"La ciencia, a pesar de sus progresos increíbles, no puede ni podrá nunca explicarlo todo. Cada vez ganará nuevos espacios a lo que hoy parece inexplicable. Pero las fronteras del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo misterioso".

Gergorio Marañón.

"La ciencia moderna se caracteriza por la especialización siempre creciente, impuesta por la inmensa cantidad de datos, la complejidad de las técnicas y de las estructuras teóricas dentro de cada campo. Por tanto, la ciencia está disgregada en innumerables disciplinas que sin cesar generan sub-disciplinas nuevas. En consecuencia, el físico, el biólogo, el ingeniero, el psicólogo y el científico social están, por así decirlo, encapsulados en sus universos privados, lo que dificulta el intercambio de conocimiento desde uno de estos compartimentos a otro"

Ludwin von Bertalanffy.

"El científico no es responsable de las leyes de la naturaleza, pero su trabajo es averiguar cómo actúan y cómo ponerlas al servicio del hombre".

Julius Robert Oppenheimer.

"Tanta prisa tenemos por hacer, escribir y dejar oír nuestra voz en el silencio de la eternidad, que olvidamos lo único realmente importante: vivir".

Robert Louis Stevenson.

DEDICATORIAS

A Dios, por todas sus bendiciones depositadas en mi, por permitirme concluir esta etapa de vida, por cuidar de mi en cada reto y en el transcurso de este viaje que hace 4 años emprendí. Gracias por devolverme a casa, con mi familia, sano y a salvo; por haberme otorgado la bendición conocer y disfrutar de otros mundos, que me han hecho crecer como ser humano, como hijo y hermano.

A mis padres, José Félix y María de Jesús, por su apoyo incondicional en cada paso de mi vida y formación profesional, por su amor y cariño. A ustedes dedico esta tesis, pues sin su apoyo emocional, los altibajos de vivir en el extranjero no hubiese sido posible salvarlos. Siempre sentí, aún a la distancia su presencia, amor, cariño, afecto, apoyo, motivación y ánimo.

A mis hermanos, Wendy, Félix y Javier, quienes en las buenas y en las malas, han estado siempre al pendiente de mi formación, mi bienestar físico y emocional; motivándome y animándome a llevar a buen puerto cada una de las actividades en las que me embarqué dentro del proceso de formación doctoral en el extranjero.

A mis sobrinos, Renata, Julián, Santiago y Jonás, por recordarme el sentido de la inocencia infantil, por robarme risas y regalarme inmensas alegrías.

A mis cuñados, Julián, Mariana, Gabriela, por sus palabras de ánimo, consejos y buenos deseos en el transcurso de mi estadía en el extranjero.

A todos, de corazón, gracias!
Los amo.

Mario Alberto Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) y el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Michoacán (COECYT-Michoacán), por el financiamiento otorgado para la formación doctoral y desarrollo de esta investigación.

A mis directores de tesis, el Dr. Abel Solera Solera y la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por sus contribuciones en el desarrollo de esta tesis, por todas sus enseñanzas, consejos, guía, aliento y motivación constantes que depositaron en mí para lograr culminar esta etapa de formación personal y profesional.

A los profesores y colaboradores del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medioambiente de la UPV, en especial a Abel Solera, Javier Paredes, Joaquín Andreu, Carlos Segura, Miguel Ángel Pérez, Eduardo Cassiraga, Manuel Pulido, Mercedes García, Javier Montalvo, por sus contribuciones en mi formación doctoral, por haber compartido su punto de vista sobre la Gestión de Recursos Hídricos dentro del Doctorado de Ingeniería del Agua y Medioambiental, por todas las facilidades y comodidades prestadas durante mi estadía y, en general, por su amable acogida en la universidad y el departamento.

A los profesores del Instituto de Modelación Hidráulica y Sistemas Medioambientales de la Universidad de Stuttgart, especialmente a Wolfgang Nowak, Jochen Seidel y Andrés Bárdossy, por su cálida y amistosa acogida en la Estancia de Investigación Doctoral, por todas las facilidades y comodidades prestadas, por su conocimiento compartido y su visión desde un grupo de trabajo e investigación internacionalmente incluyente.

A los compañeros becarios del departamento, Andrea Momblanch, David Haro, Néstor Lerma, Jéssica Castillo, Corentin Girard, Hector Macián, María Pedro, Edgar Belda, Antonio López, Adrián Morales, Anafé, Tania Lastra, Carlos Morales, Sócrates García, Andreyana Sereno, Carlos Rivas, Flavia Milán, Ignacio Sanz, Enrique Campbell y muchos amigos más, a todos, gracias por todas las risas, los momentos compartidos, la convivencia y experiencias vividas dentro y fuera de la universidad.

RESUMEN

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de la vida y su correcto uso y gestión en los sistemas hidrológicos naturales es fundamental para garantizar su acceso al ser humano, bajo las condiciones adecuadas, tanto para las generaciones presentes como futuras. Las investigaciones vinculadas a la mejora del conocimiento y evaluación de la interacción del agua superficial y subterránea, en el marco de la gestión conjunta de recursos en sistemas hídricos complejos, requiere de esfuerzos para profundizar en el conocimiento integral de los sistemas hidrológicos en su conjunto.

Comúnmente las dimensiones de las cuencas superficiales no se corresponde con las de los sistemas acuíferos subyacentes y por consiguiente, solo una porción de las cuencas sobre masas de un mismo sistema acuífero generan recarga. Cuando se modelan por separado los sistemas superficiales y subterráneos, el balance de recursos suele no coincidir, debido a un error común en la duplicidad de la contabilidad de los mismos. Cuando se evalúan los recursos hídricos de un sistema con interacción intensa de las aguas superficiales y subterráneas, el enfoque de evaluación con carácter de uso conjunto es el ideal para evitar la duplicidad de recursos simulados en un sistema complejo.

La presente tesis propone una metodología genérica para la integración de modelos de acuífero en sistemas de evaluación del uso conjunto, mediante la evaluación eficiente del intercambio de agua dado en las relaciones río-acuífero de un sistema con interacción intensiva de sus aguas superficiales y subterráneas. Para implementar esta metodología, se propone la adecuación y aplicación de herramientas y métodos particulares, considerando lo siguientes aspectos principales:

- i. Evitar la duplicidad de recursos, mediante la obtención conjunta de aportaciones superficiales y de infiltración en modelos hidrológicos superficiales tipo HBV, adecuados para lograr la infiltración selectiva mediante la manipulación de sus parámetros de descarga entre sus tanques conceptuales con los que separa las componentes de la escorrentía total, dividida para las aportaciones superficiales, sub-superficiales y subterráneas.
- ii. Proponer y validar el funcionamiento de una herramienta de evaluación del intercambio de flujo por relaciones río-acuífero,

- producida de manera natural en la interacción entre masas superficiales y subterráneas, mediante la evaluación eficiente de condiciones de contorno no lineales en términos de la metodología de Autovalores.
- iii. Proponer una herramienta que permita generar y evaluar campos de parámetros hidrogeológicos para su uso en un modelo de acuífero por Autovalores, acoplable a sistemas de gestión del uso conjunto de recursos hídricos, por estimación inversa de parámetros, lograda mediante la adecuación de la metodología de estimación de incertidumbre GLUE, con lo que se obtienen conjuntos de parámetros hidrogeológicos (que tienen asociado un valor de incertidumbre generalizada), para los cuales se logra reproducir en volumen, el intercambio de agua entre masas superficiales y subterráneas.
 - iv. Como resultado interesante, proponer y evaluar una metodología particular para analizar el impacto del cambio climático regionalizado sobre las masas subterráneas del acuífero del caso de estudio.

En esta tesis se han implementado un conjunto de herramientas auxiliares para la modelación y simulación conjunta de recursos hídricos en una cuenca compleja, como lo es el caso de estudio: Cuenca hidrológica del Río Duero, España.

El primero, concerniente a las adecuaciones realizadas sobre un modelo lluvia-escorrentía (tipo conceptual y semi-distribuido, modelo HBV, adecuado en la herramienta EVALHID), con el que se logra la separación de aportaciones e infiltración. Su aplicación se realizó para la totalidad de sistemas de explotación de la cuenca de estudio (78, 804km² en su porción Española), implementando un módulo de calibración automática como medio de apoyo para la obtención de los modelos hidrológicos calibrados, atendiendo a la optimización lineal del conjunto de funciones objetivo impuestas a los modelos para lograr la recarga selectiva a masas subterráneas del modelo de acuífero evaluado con independencia. El algoritmo de optimización utilizado en la calibración automática corresponde a una adecuación del SCE-UA, implementado en hojas de cálculo EXCEL.

Respecto a la evaluación del intercambio de flujo entre masas superficiales y subterráneas presente en relaciones río-acuífero (asociadas a la conexión de celdas de un modelo de acuífero con condiciones de contorno de tipo no lineal), se propone el uso de soluciones numéricas aproximadas (de tipo lineal). Para validar esta herramienta (adaptación de las soluciones numéricas en términos de Autovalores y su inclusión en un módulo de evaluación de acuíferos AQUIVAL 2.0), sus resultados son comparados con los módulos de evaluación tipo río o dren de un esquema similar (resuelto en un entorno MODFLOW, que se considera una buena herramienta de modelación de condiciones de contorno de tipo no lineal). Se observó que los resultados de la herramienta AQUIVAL 2.0 contribuyen a una mejora en la eficiencia

del tiempo de ejecución, referente a la evaluación de intercambio de flujo en relaciones río-acuífero, respecto de los resultados de MODFLOW. Además, utilizar como herramienta de modelación subterránea el módulo AQUIVAL 2.0, tiene la ventaja poder incluir directamente en modelos de evaluación del uso conjunto en un sistema de explotación. Estas soluciones son resueltas matricialmente mediante la técnica de solución matricial LU, integrada en un código programado en C++.

La herramienta generadora de campos aleatorios de parámetros hidrogeológicos para la evaluación del funcionamiento del modelo de acuífero por Autovalores del caso de estudio es propuesta como un medio de parametrización para un modelo subterráneo, asociando la incertidumbre generalizada que evalúa la metodología particular GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). Esta herramienta de parametrización aleatoria fue desarrollada en el entorno de MATLAB, asociando pesos de similitud a las mejores realizaciones logradas por GLUE, respecto de los valores observados usados como medio de comparación en la calibración del modelo de acuífero. Mediante el apoyo de esta herramienta se logró calibrar (tanto en volumen como en niveles piezométricos), una simulación del modelo de acuífero por Autovalores bajo condiciones de régimen influenciado por bombeos.

Respecto a la evaluación del impacto del cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas del acuífero del Duero, la metodología particular seguida se resume en lograr determinar las anomalías climáticas de Temperatura y Precipitación mensual y anual. Las anomalías provienen del análisis realizado sobre el conjunto de modelos climáticos globales y regionalizados para la cuenca de estudio, comparando los resultados del AR4 (ECHAM4.0 y ENSEMBLES) y del AR5 (RCP 4.5, 6.0 y 8.5). Una vez obtenidas las anomalías, estas son aplicadas a las series históricas de precipitación y temperatura, las cuales son parte de los datos de entrada de los modelos hidrológicos lluvia-escorrentía desarrollados para las subcuencas de los sistemas de explotación de la cuenca del Duero. Tras simular nuevamente los modelos superficiales, sin modificar sus parámetros ya calibrados, se obtienen unas nuevas series de aportación superficial e infiltración, que son separados por el propio modelo hidrológico HBV (de tipo conceptual y semi-distribuido). De los modelos hidrológicos se extraen las nuevas series de recarga (afectadas por cambio climático regionalizado) y se introducen en el modelo de simulación subterránea por Autovalores del acuífero del Duero, donde es posible evaluar el nuevo reparto de recarga asociado a cada masa subterránea, en función del tipo de escenario climático y ventana temporal evaluados.

Los resultados de implementar la metodología y sus herramientas y métodos particulares sobre un caso de estudio complejo, referente a la evaluación conjunta del funcionamiento hidrológico de un sistema de recursos hídricos con enfoque de uso conjunto, han sido satisfactorias, al lograr validar la metodología propuesta y las adecuaciones sobre herramientas y métodos pre-existentes. En particular, las soluciones numéricas aproximadas propuestas para la evaluación de relaciones río-

acuífero en modelos de acuífero por Autovalores acoplados a sistemas de uso conjunto, han demostrado ser una propuesta potente y mejora más eficiente en el proceso de evaluación del uso conjunto de recursos hídricos en sistemas sencillos y complejos, tal como queda demostrado en los casos de estudio del Acuífero Beniardá-Polop (modelo de acuífero sencillo) y el Acuífero del Duero (modelo de un sistema acuífero complejo).

Un análisis de impacto de cambio climático regionalizado sobre las masas subterráneas del sistema acuífero del Duero fue realizado, midiendo el impacto sobre el valor medio de la recarga para los escenarios climáticos del AR5 del IPCC. Para la evaluación del impacto del clima futuro, se determinaron de manera regionalizada las anomalías climáticas de Temperatura y Precipitación específicas de los sistemas de explotación de la Cuenca del Duero, de acuerdo a los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.0, de las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100 respectivamente. Los resultados de anomalía fueron aplicados a las series históricas y estas fueron ingresadas a los modelos lluvia-escorrentía ya calibrados para su simulación y posterior obtención de nuevos valores de escorrentía e infiltración. Con esto, fue posible obtener el impacto directo sobre la recarga media anual en las masas del modelo de acuífero del Duero.

Las principales conclusiones de esta tesis son, en principio, sobre la adecuada selección de las herramientas y métodos necesarios para llevar a cabo una evaluación y simulación conjunta de una cuenca hidrológica compleja, atendiendo a su modelación superficial y subterránea con enfoque de uso conjunto. Posteriormente, la implementación de herramientas complementarias para llevar a cabo la evaluación de la metodología de integración de modelos de acuífero en cuencas hidrológicas complejas y con marcada interacción de aguas superficiales y subterráneas, bajo el enfoque de evaluación del uso conjunto de recursos. Las herramientas complementarias son referentes a las adecuaciones de modelos hidrológicos superficiales y subterráneos, así como la evaluación del impacto de cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas de un modelo de acuífero.

RESUM

L'aigua és un element essencial per al desenvolupament de la vida i el seu correcte ús i gestió en els sistemes hidrològics naturals és fonamental per garantir el seu accés a l'ésser humà, sota les condicions adequades, tant per a les generacions presents com futures. Les investigacions vinculades a la millora del coneixement i avaluació de la interacció de l'aigua superficial i subterrània, en el marc de la gestió conjunta de recursos en sistemes hídrics complexos, requereix d'esforços per aprofundir en el coneixement integral dels sistemes hidrològics en el seu conjunt.

Comunament les dimensions de les conques superficials no es correspon amb les dels sistemes aquífers subjacents i per tant, només una porció de les conques sobre masses d'un mateix sistema aquífer generen recàrrega. Quan es modelen per separat els sistemes superficials i subterrànies, el balanç de recursos sol no coincidir, a causa d'un error comú en la duplicitat de la comptabilitat dels mateixos. Quan s'avaluen els recursos hídrics d'un sistema amb interacció intensa de les aigües superficials i subterrànies, l'enfocament d'avaluació amb caràcter d'ús conjunt és l'ideal per evitar la duplicitat de recursos simulats en un sistema complex.

La present tesi proposa una metodologia genèrica per a la integració de models d'aquífer en sistemes d'avaluació de l'ús conjunt, mitjançant l'avaluació eficient de l'intercanvi d'aigua donat en les relacions riu-aquífer d'un sistema amb interacció intensiva de les seves aigües superficials i subterrànies. Per implementar aquesta metodologia, es proposa l'adequació i aplicació d'eines i mètodes particulars, considerant el següents aspectes principals:

- i. Evitar la duplicitat de recursos, mitjançant la obtenció conjunta d'aportacions superficials i d'infiltració en models hidrològics superficials tipus HBV, adequats per aconseguir la infiltració selectiva mitjançant la manipulació dels seus paràmetres de descàrrega entre els seus tancs conceptuals amb què separa les components del vessament total, dividida per les aportacions superficials, sub-superficials i subterrànies.
- ii. Proposar i validar el funcionament d'una eina d'avaluació de l'intercanvi de flux per relacions riu-aquífer, produïda de manera

- natural en la interacció entre masses superficials i subterrànies, mitjançant l'avaluació eficient de condicions de contorn no lineals en termes de la metodologia de Autovalors .
- iii. Proposar una eina que permeti generar i avaluar camps de paràmetres hidrogeològics per al seu ús en un model d'aquífer per Autovalors, acoblable a sistemes de gestió de l'ús conjunt de recursos hídrics, per estimació inversa de paràmetres, aconseguida mitjançant l'adequació de la metodologia d'estimació d'incertesa GLUE, amb el que s'obtenen conjunts de paràmetres hidrogeològics (que tenen associat un valor d'incertesa generalitzada), per als quals s'aconsegueix reproduir en volum, l'intercanvi d'aigua entre masses superficials i subterrànies.
 - iv. Com a resultat interessant, proposar i avaluar una metodologia particular per analitzar l'impacte del canvi climàtic regionalitzat sobre les masses subterrànies de l'aquífer del cas d'estudi.

En aquesta tesi s'han implementat un conjunt d'eines auxiliars per a la modelació i simulació conjunta de recursos hídrics en una conca complexa, com ho és el cas d'estudi: Conca hidrològica del Riu Duero, Espanya.

El primer, que fa a les adequacions realitzades sobre un model pluja-escolament (tipus conceptual i semi-distribuït, model HBV, adequat a l'eina EVALHID), amb el qual s'aconsegueix la separació d'aportacions i infiltració. La seva aplicació es va realitzar per a la totalitat de sistemes d'explotació de la conca d'estudi (78, 804km² en la seva porció Espanyola), implementant un mòdul de calibratge automàtic com a mitjà de suport per a l'obtenció dels models hidrològics calibrats, atenent l'optimització lineal del conjunt de funcions objectiu imposades als models per aconseguir la recàrrega selectiva a masses subterrànies del model d'aquífer avaluat amb independència. L'algoritme d'optimització utilitzat en el calibratge automàtic correspon a una adequació del SCE-UA, implementat en fulls de càlcul EXCEL.

Respecte a l'avaluació de l'intercanvi de flux entre masses superficials i subterrànies present en relacions riu-aquífer (associades a la connexió de cel·les d'un model d'aquífer amb condicions de contorn de tipus no lineal), es proposa l'ús de solucions numèriques aproximades (de tipus lineal). Per valideu aquesta eina (adaptació de les solucions numèriques en termes de Autovalors i la seva inclusió en un mòdul d'avaluació d'aquífers AQUIVAL 2.0), els seus resultats són comparats amb els mòduls d'avaluació tipus riu o dren d'un esquema similar (resolt en un entorn MODFLOW, que es considera una bona eina de modelització de condicions de contorn de tipus no lineal). Es va observar que els resultats de l'eina AQUIVAL 2.0 contribueixen a una millora en l'eficiència del temps d'execució, referent a l'avaluació d'intercanvi de flux en relacions riu-aquífer, respecte dels resultats de MODFLOW. A més, utilitzar com a eina de modelació subterrània el mòdul AQUIVAL 2.0, té l'avantatge de poder incloure directament en models d'avaluació de l'ús

conjunt en un sistema d'explotació. Aquestes solucions són resoltes matricialment mitjançant la tècnica de solució matricial LU, integrada en un codi programat en C ++.

L'eina generadora de camps aleatoris de paràmetres hidrogeològics per a l'avaluació del funcionament del model d'aqüífer per Autovalors del cas d'estudi és proposada com un mitjà de parametrització per a un model subterrani, associant la incertesa generalitzada que avalua la metodologia particular GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). Aquesta eina de parametrització aleatòria va ser desenvolupada a l'entorn de MATLAB, associant pesos de similitud a les millors realitzacions assolides per GLUE, respecte dels valors observats usats com a mitjà de comparació en el calibratge del model d'aqüífer. Mitjançant el suport d'aquesta eina es va aconseguir calibrar (tant en volum com en nivells piezomètrics), una simulació del model d'aqüífer per Autovalors sota condicions de règim influenciat per bombaments.

Respecte a l'avaluació de l'impacte del canvi climàtic regionalitzat sobre masses subterrànies de l'aqüífer del Duero, la metodologia particular seguida es resumeix en aconseguir determinar les anomalies climàtiques de Temperatura i Precipitació mensual i anual. Les anomalies provenen de l'anàlisi realitzada sobre el conjunt de models climàtics globals i regionalitzats per a la conca d'estudi, comparant els resultats de l'AR4 (ECHAM4.0 i ensembles) i del AR5 (RCP 4.5, 6.0 i 8.5). Un cop obtingudes les anomalies, aquestes són aplicades a les sèries històriques de precipitació i temperatura, les quals són part de les dades d'entrada dels models hidrològics pluja-escorrentia desenvolupats per a les subconques dels sistemes d'explotació de la conca del Duero. Després simular novament els models superficials, sense modificar els seus paràmetres ja calibrats, s'obtenen unes noves sèries d'aportació superficial i infiltració, que són separats pel mateix model hidrològic HBV (de tipus conceptual i semi-distribuït). Dels models hidrològics s'extreuen les noves sèries de recàrrega (afectades per canvi climàtic regionalitzat) i s'introdueixen en el model de simulació subterrània per Autovalors de l'aqüífer del Duero, on és possible avaluar el nou repartiment de recàrrega associat a cada massa subterrània, en funció del tipus d'escenari climàtic i finestra temporal avaluats.

Els resultats d'implementar la metodologia i les seves eines i mètodes particulars sobre un cas d'estudi complex, referent a l'avaluació conjunta del funcionament hidrològic d'un sistema de recursos hídrics amb enfocament d'ús conjunt, han estat satisfactòries, en aconseguir validar la metodologia proposada i les adequacions sobre eines i mètodes preexistents. En particular, les solucions numèriques aproximades proposades per a l'avaluació de relacions riu-aqüífer en models d'aqüífer per Autovalors acoblats a sistemes d'ús conjunt, han demostrat ser una proposta potent i millora més eficient en el procés d'avaluació de l'ús conjunt de recursos hídrics en sistemes senzills i complexos, tal com queda demostrat en els casos d'estudi de l'Aqüífer Beniardà-Polop (model d'aqüífer senzill) i el Aqüífer del Duero (model d'un sistema aqüífer complex).

Una anàlisi d'impacte de canvi climàtic regionalitzat sobre les masses subterrànies del sistema aqüífer del Duero va ser realitzat, mesurant l'impacte sobre el valor mitjà de la recàrrega per als escenaris climàtics del AR5 de l'IPCC. Per a l'avaluació de l'impacte del clima futur, es van determinar de manera regionalitzada les anomalies climàtiques de Temperatura i Precipitació específiques dels sistemes d'explotació de la Conca del Duero, d'acord amb els escenaris RCP 4.5, 6.0 i 8.0, de les finestres temporals 2046 -2065 i 2081-2100 respectivament. Els resultats d'anomalia van ser aplicats a les sèries històriques i aquestes van ser ingressades als models pluja-escorrentia ja calibrats per a la seva simulació i posterior obtenció de nous valors de vessament i infiltració. Amb això, va ser possible obtenir el impacte directe sobre la recàrrega mitjana anual en les masses del model d'aqüífer del Duero.

Les principals conclusions d'aquesta tesi són, en principi, sobre l'adequada selecció de les eines i mètodes necessaris per dur a terme una avaluació i simulació conjunta d'una conca hidrològica complexa, atenent a la seva modelació superficial i subterrània amb enfocament d'ús conjunt. Posteriorment, la implementació d'eines complementàries per dur a terme l'avaluació de la metodologia d'integració de models d'aqüífer en conques hidrològiques complexes i amb marcada interacció d'aigües superficials i subterrànies, sota l'enfocament d'avaluació de l'ús conjunt de recursos. Les eines complementàries són referents a les adequacions de models hidrològics superficials i subterrànies, així com l'avaluació de l'impacte de canvi climàtic regionalitzat sobre masses subterrànies d'un model d'aqüífer.

SUMMARY

Water is an essential element for development of life and its proper use and management of natural hydrological systems is essential to ensure access to human, under the right conditions, for both present and future generations. The research related to improving knowledge and evaluation of the interaction of surface and groundwater under the joint management of water resources in complex systems requires efforts to deepen the comprehensive understanding of hydrological systems as a whole.

Commonly the size of surface basins does not correspond with the underlying aquifer systems and therefore only a portion of the basins above masses of a same aquifer system generate recharge. When the systems are separately modeled, the balance of resources often does not match, due to a common misconception in the duplication of accounting thereof. When the water resources of a system with strong interaction of surface water and groundwater are evaluated, the evaluation approach as a matter of joint use is ideal for simulated avoid duplication of resources in a complex system.

This thesis proposes a generic methodology for integrating aquifer models into conjunctive use evaluation systems, through the efficient evaluation of the interchange of water given in river-aquifer relations of a system with intensive interaction of surface water and groundwater. To implement this methodology, the adequacy and implementation of particular tools and methods are proposed, considering the following main aspects:

- i. Avoid duplication of resources through joint contributions and obtaining surface infiltration type HBV surface hydrological models suitable to achieve selective infiltration by manipulating parameters of discharge between conceptual tanks with separating the components of runoff total divided for surface and sub-surface groundwater contributions.
- ii. Propose and validate the operation of an assessment tool exchange relations river-flow aquifer, produced naturally in the interaction between surface and groundwater masses, through the efficient evaluation of nonlinear boundary conditions in terms of the methodology of Eigenvalues .

- iii. Propose a tool to generate and evaluate fields of hydrogeological parameters for use in a model aquifer Eigenvalues, coupled to systems management of all water use, reverse parameter estimation, achieved by adapting the estimation methodology GLUE uncertainty, which sets hydrogeological parameters (which have an associated generalized uncertainty), for which it is possible to reproduce by volume exchange between surface and underground water masses are obtained.
- iv. As an interesting result, propose and evaluate a particular methodology for analyzing the impact of climate change on groundwater masses regionalized aquifer case study.

In this work we have implemented a set of auxiliary tools for modeling and simulation of joint water resources in a complex basin, as is the case study: River watershed Duero, Spain.

First, regarding the adjustments made on a rain-runoff (conceptual and semi-distributed type, model HBV in EVALHID suitable tool), with the separation of input and infiltration model is achieved. His application was made for all operating systems Basin study (78, 804km² in the Spanish portion), implementing automatic calibration module support as a means for obtaining hydrological models calibrated, based on linear optimization the set of functions imposed on target models to achieve selective mass model to underground aquifer recharge independently evaluated. The optimization algorithm used in the automatic calibration corresponds to an adaptation of the SCE-UA, implemented in Excel spreadsheets.

Regarding the assessment of flow exchange between surface and groundwater masses present in relations river-aquifer (associated with the connection of cells in a model aquifer boundary conditions nonlinear type), using approximate numerical solutions proposed (linear type). To validate this tool (adjustment of numerical solutions in terms of eigenvalues and their inclusion in an evaluation module aquifer AQUIVAL 2.0), the results are compared with evaluation modules such river or drain of a similar scheme (resolved in an environment MODFLOW, which is considered a good tool for modeling boundary conditions nonlinear type). It was observed that the results of the tool 2.0 AQUIVAL contribute to improved runtime efficiency concerning the evaluation exchange relationships river flow aquifer, for MODFLOW results. Also, use of groundwater modeling as a tool AQUIVAL 2.0 module has the advantage to include directly in joint assessment models use a system of exploitation. These solutions are solved by matrix-matrix solution technique LU, part of a programmed in C++ code.

The tool to generate random fields of hydrogeological parameters for performance evaluation model aquifer eigenvalues of the case study is proposed as a means of parameterization to an underground model, involving the widespread uncertainty that assesses the particular methodology GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). This random parameterization tool was developed in the MATLAB environment, combining weights of similarity to the best achievements

attained by GLUE, regarding the observed values used as a means of comparison in the aquifer model calibration. By supporting this tool it was possible to calibrate (both in volume and in groundwater levels), a simulation model of aquifer under steady conditions Eigenvalues influenced by pumping.

Regarding the assessment of the impact of climate change on groundwater masses regionalized aquifer del Duero, the particular methodology is summarized in achieving determine climatic anomalies of monthly and annual temperature and precipitation. The anomalies come from the analysis performed on the set of global climate models and regionalized to the basin study comparing the results of the AR4 (ECHAM4.0 and ENSEMBLES) and AR5 (RCP 4.5, 6.0 and 8.5). Once obtained the anomalies, these are applied to the time series of precipitation and temperature, which are part of the input data of hydrological models rainfall-runoff developed for sub-basins of the operating systems of the Duero. After surface models simulate again, without changing its parameters and calibrated a new series of surface contributions and infiltration, which are separated by the hydrological model HBV own (conceptual and semi-distributed type) are obtained. Hydrological models of the new series of recharge (regionalized affected by climate change) are extracted and introduced into the groundwater model of the aquifer simulation Eigenvalues del Duero, where it is possible to evaluate the new distribution of groundwater recharge associated with each mass, Depending on the type of climate scenario and evaluated time window.

The results of implementing the methodology and particular tools and methods on a complex case study concerning the joint evaluation of the hydrological functioning of a system of water resources with a focus on joint use, have been successful, to achieve and validate the proposed methodology the adjustments on pre-existing tools and methods. In particular, numerical approximate solutions proposed for the evaluation of relations river-aquifer models aquifer Eigenvalues coupled systems used together, have proven a powerful proposal and improved more efficient in the process of evaluating the joint use of water resources in simple and complex systems, such as demonstrated in the case studies Aquifer Beniardá-Polop (single aquifer model) and Aquifer Duero (model of a complex aquifer system).

An analysis of the impact of climate change on groundwater masses regionalized aquifer system del Duero was conducted by measuring the impact on the average value of the recharge to the climate scenarios of the IPCC AR5. For evaluating the impact of future climate, they were determined regionalized climate anomalies way Temperature and Precipitation specific operating systems Duero Basin, according to the RCP 4.5, 6.0 and 8.0, scenarios of the time windows 2046 -2065 and 2081 to 2100 respectively. Anomaly results were applied to the time series and these were admitted to the rainfall-runoff models and calibrated for simulation and subsequent acquisition of new values of

runoff and infiltration. With this, it was possible to obtain the direct impact on average annual recharge to the aquifer model masses del Duero.

The main conclusions of this thesis are, in principle, on the proper selection of tools and methods needed to conduct a joint evaluation and simulation of complex watershed, according to their surface and groundwater modeling with a focus on joint use. Subsequently, the implementation of complementary tools to carry out the evaluation of the integration methodology models in complex aquifer watersheds and intensive interaction between surface water and groundwater under the assessment approach set of resources. Complementary tools are adaptations concerning surface and groundwater hydrologic models and assessing the impact of climate change on groundwater bodies regionalized model aquifer.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	IX
Resum	XIII
Summary	XVII
Índice General	XXI
Lista de Figuras	XXV
Lista de Tablas	XXXIII

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción	1
1.2. Motivación y alcance de la investigación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos particulares	4
1.4. Organización del documento	4

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Particularidades de los acuíferos dentro de la gestión conjunta de recursos hídricos	7
2.1.1. Restitución al régimen natural y régimen alterado	7
2.1.2. Ecuación diferencial de flujo subterráneo	9
2.1.3. Condiciones inicial y de contorno	12
2.1.4. Sistemas lineales y principio de superposición	13
2.1.5. Simulación completa y por superposición	16
2.2. Utilización conjunta y relaciones río-acuífero	17
2.2.1. Utilización conjunta del agua	17
2.2.2. Simulación de sistemas de uso conjunto	19
2.2.3. Relaciones río-acuífero en el uso conjunto	20
2.2.4. Evaluación de relaciones río-acuífero en modelos de gestión	22

2.3. Integración de los modelos lineales de simulación conjunta de flujo superficial y subterráneo en modelos de simulación de la gestión	22
2.3.1. Modelación de sistemas de recursos hídricos	22
2.3.2. Síntesis de modelos matemáticos de acuífero usados para el análisis de la gestión conjunta en sistemas de recursos hídricos	25
2.4. Avances en la evaluación de las relaciones río-acuífero en sistemas lineales de gestión conjunta de recursos hídricos	28
2.4.1. Modelo de acuífero por Autovalores	28
2.4.2. Modelo Pluricelular Englobado	30
2.4.3. Reducción de sistemas invariantes en el tiempo usados en la modelación hidrológica subterránea	33
2.5. Impacto del cambio climático sobre los sistemas de recursos hídricos	35
2.5.1. Introducción al cambio climático	35
2.5.2. El efecto invernadero y sus implicaciones sobre el sistema climático	37
2.5.3. Escenarios de emisiones para el estudio del cambio climático	39
2.5.4. Modelos climáticos de circulación global (MCG)	51
2.5.5. Modelos climáticos regionalizados (MCR)	53
2.5.6. Efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico	56
3. METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DE MODELOS DE ACUÍFERO EN SISTEMAS DE USO CONJUNTO	
3.1. Introducción	59
3.2. Integración de la metodología propuesta	62
3.3. Aportación a procesos de la metodología	68
3.3.1. Adecuación de la herramienta de estimación de aportaciones	69
3.3.2. Soluciones numéricas aproximadas desarrolladas para la evaluación eficiente de condiciones de contorno no lineales con el método de Autovalores	71
3.3.3. Uso de herramienta de aproximación de parámetros hidrogeológicos en modelo de acuífero por Autovalores	78
3.3.4. Adecuación de la metodología de evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas	81
3.4. Factores que han conducido al desarrollo metodológico propuesto	82
3.4.1. Papel de la metodología propuesta en la evaluación del uso conjunto en sistemas de explotación complejos	82
3.4.2. Factores asociados al desarrollo metodológico	84

4. EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO NO LINEALES EN ACUÍFEROS CON INTERACCIÓN SINTÉTICA Y REAL DE RELACIONES RÍO-ACUÍFERO Y MANANTIAL	
4.1. Modelos de acuífero sintéticos regulares	85
4.1.1. Características geométricas e hidrogeológicas	85
4.1.2. Análisis de eficiencia y tiempo de cálculo	88
4.1.3. Síntesis y discusión	91
4.2. Modelo de acuífero por Autovalores Beniardá-Polop	92
4.2.1. Introducción	92
4.2.2. Descripción del área de estudio	93
4.2.3. Interpretación del funcionamiento hidrológico subterráneo	94
4.2.4. Acuífero por Autovalores Beniardá-Polop	95
4.2.5. Síntesis y discusión	99
5. CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL DUERO	
5.1. Caracterización, análisis de datos y balance de recursos	101
5.1.1. Caracterización general de la cuenca del Duero	101
5.1.2. Resumen de análisis previos en la zona de estudio	111
5.1.3. Balance de recursos en el acuífero del Duero	134
5.2. Aplicación de la metodología a la cuenca hidrológica del Duero	137
5.2.1. Introducción	137
5.2.2. Propiedades del modelo simplificado por Autovalores	140
5.2.3. Calibración por simulación del acuífero bajo condiciones de régimen influenciado por bombeos	146
5.2.4. Simulación del acuífero calibrado bajo comportamiento a régimen natural	177
5.2.5. Simulación del acuífero en un modelo simplificado en Diferencias Finitas	178
5.2.6. Síntesis y discusión	180
6. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA Y SU INTEGRACIÓN EN UN SISTEMA DE USO CONJUNTO	
6.1. Análisis de la metodología de integración	183
6.2. Análisis de la implementación de la metodología en el modelo de acuífero del caso de estudio principal	184
6.3. Aplicabilidad y extrapolación de la propuesta metodológica	185
6.3.1. Limitantes del uso de la metodología ante disponibilidad y escasez de datos	190
6.3.2. Consideraciones sobre la incertidumbre asociada a la aplicabilidad de la propuesta metodológica	192

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	
7.1. Resumen	193
7.2. Aportaciones originales de la tesis	194
7.3. Conclusiones	195
7.3.1. Conclusiones particulares	195
7.3.2. Conclusiones generales	200
7.4. Líneas de investigación futura	202
(7) CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES	
7.5. Summary	203
7.6. Original contributions of the thesis	204
7.7. Conclusions	204
7.7.1. Particular conclusions	205
7.7.2. General conclusions	210
7.8. Future research lines	211
8. REFERENCIAS	213

ANEJOS

A1 ESTIMACIÓN CONJUNTA DE APORTACIONES	223
A2 APROXIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS USANDO LA METODOLOGÍA GLUE	245
A3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADO EN MASAS SUBTERRÁNEAS DEL DUERO	263

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Tipos de relaciones río acuífero. Superior: río ganador. Centro: río perdedor. Inferior: río efímero. Fuente: Tomada de Álvarez-Villa (2014) y adaptada de Sahuquillo (2010a).	21
Figura 2.2	Variación de temperatura media en la Tierra para los últimos 140 años. Fuente: IPCC4 (2006).	36
Figura 2.3	Distribución de la emisión de gases de efecto invernadero en distintas zonas del mundo, de acuerdo a Fonam (2005)	36
Figuras 2.4a y 2.4b	Concentraciones atmosféricas del CO ₂ en los últimos 1000 años y del período 1950-2000. Fuente: IPCC4 (2006).	38
Figura 2.5	Proceso del efecto invernadero en la Tierra: (a) natural y (b) artificial. Fuente: IPCC4 (2006).	39
Figura 2.6	Familias y ramas evolutivas propuestas para la creación de escenarios IE-EE. Fuente: IPCC4 (2006).	42
Figuras 2.7a y 2.7b	Proyecciones promedio del calentamiento global con modelos de circulación global atmósfera-océano. Fuente: IPCC4, 2006.	44
Figuras 2.8a y 2.8b	Proyecciones multi-modelo sobre las pautas de cambio en la precipitación mundial para la década 2090-2099. Fuente: IPCC4, 2006.	45
Figura 2.9	Proyección multi-modelo de cambios relativos a la escorrentía respecto del clima actual y el de finales del siglo XXI. Fuente: IPCC4, 2006.	45
Figuras 2.10a y 2.10b	Emisiones de CO ₂ y aumentos de temperatura en equilibrio para los abanicos de niveles de estabilización. Fuente: IPCC4, 2006.	46
Figuras 2.11a y 2.11b	Escenarios RCP de emisión de CO ₂ equivalente para el año 2100, en función del forzamiento radiativo (FR) y comparativa del CO ₂ equivalente de los escenarios del AR-4 y AR-5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	47
Figuras 2.12a y 2.12b	Cambios estimados de temperatura media global para distintos escenarios RCP de emisión de CO ₂ equivalente. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	48
Figura 2.13a	Cambio de temperatura media en superficie para escenarios RCP del AR-5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	49
Figura 2.13b	Cambio de precipitación media, para escenarios RCP del AR-5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	50
Figura 2.14	Cambios porcentuales en escorrentía y humedad del suelo para el escenario de emisiones de CO ₂ equivalente RCP-8.5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	50
Figuras 2.15a y 2.15b	Evolución de cambio en temperatura y precipitación para la región Europa/Mediterráneo, de acuerdo a los resultados del RCP-IPCC5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	55
Figura 2.16	Comparación de la predicción del cambio en la precipitación para distintos modelos regionales respecto del escenario RCP4.5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.	56
Figura 3.1	Relaciones naturales y acciones antrópicas que intervienen en una	61

	cuenca hidrológica. Fuente: Elaboración propia.	
Figura 3.2	Planteamiento para la evaluación de un sistema de recursos hídricos con enfoque de uso conjunto. Fuente: Adaptada de Solera (2010) y Elaboración propia.	63
Figura 3.3	Esquema genérico de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 3.4	Esquema genérico usado para la calibración y simulación conjunta de recursos hídricos en una cuenca compleja. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 3.5	Aportaciones realizadas a distintos procesos dentro del módulo general de simulación de la gestión y uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 3.6	Adecuación propuesta en el modelo de aportaciones HBV para la evaluación del recurso hídrico en términos del uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 3.7	Integración de soluciones numéricas aproximadas en modelos de acuífero de sistemas de uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 3.8	Evaluación de relación río-acuífero en celdas con conexión hidráulica perfecta e imperfecta del módulo EQUIVAL 2.0. . Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 3.9	Aproximación de parámetros hidrogeológicos de un acuífero, en base al procedimiento de la metodología GLUE. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 3.10	Evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas de un acuífero. Fuente: Elaboración propia.	81
Figuras 4.1a y 4.1b	Discretización de los acuíferos sintéticos por Autovalores.	86
Figura 4.2	Variación del caudal de descarga por celdas de acuífero con conexión a río/manantial. Fuente: Elaboración propia.	87
Figuras 4.3a y 4.3b	Comparativa de caudal de descarga por celdas tipo manantial para los modelos de 1 y 3 celdas en EQUIVAL 2.0 y PM-WIN.	90
Figura 4.4	Sistema de explotación de la Marina Baja (Alicante, España) y masas de agua subterránea de interés relacionadas. Fuente: Elaboración propia.	93
Figura 4.5	Zonas de aportaciones y demandas en el acuífero Beniardá-Polop. Fuente: Elaboración propia.	95
Figuras 4.6a y 4.6b	Comparativa de resultados de almacenamiento y caudal de salida por manantial en el acuífero por Autovalores de Beniardá-Polop.	97
Figura 5.1	Red hidrográfica de la Cuenca del Duero (España).Fuente: CHD (2014).	103
Figura 5.2	Principales sistemas acuíferos en la Cuenca Hidrográfica del Duero (España). Fuente: Elaboración propia.	104
Figura 5.3	Masas de agua subterránea comprendidas dentro de los distintos sistemas de explotación del Duero (España). Fuente: Elaboración propia.	106
Figura 5.4	Litología general de la cuenca del Duero. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 5.5	Cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del Duero. Fuente: Elaboración propia.	109
Figuras 5.6a y 5.6b	Demandas domésticas actuales en los sistemas de explotación del Duero, total y por origen. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).	113
Figuras 5.7a y 5.7b	Demandas agropecuarias actuales en los sistemas de explotación del Duero, total y por origen. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).	114
Figura 5.8	Demandas industriales actuales en los sistemas de explotación del Duero. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).	115

Tesis Doctoral		
Figuras 5.9a y 5.9b	Demanda total de agua en la cuenca del Duero por uso y sistema de explotación. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).	116
Figura 5.10	Distribución espacial de las extracciones en las MAS del Duero. Fuente: Plan Hidrológico del Duero (2010) del MAGRAMA	118
Figura 5.11	Evolución de las extracciones estimadas para el Acuífero Terciario del Duero. Fuente: Jiménez (2011).	119
Figura 5.12	Rangos de series temporales de piezómetros en la cuenca del Duero. Fuente: Elaboración propia.	120
Figuras 5.13a y 5.13b	Escenario original y alternativo de infiltración para el acuífero terciario del Duero. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 5.14	Series de recarga mensuales modificadas de SIMPA, asociadas a una hipótesis de recarga. Fuente: Simulación del Modelo SIMPA (2008).	126
Figuras 5.15a y 5.15b	Valores de recarga media anual para las MAS del Duero, según las hipótesis de recarga SIMPA reducida y uniforme. Fuente: Elaboración propia.	126
Figura 5.16	Ubicación de los tramos analizados 8 y 9 del cauce del Río Duero. Fuente: Plan hidrológico del Duero (2010).	129
Figuras 5.17a y 5.17b	Diferencial de aforos en el Tramo 8 del Río Duero (Toro-Villamarciel), para los meses de verano e invierno. Fuente: Jiménez (2011).	130
Figura 5.18.	Serie de caudal anual aportado/detraído en el Tramo 8 del Río Duero. Fuente: Jiménez (2011).	132
Figuras 5.19a y 5.19b	Diferencial de aforos en el Tramo 9 del Río Duero (Carrascal-Toro), para los meses de verano e invierno. Fuente: Jiménez (2011).	133
Figura 5.20	Serie de caudal anual aportado/detraído en el Tramo 9 del Río Duero. Fuente: Jiménez (2011).	133
Figuras 5.21a y 5.21b	Balance inicial del acuífero terciario del Duero y Reajuste de las componentes del balance en el acuífero. Fuente: Jiménez, 2011.	135
Figura 5.22	Balance del acuífero terciario del Duero para la situación actual (año 2009). Fuente: Jiménez, 2011.	136
Figura 5.23	Masas de agua subterránea modeladas, asociadas a los sistemas de explotación del Duero (España). Fuente: Elaboración propia.	138
Figura 5.24	Sub-cuencas dentro de los sistemas de explotación que realizan aportación subterránea a los acuíferos del Duero. Fuente: Elaboración propia.	139
Figuras 5.25a y 5.25b	Capa 1 del modelo de acuífero por Autovalores del Duero (España).	141
Figura 5.26	Asignación de celdas con conexión río-acuífero y de nivel de descarga constante en el modelo de flujo subterráneo del Duero. Fuente: Elaboración propia.	143
Figuras 5.27a y 5.27b	Ubicación de zonas de interés de las Capas 1 (somera) y 2 (profunda) del modelo de acuífero para la obtención de niveles piezométricos promedio.	145
Figuras 5.28.(1)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 1-5 en régimen influenciado).	148
Figuras 5.28.(2-4)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 1-5 en régimen influenciado)	149
Figuras 5.28.(5)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 1-5 en régimen influenciado)	150
Figuras 5.29.(6-10)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado).	150
Figuras 5.29.(11-13)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado).	151

	Tesis Doctoral
Figuras 5.29.(14-16)	Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado). 152
Figuras 5.30.(1-2)	Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 1-5 en régimen influenciado). 153
Figuras 5.30.(3-5)	Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 1-5 en régimen influenciado). 154
Figuras 5.31.(6-11)	Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado). 155
Figuras 5.31.(12-14)	Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado). 156
Figuras 5.31.(15-16)	Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado). 157
Figuras 5.32a y 5.32b	Caudales de descarga simulados y observados para las distintas hipótesis de simulación del modelo de acuífero. 158
Figuras 5.32c y 5.32d	Caudales de descarga simulados y observados para las distintas hipótesis de simulación del modelo de acuífero. 159
Figuras 5.33 (V3)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 161
Figuras 5.33 (V4-V5)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 162
Figuras 5.33 (V6-V7)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 163
Figuras 5.33 (V8-V9)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 164
Figuras 5.33 (V10-V11)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 165
Figuras 5.33 (V12-V13)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 166
Figuras 5.33 (V14-V15)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 167
Figuras 5.33 (V16-V17)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 168
Figuras 5.33 (V18-V19)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 169
Figuras 5.33 (V20)	Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados. 170
Figuras 5.34a y 5.34b	Comparativa de la variación del volumen almacenado medio en masas del acuífero para los períodos 1970-2005 y 1980-2005. 171
Figuras 5.35	Comparativa del descenso promedio anual en masas del acuífero para los períodos 1970-2005 y 1980-2005. 174
Figuras 5.36a y 5.36b	Comparativa del promedio del Coeficiente de Conductividad en las Capas 1 y 2, para los casos simulados del modelo de acuífero. 175
Figuras 5.37a y 5.37b	Comparativa del promedio del Coeficiente de Almacenamiento (S) en las Capas 1 y 2, para los casos simulados del modelo de acuífero. 176
Figura 5.38	Caudales de descarga del modelo de acuífero en régimen natural (caudales por celdas de nivel constante, por conexión con río y total). 177
Figura 5.39	Esquemas del modelo en Diferencias Finitas de PM-WIN ModFlow, capas 1 y 2. Fuente: Elaboración propia. 178
Figura 5.40	Niveles piezométricos en régimen estacionario para las Capas 1 y 2 del modelo PM-WIN ModFlow. 179
Figura 5.41	Condiciones simuladas en los distintos modelos de flujo subterráneo desarrollados para la evaluación del acuífero del Duero. Fuente: Elaboración propia. 181

Tesis Doctoral		
Figura 6.1	Niveles de conocimiento de un sistema de recursos hídricos sujeto a evaluación conjunta y sus herramientas de simulación asociadas. Fuente: Elaboración propia.	190
Figura A1.1	Sistemas de explotación analizados dentro de la CH-Duero. Fuente: Elaboración propia.	224
Figuras A1.2a y A1.2b	Series de precipitación anual (mm) para los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.	225
Figuras A1.3a y A1.3b	Año medio de las variables Pp, Tp y ETP para el Sistema de Explotación Arlanza (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.	226
Figuras A1.4a y A1.4b	Caudal aforado medio mensual (hm3/mes) en la salida de los sistemas de explotación Arlanza y Pisuerga. Fuente: CDH, 2010.	228
Figura A1.5	Esquema general del modelo HBV usado en la herramienta EVALHID. Fuente: Modificado del manual técnico de EVALHID V1.0.	229
Figura A1.6	Esquema del funcionamiento del modelo HBV a partir de un sistema de tanques. Fuente: Tomada del Manual Técnico de EVALHID V1.0.	230
Figura A1.7	Uso del suelo en los sistemas de explotación Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.	232
Figura A1.8	Litología en los sistemas de explotación Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.	233
Figura A1.9.	Estaciones de aforo usadas para la calibración de los sistemas Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.	234
Figura A1.10	Subzonas de aforo en sistemas Arlanza y Pisuerga. Fuente: CH-Duero, 2010.	237
Figuras A1.11a y A1.11b	Calibración de EA-28 en Sistema de Explotación Arlanza (CH-Duero, España).	239
Figuras A1.12a y A1.12b	Calibración de EA-31 en Sistema de Explotación Arlanza (CH-Duero, España).	241
Figuras A1.13a y A1.13b.	Calibración de EA-107 en Sistema de Explotación Pisuerga (CH-Duero, España)	242
Figuras A1.14a y A1.14b	Calibración de EA-133 en Sistema de Explotación Pisuerga (CH-Duero, España).	243
Figura A2.1	Esquema del funcionamiento de la metodología GLUE. Fuente: Elaboración propia.	248
Figura A2.2	Localización de los Sistemas de explotación de la Cuenca del Duero. Fuente: CHD, 2010.	249
Figura A2.3	Modelo de acuífero por Autovalores para la simulación del flujo subterráneo. Fuente: Elaboración propia.	250
Figura A2.4	Estructura del código para la evaluación de la metodología GLUE. Fuente: Adaptado de metodología GLUE; Elaboración propia.	253
Figuras A2.5a y A2.5b	Realizaciones “a priori” y “a posteriori” del modelo de flujo subterráneo para la descarga de caudal por celdas con conexión río-acuífero.	253
Figuras A2.6a,b	Funciones de distribución “a priori” y “a posteriori” para el parámetro de Conductividad (K) del modelo de flujo subterráneo.	255
Figuras A2.6c,d	Funciones de distribución “a priori” y “a posteriori” para el parámetro de Almacenamiento (S) del modelo de flujo subterráneo.	256
Figuras A2.7a,b	Campos de conductividad “a priori” y “a posteriori” para el modelo de flujo subterráneo del Acuífero del Duero.	257
Figuras A2.7c,d	Campos de almacenamiento “a priori” y “a posteriori” para el modelo de flujo subterráneo del Acuífero del Duero.	258
Figuras	Campo de conductividades calibrado para las Capas 1 y 2 del	260

A2.8a,b	modelo de acuífero del Duero.	
Figuras A2.9a,b	Campo de almacenamientos calibrado para las Capas 1 y 2 del modelo de acuífero del Duero.	261
Figura A3.1	Resultados de técnicas dinámicas para la obtención de modelos climáticos regionales HADCM3 y ECHAM4. Fuente: IPCC4, 2006.	264
Figura A3.2	Proceso de evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en escenarios de gestión de recursos hídricos. Fuente: Elaboración propia.	267
Figura A3.3	Comparativa de resultados de anomalías climáticas, para distintos escenarios climáticos y métodos de regionalización estadística. Fuente: Elaboración propia.	268
Figuras A3.4a, 3.4b, 3.4c, 3.4d y 3.4e	Cambio de temperatura máxima (media anual, en °C) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.	271
Figura A3.5a y 3.5b	Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.	272
Figuras A3.6a, 3.6b, 3.6c, 3.6d y 3.6e	Cambio de temperatura mínima (media anual, en °C) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.	273
Figura A3.7a y 3.7b.	Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.	274
Figuras A3.8a, 3.8b, 3.8c, 3.8d y 3.8e	Cambio en la precipitación media anual (en %) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.	275
Figura A3.9a y 3.9b	Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.	276
Figuras A3.10a, 3.10b, 3.10c, 3.10d y 3.10e	Cambio en las precipitaciones intensas (en %) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.	277
Figura A3.11a y 3.11b	Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos y para los periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.	278
Figuras A3.12a, 3.12b, 3.12c y 3.12d	Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	280
Figuras A3.13a, 3.13b, 3.13c y 3.13d	Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	281
Figuras A3.14a, 3.14b, 3.14c y 3.14d	Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	282
Figuras A3.15a, 3.15b, 3.15c y 3.15d	Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	283
Figuras A3.16a, 3.16b, 3.16c y 3.16d	Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	284
Figuras A3.17a, 3.17b, 3.17c y 3.17d	Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	285
Figuras A3.18a, 3.18b, 3.18c y 3.18d	Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	286
Figuras A3.19a, 3.19b, 3.19c y 3.19d	Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	287

Tesis Doctoral		
Figuras A3.20a, 3.20b, 3.20c y 3.20d	Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.	288
Figuras A3.21a y 3.21b	Serie de Temperatura media y Precipitación acumulada históricas en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.	289
Figuras A3.22a y 3.22b	Series de Temperatura media mensual y Precipitación promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.	290
Figura A3.23a	Serie de Temperatura promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.	291
Figuras A3.23b y A2.23c	Series de Temperatura promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.	292
Figura A3.24a	Comparativa de precipitación promedio en sistemas de explotación del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.	294
Figuras A3.24b y A3.24c	Comparativa de precipitación promedio en sistemas de explotación del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.	295
Figura A3.25a y 3.25b	Comparativa de Temperatura media mensual en la Cuenca del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.	297
Figura A3.26a y 3.26b	Comparativa de Precipitación mensual en la Cuenca del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.	298
Figura A3.27a y 3.27b	Comparativa de Aportaciones mensuales y anuales en subzona de calibración Castroviejo (Sistema Arlanza). Fuente: Elaboración propia.	299
Figura A3.28a y 3.28b	Comparativa de Aportaciones mensuales y anuales en subzona de calibración Embalse de Cervera (Sistema Pisuerga). Fuente: Elaboración propia.	300
Figura A3.29	Masas Subterráneas del Acuífero del Duero (Capas 1 y 2) donde se reparte la recarga media anual. Fuente: Elaboración propia.	302

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Promedio mundial proyectado del calentamiento en superficie y del aumento de nivel del mar para finales del Siglo XXI (Fuente: IPCC4, 2006).	43
Tabla 2.2	Cambio en temperatura y precipitación por periodo y distintos horizontes temporales en el escenario RCP8.5 (Fuente: RCP-IPCC5, 2014).	54
Tabla 4.1	Comparativa de tiempo de cálculo (milisegundos) en los modelos sintéticos.	88
Tabla 4.2	Caudal de descarga por celdas de acuífero en conexión con río/manantial de los modelos sintéticos y el error relativo de cálculo cometido con la aproximación propuesta.	89
Tabla 5.1	Distribución de la superficie de Comunidades Autonómicas, núcleos urbanos y población en la Cuenca hidrográfica del Duero (Fuente: CHD, 2014).	102
Tabla 5.2	Superficie de los sistemas de explotación en la cuenca hidrográfica del Duero (Fuente: CHD, 2010).	105
Tabla 5.3	Extracciones ($\text{hm}^3/\text{año}$) en las Unidades de Demanda Agraria de la CHD (Fuente: Jiménez, 2011).	117
Tabla 5.4	Evolución de las extracciones en la CH-Duero.	120
Tabla 5.5	Tendencia de los principales piezómetros en el acuífero del Duero para el Período 1972-1999, considerando distintas profundidades de medición (Fuente: CHD, 2010 y Jiménez, 2011).	121
Tabla 5.6	Zonas de comparación de niveles piezométricos medidos y simulados en el acuífero del Duero.	123
Tabla 5.7	Balance general del acuífero terciario del Duero, en hm^3 . (Fuente: Jiménez, 2011).	134
Tabla 5.8	Resumen de los promedios de recarga (hm^3) al acuífero terciario del Duero ($\text{hm}^3/\text{año}$). Fuente: Elaboración propia.	137
Tabla 5.9	Propiedades hidrogeológicas generales y supuesto de recarga para las masas subterráneas del Duero consideradas en el modelo de acuífero por Autovalores. Fuente: Elaboración propia.	142
Tabla 5.10	Conjuntos de zonas del acuífero usadas en la obtención del nivel piezométrico medio y variación del almacenamiento en las MAS asociadas.	146
Tabla 5.11	Niveles piezométricos observados en las zonas de referencia (msnm) y media de descenso anual.	147
Tabla 5.12	Nombres y propiedades de las masas subterráneas del acuífero del Duero.	160
Tabla 5.13	Estimación inicial de la variación (en %) del almacenamiento en las masas del acuífero del Duero.	170
Tabla 5.14	Pérdida de agua para distintos valores de descenso (hm^3).	172
Tabla 5.15	Valor relativo del volumen almacenado y cambio relativo en el	173

	almacenamiento (hm^3).	
Tabla 5.16	Balance hídrico general del acuífero del Duero en Régimen Natural (hm^3).	180
Tabla A1.1	Valores medios mensuales y anuales de las variables climáticas de los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuegra. Fuente: CHD, 2010.	226
Tabla A1.2	Caudal medio mensual (hm^3/mes) en Estaciones de Aforo EA-36 y EA-97 de los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuegra. Fuente: CHD, 2010.	227
Tabla A1.4	Parámetros del modelo lluvia-escorrentía HBV y del modelo acoplado de nieve en el módulo de evaluación de recursos hídricos EVALHID. Fuente: Manual Técnico de Evalhid V1.0.	231
Tabla A1.5.	Estaciones de Aforo en los Sistemas Arlanza y Pisuegra. Fuente: Proveniente de datos de la CHD, 2010.	235
Tabla A1.6	Subzonas de calibración en los Sistemas Arlanza y Pisuegra.	236
Tabla A1.7	Datos de calibración (1960-2007) en la subzona SbZ-3 del Sistema Arlanza.	239
Tabla A1.8	Datos de calibración (1980-2006) en la subzona SbZ-5 del Sistema Arlanza.	240
Tabla A1.9	Datos de calibración en la subzona SbZ-1 del Sistema Pisuegra.	241
Tabla A1.10	Datos de calibración en la subzona SbZ-5 del Sistema Pisuegra.	243
Tabla A1.11	Infiltración media anual (hm^3) calculada para las sub-cuencas de los Sistemas de Explotación del Duero.	244
Tabla A2.1	Valores medios de conductividad y almacenamiento para las masas subterráneas del acuífero del Duero, España. Fuentes: CHD, 2010; Jiménez, 2011; Elaboración propia.	251
Tabla A2.2	Rangos mínimo y máximo de conductividad ($K_{x,y}$) y almacenamiento ($S_{x,y}$) usados en los campos de parámetros aleatorios.	251
Tabla A2.3	Conjuntos de conductividades (K_i) para las 13 zonas del modelo de acuífero, con Nash ≈ 0.90 .	254
Tabla A2.4	Comparativa de los valores medios de los parámetros de Conductividad (K , en $\text{m}/\text{día}$) y Almacenamiento (S , adimensional) en zonas del acuífero del Duero.	259
Tabla A3.1	Cambio de Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) . Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.	272
Tabla A3.2	Cambio de Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.	274
Tabla A3.3	Cambio en la Precipitación media anual (en %). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.	276
Tabla A3.4	Variación anual en las Precipitaciones intensas (en %). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.	278
Tabla A3.5.	Variación media anual de Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$) para el escenario climático RCP 4.5.	280
Tabla A3.6	Variación media anual de Temperatura Mínima ($^{\circ}\text{C}$) para el escenario climático RCP 4.5.	281
Tabla A3.7	Variación media anual de la Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 4.5.	282
Tabla A3.8	Variación media anual de Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$) para el escenario climático RCP 6.0.	283
Tabla A3.9	Variación media anual de Temperatura Mínima ($^{\circ}\text{C}$) para el escenario climático RCP 6.0.	284
Tabla A3.10	Variación media anual de Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 6.0.	285

Tesis Doctoral		
Tabla A3.11	Variación media anual de Temperatura Máxima (°C) para el escenario climático RCP 8.5.	286
Tabla A3.12	Variación media anual de Temperatura Mínima (°C) para el escenario climático RCP 8.5.	287
Tabla A3.13	Variación media mensual de Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 8.5.	288
Tabla A3.14	Promedio de la Temperatura media (°C) en los Sistemas de Explotación del Duero. Proyecciones climáticas RCP 4.5, 6.0 y 8.5.	293
Tabla A3.15	Promedio de la Precipitación (mm) en los Sistemas de Explotación del Duero. Proyecciones climáticas RCP 4.5, 6.0 y 8.5.	296
Tabla A3.16	Valores medios de aportación (hm ³) para las proyecciones de los Escenarios Climáticos analizados en las subzonas de calibración de los Sistemas Arlanza y Pisuegra.	301
Tabla A3.17	Recarga (hm ³) en MAS del Duero para el periodo histórico y los Escenarios Climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.	303

"La ciencia se construye a partir de aproximaciones que gradualmente se acercan a la verdad".

Isaac Asimov.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El hombre, de manera natural, requiere del agua para su subsistencia y por ello, desde hace siglos ha desarrollado y perfeccionando técnicas y estrategias que le permiten asegurar la disponibilidad y abastecimiento del agua en su entorno para la ejecución y desarrollo de sus diversas actividades (Toledo, 1999). El aumento poblacional y sus consecuentes necesidades materiales, imponen progresivamente mayores exigencias y restricciones a los sistemas hídricos, ya que la intensificación de la interacción entre el manejo del agua en una cuenca y su entorno, se traduce en trastornos ambientales que modifican los sistemas hídricos, manifestándose principalmente como una degradación del estado ambiental natural y por ende un impacto en la productividad y eficiencia de los sistemas naturales y artificiales (Sahuquillo, 1991).

Actualmente, la inter-relación natural entre el ambiente y el ser humano ha requerido una intervención que permita el diseño de políticas de manejo y gestión del agua dentro de una cuenca hidrográfica. No obstante, el manejo óptimo y racional del agua dentro de un territorio debe atender tramas tan complejas y variadas como el entorno, la ideología social y la economía de una región en particular (Cotler, 2004). Por ello, en las últimas décadas, el uso y auxilio en herramientas de análisis de gestión y toma de decisiones han tomado gran relevancia, específicamente en sistemas de recursos hídricos complejos que realizan utilización conjunta del agua superficial y subterránea.

De acuerdo a Vargas (2003), la evaluación e implementación de propuestas alternas sobre un manejo hídrico conjunto (uso del agua superficial, subterránea, reutilización, entre otras), han permitido la adopción de sistemas integrales de gestión del agua, flexibilizando las demandas y acotándolas a la disponibilidad de las distintas fuentes de agua en una cuenca. En este sentido, al estudiar, entender y reproducir mediante modelos hidrológicos los diferentes fenómenos naturales y antrópicos presentes en una cuenca hidrográfica (y su interacción con el

agua superficial y subterránea), es posible prevenir y adelantarse a las posibles situaciones de escasez hídrica, promoviendo un uso racional de los recursos hídricos.

Por otro lado, según Álvarez-Villa (2014), los modelos matemáticos basados en la física de los fenómenos a estudiar, es una práctica habitual en la investigación hidrológica. Su éxito radica en la capacidad de representar la variabilidad espacio-temporal de los parámetros estudiados. Nuevas tecnologías de medición han hecho posible disponer de mayor cantidad de datos para su uso en el proceso de modelación, suponiendo una ventaja en el entendimiento de la dinámica de las variables de estado del sistema modelado.

Para el caso de la modelación de acuíferos, la representación de la variabilidad espacio-temporal de los fenómenos hidrogeológicos se logra mediante modelos de discretización fina, parámetros hidrodinámicos y acciones exteriores variables (espacial y temporalmente), requiriendo para su solución el uso de técnicas numéricas altamente costosas (en términos de recursos informáticos), con una ejecución computacional muy lenta, que imposibilita su uso en aplicaciones prácticas.

Dichas dificultades, según Álvarez-Villa (2014), se hacen más evidentes al momento de cuantificar el intercambio de agua entre masas de agua superficiales conectadas con acuíferos. Por tanto, la falta de velocidad en la ejecución de modelos numéricos hidrogeológicos es un problema crítico cuando éste debe ser ejecutado repetidamente o se cuenta con múltiples sub-modelos ejecutándose simultáneamente. Por tanto, de acuerdo a Álvarez-Villa (2014), la representación detallada de los acuíferos se convierte en una desventaja para la ejecución repetida de un modelo hidrogeológico dentro de algoritmos de optimización y simulación estocástica, para cuantificar la incertidumbre de las variables de estado o en el establecimiento de estrategias óptimas del uso conjunto.

Una forma efectiva de abordar este problema es la aplicación de técnicas matemáticas que permitan una reducción de los tamaños de los modelos numéricos de flujo, sacrificando precisión en los resultados obtenidos, pero logrando que la solución numérica sea simple y su ejecución computacional veloz.

Dado que los sistemas de recursos hídricos utilizan estrategias de uso conjunto para garantizar los suministros de agua y buen funcionamiento del sistema, estos pueden ser de gran tamaño y estar compuestos por una gran cantidad de acuíferos, embalses y estructuras de captación y explotación. Su inter-conexión forma una red de flujo que se opera/simula óptimamente, donde el modelo de flujo del acuífero es ejecutado hasta lograr la convergencia entre las variables de decisión, requiriendo que el tiempo de cómputo del modelo sea lo más corto posible (Sahuquillo, 2010b).

Por tanto, el objetivo es lograr introducir un modelo de flujo subterráneo reducido a un esquema matemático de mínima complejidad que se aproxime lo mejor posible al modelo original más una cota de error máximo permisible. Si se usa este modelo en las simulaciones, se

representa al sistema original de manera robusta pero con un costo computacional muy reducido. La implementación del procedimiento anterior ha sido desarrollada por el módulo SIMGES (2007), dentro del sistema de apoyo a la decisión AQUATOOL (Andreu et al., 1996), utilizando un proceso iterativo de optimización del flujo en redes, resolviendo el modelo de acuífero por el método de los Autovalores (Sahuquillo, 1983a), incluyendo explícitamente el cálculo de relaciones río-acuífero en la modelación del uso conjunto.

1.2. MOTIVACIÓN Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La motivación principal de la investigación realizada en esta tesis se centra en lograr una metodología integral de evaluación de la interacción de aguas superficiales y subterráneas, dentro de modelos de acuífero acoplables a sistemas de uso conjunto, los cuales simulen eficientemente el intercambio de flujo en las relaciones río-acuífero.

Para lograr la evaluación de un modelo de acuífero complejo, acoplado a sistemas de uso conjunto, se requiere seguir un proceso metodológico que alimente y a su vez permita calibrar las distintas variables del modelo, por lo que en la presente tesis se discute sobre:

- i. La estimación de aportaciones a un modelo de flujo subterráneo, mediante modelos de flujo superficial de tipo semi-distribuido.
- ii. La aproximación de parámetros hidrogeológicos, asociados a un valor de incertidumbre generalizada.
- iii. La integración de la evaluación eficiente de las relaciones río-acuífero (condiciones de contorno no lineales) con la técnica de Autovalores, aplicadas a modelos de flujo subterráneo
- iv. La evaluación del impacto del cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas de un modelo de acuífero por Autovalores integrado a un sistema de uso conjunto.

La metodología desarrollada en esta investigación es aplicada en la cuenca del Río Duero (España), mediante la modelación del sistema acuífero bajo el enfoque de uso conjunto. En el modelo de acuífero se han caracterizando de manera generalizada las propiedades hidrogeológicas del conjunto de masas subterráneas de la zona, dentro de un modelo de acuífero simplificado. En el modelo se simulan eficientemente las relaciones río-acuífero presentes en la zona y se evalúa el posible efecto del cambio climático regionalizado sobre los recursos actuales de la cuenca y su efecto sobre masas subterráneas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Como objetivo general de esta tesis se propone un proceso metodológico útil para la integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto, mediante la evaluación eficiente del intercambio de flujo entre masas superficiales y subterráneas dado en las relaciones río-acuífero, en términos de la técnica de Autovalores, mejorando la eficiencia computacional (reduciendo el tiempo de ejecución y requerimiento de memoria virtual) y logrando un módulo auxiliar de

evaluación de las aguas subterráneas de forma integrada en sistemas de uso conjunto.

Para lograr este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1.3.2. Objetivos particulares

- i. Revisar y sintetizar el estado del arte sobre las metodologías de evaluación de las relaciones río-acuífero en modelos de uso conjunto y los modelos matemáticos de acuífero usados en el análisis del uso conjunto.
- ii. Desarrollar una metodología que permita la evaluación conjunta de recursos hídricos de una cuenca compleja, la cual acople modelos superficiales y subterráneos, cuyos datos de entrada provengan de la aplicación de técnicas y metodologías complementarias.
- iii. Adecuar una herramienta de modelación para estimar las aportaciones subterráneas provenientes de modelos semi-distribuidos de flujo superficial.
- iv. Implementar una rutina matemática que evalúe las condiciones de contorno no lineales bajo conexión perfecta e imperfecta en celdas con conexión río-acuífero, siguiendo la metodología de Autovalores.
- v. Utilizar una herramienta de aproximación de campos de parámetros hidrogeológicos, asociando incertidumbre generalizada, que permita reducir el rango de variabilidad de los mismos, previa su introducción en el modelo de flujo subterráneo simplificado utilizado como caso de estudio.
- vi. Integrar y aplicar las distintas técnicas y herramientas de los objetivos previos para evaluar casos de estudio sintéticos, el uso conjunto de recursos hídricos en el acuífero Beniardá-Polop (Alicante, España) y en el acuífero de cuenca del Río Duero (España).
- vii. Evaluar impacto del cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas del acuífero del Duero y analizar sus implicaciones sobre la disponibilidad futura de recursos en la cuenca, en el contexto del uso conjunto.

1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento se estructura en 7 capítulos y 3 anejos. Los Capítulos 1 y 2 presentan la introducción y estado del arte de los temas relacionados con la gestión conjunta de recursos hídricos, la evaluación de las relaciones río-acuífero y el impacto del cambio climático sobre los sistemas de recursos hídricos.

El Capítulo 3 presenta la metodología de integración de modelos de acuífero en sistemas de conjunto, así como las técnicas y herramientas particulares usadas en la evaluación del uso conjunto en casos sintéticos y reales, las cuales son: (i) la estimación conjunta de aportaciones, (ii) las soluciones numéricas aproximadas para la evaluación de condiciones

de contorno no lineales por el método de Autovalores, (iii) la aproximación de parámetros hidrogeológicos en un modelo de acuífero simplificado y (iv) la evaluación del impacto del cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas del modelo de acuífero del caso de estudio principal.

En el Capítulo 4 se presentan casos de acuífero sencillos en los que es validado el funcionamiento eficiente de la herramienta de evaluación del intercambio de flujo en las relaciones río-acuífero, primero para dos modelos de acuífero sintéticos y posteriormente su aplicación en el acuífero Beniardá-Polop (Alicante, España).

El Capítulo 5 se centra en la presentación, por apartados, de la implementación de la metodología de integración en el caso de estudio principal: la cuenca del Duero (España), mediante (i) la caracterización, análisis de datos y balance de recursos; (ii) la aplicación de la metodología en el caso de estudio para la calibración del modelo de acuífero del Duero bajo condiciones en régimen influenciado por bombeos y su posterior simulación en régimen natural.

El Capítulo 6 presenta un análisis sobre la aplicación de la metodología de integración de acuíferos en sistemas de uso conjunto y describe las mejoras realizadas en el módulo de evaluación de acuíferos por Autovalores, presente en el sistema de apoyo a la toma de decisiones AQUATOOL.

El Capítulo 7 se divide en tres apartados, donde se presenta lo siguiente: (i) a manera de resumen se exponen las aportaciones originales de la tesis, producto de la investigación realizada; (ii) se presenta un apartado de conclusiones particulares y generales de la investigación realizada en la tesis y finalmente, (iii) se enlistan las líneas de investigación futuras propuestas para su posterior desarrollo.

Finalmente, el Anejo 1 presenta (a manera de ejemplo) la estimación conjunta de aportaciones superficiales y subterráneas, aplicadas a dos sistemas de explotación de la zona de estudio; el Anejo 2 describe la aplicación de la metodología GLUE para la aproximación de parámetros hidrogeológicos del modelo de acuífero por Autovalores del Duero; el Anejo 3 presenta la evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas del Duero.

"El orden y la simplificación son los primeros pasos hacia el dominio de un tema, el enemigo real es lo desconocido".

Thomas Mann.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. PARTICULARIDADES DE LOS ACUÍFEROS DENTRO DE LA GESTIÓN CONJUNTA DE RECURSOS HÍDRICOS

2.1.1. Restitución al régimen natural y régimen alterado

Conocer las aportaciones en régimen natural de un sistema de recursos hídricos permite desarrollar un análisis riguroso de la gestión del sistema evaluado. Sin embargo, Solera et al. (2010) mencionan que (i) las aportaciones registradas en los cauces de ríos no suelen corresponder con un régimen natural de descarga de una cuenca y (ii) que las alteraciones del régimen natural dadas por actuaciones o modificaciones antrópicas, quedan manifestadas en las propiedades estadísticas históricas de las series de aforos. De esta forma, para poder restituir los datos hidrológicos al régimen natural es necesario seguir la metodología más adecuada, según la disponibilidad de datos.

Es necesario contar con datos históricos de caudales en cauces de río (usualmente afectados por la acción humana a lo largo del tiempo), no siendo en ocasiones suficientes en cantidad y calidad, por lo que se hace necesario recurrir a modelos precipitación-aportación que tienen que ser calibrados con datos de caudal fiables. Una vez calibrado un modelo de este tipo, es posible extrapolar datos históricos de caudal a otras fechas y zonas donde se carece de información. Otra opción es tratar a los datos hidrológicos estadísticamente para ajustarles un modelo que permita generar series sintéticas de aportaciones, logrando series equiprobables de mayor longitud que la usualmente reducida serie histórica.

En el análisis de la gestión conjunta, es necesario el uso de series hidrológicas homogéneas de caudal en régimen natural, el cual puede ser alterado por distintas acciones (superficiales o subterráneas), tales

como (i) la detracción de caudal en ríos por tomas en presas, bordos, bombeos, etc.; (ii) vertidos de caudal a río, ya sea por excedente o retorno; (iii) almacenamiento y desembalse de agua en presas de regulación; (iv) aumento de pérdidas naturales por evaporación directa en embalses; (v) detracción o aportación de agua subterránea debido a bombeos, recarga artificial, aumento de recarga por infiltración desde embalses o excedentes de riego. De esta forma, la alteración del régimen natural de las aguas subterráneas aumenta la dificultad del proceso de restitución, debido al desconocimiento de la existencia de relaciones río-acuífero y, aun conociéndolas, su evaluación requiere de modelos de flujo subterráneo para poder cuantificarlas debidamente.

Por tanto, Solera et al. (2010) comentan que cualquier extracción de agua subterránea o recarga artificial sobre un acuífero implica un cambio en el régimen de descarga en zonas de conexión con ríos, lo cual se considera como una afección al régimen natural de descarga y condiciona la existencia de un régimen alterado de funcionamiento del acuífero. La información con que se cuenta para conocer el régimen natural con que funcionaba un acuífero suele ser muy precaria, siendo raro también conocer su volumen de recarga o extracción. Además, se desconocen los tramos de río que han sido afectados por el cambio en su condición de ríos ganadores o perdedores, según las condiciones de extracción y recarga generales del acuífero con el que se encuentren conectados. Las condiciones antes expuestas ocasionan que comúnmente se cometan errores en la restitución de aportaciones al régimen natural, siendo el error más habitual considerar la restitución solo en función de datos de flujo superficial, sin tomar en cuenta su interacción con las aguas subterráneas. Solera et al. (2010), consideran que el uso de modelos que describan de manera general el comportamiento de los acuíferos, es un valioso recurso para estimar las afecciones al régimen natural de una cuenca, cuando se ha hecho uso de los recursos de un acuífero.

Conceptualmente, la restitución al régimen natural es un proceso sencillo, que consiste en sumar y restar datos de caudales aportados o detraídos al caudal del río, matemáticamente descrito como:

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \pm S, \text{ donde:}$$

N: caudal en régimen natural para un período considerado

A: caudal aforado

T: caudal derivado o trasvasado por tomas aguas arriba

B: caudal detraído del río por bombeos en un acuífero conectado

V: retornos de aguas arriba

Q: caudal trasvasado de otras cuencas

R: caudal aportado por recarga adicional en acuíferos

E: caudal evaporado en embalses y masas de agua

S: caudal almacenado o liberado por embalses

Usualmente el utilizar la fórmula de restitución a régimen natural es inabordable, dada la ausencia de datos, por lo que se recurre a otros métodos de estimación que se basan en la información conocida, tales como: (i) datos de aforo en ríos, (ii) datos de caudales extraídos en ríos, (iii) datos de caudal extraído por bombeos y caudal aportado por recarga adicional en acuíferos, (iv) alteración del régimen natural en embalses, (v) retornos superficiales al río procedentes de usos aguas arriba, etc.

2.1.2. Ecuación diferencial de flujo subterráneo

El flujo de un fluido a través de medio poroso lo gobiernan leyes físicas, que pueden ser representadas como ecuaciones diferenciales. En dichas ecuaciones, las coordenadas espaciales y el tiempo se definen como variables independientes y la altura piezométrica en el dominio donde se aplican las ecuaciones es la variable dependiente. Mediante la Ley de Conservación de Masa (principio de continuidad) y la Ley de Darcy, es posible derivar la ecuación diferencial resultante de definir el flujo subterráneo. Para poder usar ambas leyes sin restricciones, se asume que el flujo se da en un medio totalmente saturado, la densidad del agua constante y que los ejes de anisotropía coinciden con los ejes principales de la dirección del flujo en el medio poroso. A continuación se resumen las ecuaciones de flujo de agua subterránea para acuíferos de tipo (i) confinado, (ii) semi-confinado y (iii) libre:

2.1.2.1. Acuífero Confinado

De acuerdo a Bear (1979), la ecuación de conservación de la masa es definida como:

$$-div(\rho \mathbf{q}) = \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} \quad [E 2.1]$$

donde ρ es la densidad del agua, \mathbf{q} el vector de flujo subterráneo por unidad de superficie, n la porosidad del medio y t el tiempo. El primer término de [E 2.1] puede escribirse como:

$$-div(\rho \mathbf{q}) = -\rho div \mathbf{q} - \mathbf{q} grad\rho$$

donde el gradiente de la densidad del agua es muy pequeño y despreciable, quedando:

$$-div(\rho \mathbf{q}) = -\rho div \mathbf{q}$$

El segundo término de [E 2.1] puede expresarse como:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \rho \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad [E 2.2]$$

Si se considera que la densidad del flujo y la porosidad del medio son funciones de la presión, es decir $\rho = \rho(p)$ y que $n = n(p)$, la expresión [E 2.2] puede escribirse en función de la presión como:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \left(\rho \frac{\partial n}{\partial p} + n \frac{\partial \rho}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t}$$

Además, Bear (1979), expuso que $\partial n/\partial p = \alpha(1 - n)$; $\partial \rho/\partial p = \rho\beta$ y $\partial p/\partial t = \gamma \partial h/\partial t$, en las cuales α es la compresibilidad del esqueleto sólido del acuífero, β la compresibilidad del agua, h la altura piezométrica y γ el peso específico del agua. Al reemplazar las expresiones anteriores y tomando en cuenta que $\gamma = \rho g$, siendo g la aceleración de la gravedad, se tiene que:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = g\rho^2[\alpha(1 - n) + \beta n] \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.3]$$

Si llamamos "Almacenamiento Específico" a una parte de [E 2.3], esta queda como sigue:

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \text{ con } S_s = g\rho[\alpha(1 - n) + \beta n]$$

Puesto que el vector \mathbf{q} de [E 2.1] se puede descomponer en sus tres coordenadas cartesianas (q_x, q_y, q_z), la ecuación diferencial del flujo subterráneo queda:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.4]$$

Mediante la Ley de Darcy se expresan las componentes del vector de flujo subterráneo como:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

En las expresiones anteriores, K_x, K_y, K_z representan las respectivas conductividades hidráulicas en las direcciones x, y, z del sistema coordenado. Si se rempazan en [E 2.4], se tiene que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.5]$$

La ecuación [E 2.5] se conoce como "Ecuación Diferencial de Flujo Saturado Transitorio", para un acuífero heterogéneo y anisótropo en coordenadas cartesianas orientadas sobre los ejes principales de anisotropía. Si en [E 2.5] se considera una entrada o salida de agua al acuífero desde el exterior, se le suma la expresión $Q(x, y, z)$, que representa el caudal por unidad de volumen que entra o sale del acuífero, quedando como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q(x, y, z) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.6]$$

La expresión [E 2.6] se denomina como fuente o sumidero y permite considerar la simulación de acciones externas sobre el acuífero (bombeos o recargas). Además, en acuíferos de tipo confinado, el término $\partial h/\partial z$ se anula al integrar en la dirección z , al considerar todo el espesor b del acuífero y tomando en cuenta las expresiones:

$$T_x = K_x b \quad T_y = K_y b \quad S = S_s b$$

Donde T_x y T_y son las componentes de transmisividad en las direcciones x, y respectivamente y S el coeficiente de almacenamiento, quedando la ecuación de flujo general como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.7]$$

Nuevamente, al considerar una acción exterior $Q(x, y)$ por unidad de superficie en un acuífero confinado, [E 2.7] quedará como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(x, y) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.8]$$

Además, si las acciones exteriores $Q(x, y)$ que actúan sobre el acuífero se agrupan como la suma de acciones distribuidas $Q_d(x, y)$ y acciones puntuales Q_i , el término $Q(x, y)$ de la expresión [E 2.8] puede tomar la siguiente forma:

$$Q(x, y) = Q_d(x, y) + \sum_i Q_i \delta(x - x_i, y - y_i)$$

Siendo $\delta(x, y)$ la función Delta de Dirac, que vale 1 para $x = x_i$ e $y = y_i$ y cero para los demás puntos.

2.1.2.2. Acuífero Semi-confinado

Dentro de este tipo de acuífero, la entrada de agua se da a través de una capa semi-confinante entre un acuífero confinado y un acuífero libre. La entrada de agua está en función del espesor b' de la capa semi-confinante, su conductividad hidráulica vertical K'_y y el diferencial de potencial hidráulico entre acuíferos. De acuerdo a Darcy, el flujo de agua por unidad de superficie q_n infiltrada a través de la capa semi-confinante es:

$$q_n = (h_0 - h) / \sigma' \quad [E 2.9]$$

Siendo $\sigma' = b' / K'_y$, h_0 el nivel piezométrico del acuífero superior, h el nivel piezométrico del acuífero inferior. De esta forma, sustituyendo [E 2.9] y las expresiones anteriores, la ecuación de flujo [E 2.4] quedará como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(x, y) + \frac{(h_0 - h)}{\sigma'} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.10]$$

De la misma manera que en los acuíferos confinados, las acciones externas $Q(x, y)$, pueden ser agrupadas como la suma de acciones distribuidas y puntuales sobre el acuífero, de acuerdo a la ecuación:

$$Q_d(x, y) = (h_0 - h) / \sigma'$$

2.1.2.3. *Acuífero Libre*

La ecuación que describe el flujo subterráneo en acuíferos de tipo libre se obtiene de igual forma que el confinado, salvo que en los acuíferos libres el espesor saturado es variable e igual a h (altura piezométrica), en lugar de b (espesor saturado) y por tanto, el concepto de Transmisividad no existe y el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz de los materiales que conforman el acuífero. Adicionalmente, al asumir la hipótesis de Dupuit-Forchheimer, que expone la nulidad de la componente vertical de flujo, la ecuación resultante a partir de [E 2.4] queda como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q(x, y) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.11]$$

La expresión [E 2.11] se conoce como "Ecuación de Boussinesq", que a diferencia de las ecuaciones para acuíferos confinados y semi-confinados, no es una ecuación lineal. En ella, S_y es el rendimiento específico.

2.1.3. **Condiciones inicial y de contorno**

Puesto que la ecuación diferencial de flujo en medio poroso para cualquiera de los tres casos expuestos en el apartado anterior [E 2.7, E 2.10 y E2.11], requieren asociarle condiciones iniciales y de contorno para ser resueltas, a continuación se definen estos conceptos. Una condición inicial representa los valores de altura piezométrica para un tiempo dado ($t = 0$) y es requerida cuando se evalúa un problema de tipo transitorio. Para dos dimensiones, se representa de la siguiente forma:

$$h(x, y, 0) = f(x, y) \quad \forall x, y \in \Omega \quad y \quad t = 0$$

En cambio, las condiciones de contorno informan sobre la interacción del sistema analizado y el medio exterior, siendo los tipos de condiciones de contorno los siguientes:

2.1.3.1. *Condición tipo Dirichlet*

También conocida como de primer tipo, referente a un borde con altura piezométrica prescrita. Esta condición de contorno es útil cuando se modela el contacto de un acuífero con un cuerpo de agua superficial. Sus formas matemáticas para régimen permanente y transitorio son:

$$\begin{aligned} h(x, y) &= f_1(x, y) \quad \forall x, y \in \Gamma_1 \quad y \quad t > 0 \\ h(x, y, t) &= f_1(x, y, t) \quad \forall x, y \in \Gamma_1 \quad y \quad t > 0 \end{aligned}$$

Donde f_1 es una función conocida y Γ_1 es el borde considerado con la condición de contorno.

2.1.3.2. Condición tipo Neumann

También llamada como de segundo tipo, referente a un borde con gradiente de altura piezométrica prescrito o de borde con flujo prescrito. Su forma matemática se define como:

$$q_n = f_2(x, y, t) \quad \forall x, y \in \Gamma_2 \quad y \quad t > 0$$

Donde q_n es la componente de flujo normal al borde Γ_2 considerado y f_2 una función conocida. Si se trata de un medio isótropo, q_n se puede obtener con la Ley de Darcy como:

$$q_n = -K(\partial h / \partial n)$$

Siendo n la dirección perpendicular al borde con flujo prescrito considerado.

2.1.3.3. Condición de tipo Cauchy

O también nombrada como de tercer tipo, referente a un borde con flujo dependiente de altura piezométrica o condición mixta (combinación de las condiciones Dirichlet y Neumann). Esta condición es útil cuando el acuífero modelado está en contacto con un cuerpo de agua pero limitado por una capa semi-permeable. Su forma general se escribe como:

$$q_n = f_3(x, y, t) \quad \forall x, y \in \Gamma_3 \quad y \quad t > 0$$

Siendo n la componente de flujo normal al borde Γ_3 considerado y f_3 una función conocida. El flujo q_n viene dado según la Ley de Darcy como:

$$q_n = (h_0 - h) / \sigma' \quad \text{siendo} \quad \sigma' = b' / K'$$

Donde b' y K' representan el espesor y conductividad hidráulica de la capa semi-permeable; $(h_0 - h)$ es la diferencia de alturas a un lado y otro del borde considerado, con h como la altura del acuífero y h_0 la altura de la masa de agua exterior (río u otro acuífero).

2.1.4. Sistemas lineales y principio de superposición

Un sistema es una colección de componentes interconectados donde existe una serie de acciones exteriores (excitaciones) y respuestas (efectos). Los sistemas se modelan con el objetivo de conocer su comportamiento ante una serie de excitaciones (Sahuquillo, 2010a). Usualmente, pocos sistemas naturales se consideran lineales y en la práctica son aproximados con modelos lineales, puesto que la teoría de sistemas lineales aporta soluciones sencillas, aplicables a campos de la física e ingeniería. Una forma de aplicar esta teoría a problemas prácticos es a través de la resolución del conjunto de ecuaciones que describan un comportamiento.

Ecuaciones de flujo subterráneo, flujo calórico o flujo eléctrico son consideradas iguales y lineales cuando sus ecuaciones diferenciales

correspondientes lo son y a su vez, cuando no se produzcan cambios que afecten las propiedades del sistema o sus límites. Específicamente la ecuación de flujo subterráneo, es lineal cuando se modelan acuíferos confinados o semi-confinados, sin embargo, muchos acuíferos de tipo libre pueden ser aproximados con ecuaciones lineales sin cometer un error significativo en sus cálculos, siempre y cuando la variación relativa del espesor saturado del acuífero sea pequeña.

Respecto al principio de superposición (aditividad lineal), Doodge (1973) lo define de la siguiente forma: Para una acción exterior X_i que produzca un efecto Y_i en un período de tiempo t , cuando $i = 1,2$, se tiene que:

$$X_1(t) \rightarrow Y_1(t) \quad X_2(t) \rightarrow Y_2(t) \quad [E 2.12]$$

El sistema anterior [E 2.12], de acuerdo a Doodge, será lineal si se cumple que:

$$X_1(t) + X_2(t) = Y_1(t) + Y_2(t)$$

Si se cumple que $X_1(t) = X_2(t)$, entonces $\lambda X_1(t) \rightarrow \lambda Y_1(t)$, con λ como una constante. Generalizando el sistema quedará de la siguiente forma:

$$\sum_i^n \lambda_i X_i(t) \rightarrow \sum_i^n \lambda_i Y_i(t) \quad [E 2.13]$$

De este principio se deduce que los efectos producidos por causas distintas no serán dependientes entre sí. La linealidad de este principio es de interés al momento de aplicar el principio de superposición, que de acuerdo a Sahuquillo (2010c), representa una gran ventaja para la modelación del uso conjunto, al separar del cálculo las distintas acciones sobre un acuífero, reduciendo el trabajo de modelación en la mayoría de los problemas de simulación del uso conjunto. Tanto el principio de linealidad como el de superposición son utilizados al aplicar la ecuación diferencial de flujo en acuíferos de comportamiento lineal (confinados y semi-confinados generalmente).

Por tanto, la ecuación diferencial en derivadas parciales descrita para el acuífero confinado [E 2.7] es tratada como una ecuación lineal, escrita de la siguiente forma:

$$L(h) + Q(x, y) = S(x, y) \frac{\partial h}{\partial t} \quad [E 2.14]$$

Donde $L(\cdot)$ representa un operador lineal que equivale a:

$$L(\cdot) = \frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \right)$$

La ecuación anterior tiene infinitas soluciones, pudiendo ser acotada en función de ciertas condiciones iniciales y de contorno del acuífero, así como de las acciones exteriores que le sean aplicadas. Cuando los términos T_x , T_y , S se consideran como invariantes en el tiempo dentro del dominio del acuífero modelado, en las situaciones A y B se tendrá que:

Acciones exteriores	$Q^A(x, y)$ y $Q^B(x, y)$
Condición inicial	$f^A(x, y)$ y $f^B(x, y)$
Nivel impuesto en Γ_1	$f_1^A(x, y)$ y $f_1^B(x, y)$
Flujo impuesto en Γ_2	$f_2^A(x, y)$ y $f_2^B(x, y)$
Condición mixta en Γ_3	$h_0^A(x, y)$ y $h_0^B(x, y)$

En cada situación se obtendrá una solución del tipo $h^A(x, y, t)$ y $h^B(x, y, t)$. Al tratarse de un sistema lineal, el valor obtenido de las soluciones $h^A(x, y, t) + h^B(x, y, t)$, satisface la ecuación diferencial lineal [E 2.14], siempre que la transmisividad y almacenamiento sean invariantes en el tiempo, es decir:

$$L(h^A + h^B) = L(h^A) + L(h^B) \quad \text{y} \quad \frac{\partial(h^A + h^B)}{\partial t} = \frac{\partial(h^A)}{\partial t} + \frac{\partial(h^B)}{\partial t}$$

Entonces, las condiciones anteriores serán:

Acciones exteriores	$Q^A(x, y) + Q^B(x, y)$
Condición inicial	$f^A(x, y) + f^B(x, y)$
Nivel impuesto en Γ_1	$f_1^A(x, y) + f_1^B(x, y)$
Flujo impuesto en Γ_2	$f_2^A(x, y) + f_2^B(x, y)$
Condición mixta en Γ_3	$h_0^A(x, y) + h_0^B(x, y)$

Aprovechando la linealidad de la ecuación de flujo, la solución de la misma se puede descomponer en la suma de las tres soluciones siguientes:

- i. Solución de régimen permanente $h_p(x, y)$, para condiciones de contorno dadas y acciones exteriores nulas.
- ii. Solución en régimen transitorio $w(x, y, t)$, para condiciones iniciales en que se sustrae la solución en régimen permanente $h(x, y, t) - h_p(x, y, t)$, condiciones de contorno y acciones exteriores nulos.
- iii. Soluciones en régimen transitorio $s_i(x, y, t)$, para condiciones iniciales y de contorno nulas en cada acción exterior, el valor de $s_i(x, y, t)$ también se conoce como función de influencia cuando la acción exterior o su integral en todo el dominio vale la unidad.

De esta forma, la solución del problema será la suma de las soluciones parciales antes expuestas, de la forma siguiente:

$$h(x, y, t) = h_p(x, y) + w(x, y, t) + \sum_i s_i(x, y, t) \quad \text{[E 2.15]}$$

Por tanto, de acuerdo a Sahuquillo (2010b), la ecuación [E 2.15] cumple con cualquier condición inicial y de contorno que se plante.

Respecto a la ecuación de flujo para acuífero semi-confinado, se le debe agregar un término que corresponda con el flujo dado en el acuitardo,

equivalente a una condición de contorno mixta. Entonces, la solución general y su descomposición serían:

- i. Solución en régimen permanente $h_p(x, y)$ con condiciones de contorno de altura prescrita $f_1(x, y)$, flujo prescrito $f_2(x, y)$ y mixta $f_3(x, y) = [h_p(x, y) - h_0(x, y)]/\sigma'$, considerando acciones exteriores nulas.
- ii. Solución en régimen transitorio con acciones exteriores nulas, condiciones de borde nulas (valor cero en bordes de altura prescrita, flujos prescritos y h_0 de la altura en el exterior de la capa semi-permeable de condición mixta). Condiciones iniciales $w(x, y, t)$ serán las iniciales del acuífero $h(x, y, 0)$, menos el valor de la solución en régimen permanente, $h_p(x, y)$.
- iii. Componentes s_i de las acciones exteriores son obtenidas como acciones exteriores, con condiciones iniciales y de contorno nulas.

Respecto al acuífero libre, la superposición es aplicada, conociendo que no es estrictamente correcto, dada la no linealidad de la ecuación, siendo aceptable la solución cuando las oscilaciones del nivel saturado son pequeñas, sustituyendo los términos $K_x h$ y $K_y h$ por T_x y T_y .

Finalmente, para poder aplicar la superposición de manera correcta, se debe distinguir la componente debida a un efecto producto de condiciones de contorno y la influencia de condiciones de iniciales sobre la variación de alturas y flujos en el acuífero.

2.1.5. Simulación completa y por superposición

Si se acepta el principio de superposición, el régimen actual de un acuífero y su relación con los ríos con que se encuentre conectado, se obtiene al agregar al régimen histórico los efectos de las acciones históricas y actuales, como la multiplicación de una función de influencia trasladada en el tiempo (Sahuquillo, 2010c) y los valores efectivos de las acciones consideradas. Estas expresiones representan una simulación por superposición.

Por otro lado, cuando el sistema modelado no es de tipo lineal, el principio de superposición no puede ser aplicado y cada alternativa a evaluar debe simularse considerando acciones exteriores naturales en cada intervalo de la serie temporal. Esta otra forma de simular un sistema de recursos hídricos se le denomina simulación de tipo completa.

Sahuquillo (1983a), comentan que comúnmente para series temporales largas no existe información suficientemente confiable, por lo que la simulación por superposición permite utilizar series hidrológicas de decenas de años en las que no es necesario conocer a detalle los valores de recarga, descarga y balances de agua en los acuíferos. De esta forma, se obtiene los efectos sobre el sistema para cada alternativa analizada, ya sea respecto al intercambio de caudal en la relación río-

acuífero, sobre los niveles de puntos o zonas del acuífero, así como de volúmenes en todo el acuífero o parte de él. Por tanto, si es aceptada la linealidad en un sistema, los principios de superposición y traslación pueden ser aplicados.

Por otro lado, Sahuquillo (2010b), comentan que si se requiere reproducir las condiciones reales de geometría, condiciones de contorno complejas o acuíferos de tipo heterogéneo, las técnicas de elementos o diferencias finitas son necesarias, utilizando funciones de influencia o matrices de respuesta (Tyson y Weber, 1964) para la simulación del comportamiento de acuíferos de parámetros distribuidos. Posteriormente se generalizó y sistematizó el método, presentándose con distintos nombres, tales como: funciones de influencia por Schwarz (1971, 1976), funciones tecnológicas algebraicas por Maddock (1972) y kernels descritos por Morel.Seytoux y Daly (1975).

2.2. UTILIZACIÓN CONJUNTA Y RELACIONES RÍO ACUÍFERO

2.2.1. Utilización conjunta del agua

Dada la necesidad primaria de abastecimiento y explotación de los recursos hídricos naturales, la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas es una propuesta integral para lograr un suministro eficiente y sustentable ante escenarios de carencia o conflicto de intereses en el uso del agua. Su carencia o abundancia está directamente relacionada con la calidad de vida de las sociedades modernas, repercutiendo en aspectos de salud y bienestar.

Actualmente, el incremento de población, la necesidad de suministro urbano, agrícola e industrial, los requerimientos medioambientales y ecosistémicos, así como la incertidumbre asociada a la variación climática y disponibilidad futura de recursos hídricos, se presentan como factores clave que inciden en una presión sobre los recursos hídricos de mayor facilidad de acceso. Dicha presión disminuye la disponibilidad de recursos hídricos convencionales (fuentes superficiales y subterráneas), alcanzando condiciones críticas en regiones con escasos recursos y grandes demandas, lo que conlleva un mayor gasto para el suministro de recursos no convencionales (tratamiento de aguas residuales, desaladoras, etc.). Aunado a esto, la irregularidad de la disponibilidad hídrica natural, producto de la variación no natural del clima mundial, la limitada o nula regulación de los sistemas de abastecimiento, etc., llevan a un sistema de recursos hídricos a presentar déficits en su suministro y por tanto, pérdidas e impactos de carácter económico, ambiental y social.

En las últimas décadas, se ha visto la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos (convencionales y no convencionales), representa una alternativa viable en problemas de gestión de recursos hídricos, ya sea en sistemas complejos o con escasez de recurso hídrico.

Hall y Dracup (1970) proponen el uso simultáneo de recursos superficiales y subterráneos para lograr un mejor aprovechamiento, considerando la inter-relación de recursos provenientes de distintas fuentes (variables en cantidad y calidad) y sus efectos sobre los ciclos hidrológico y ambiental, producto de una utilización conjunta en un sistema de explotación.

En el uso conjunto, Sahuquillo (2010a) expone que es necesario considerar a los acuíferos como parte de un sistema de recursos hídricos, pues las posibilidades de su explotación son muy ventajosas respecto a los recursos superficiales, siendo una componente de abastecimiento relativamente barata y oportuna de evaluar, desarrollar y poner en marcha. En cambio, en sistemas relativamente complejos, la ventaja del uso conjunto no suele ser evidente, pues pocas veces son comparadas distintas alternativas de uso conjunto, dada la necesidad del uso de modelos (sencillos o complejos) que acoplen, en el mismo análisis y evaluación, la componente subterránea. Por tanto, existe la necesidad de aplicar modelos adecuados que permitan la comparación de distintas alternativas de gestión, técnica y económicamente factibles y con carácter ambiental.

Sahuquillo (2010c) propone que las variables más importantes a considerar sobre un acuífero que debe ser modelado en un sistema de explotación conjunta son: (i) los flujos internos en regiones de interés, (ii) el intercambio de agua entre sitios de contacto de masas superficiales y subterráneas, (iii) los niveles piezométricos en zonas críticas, (iv) los calados y caudales en masas de agua superficial y (v) algunos indicadores de calidad del agua.

Actualmente, los esquemas de uso conjunto consideran a los acuíferos como un componente del sistema de recursos hídricos, aumentando la factibilidad de alternativas de gestión y suministro del agua, mejorando por tanto la eficiencia del sistema, al considerar al acuífero como un elemento que almacena y distribuye de manera lenta el agua hacia otros componentes del sistema y su extensión permite un suministro más extenso del recurso. Dado su carácter de sistema de almacenamiento, el acuífero permite almacenar agua que puede ser posteriormente aprovechada, teniendo una regulación natural y posibilita la recarga artificial en estaciones húmedas, para su posterior uso en estaciones de estiaje.

Rivera et al. (2002) comentan que la inclusión de fuentes subterráneas en un sistema de explotación, disminuye la vulnerabilidad del sistema de recursos hídricos, aumentando su eficiencia, confiabilidad en el suministro y resiliencia, disminuyendo además la relación costo-beneficio de la explotación. Por otro lado, Fowler (1981) comenta que al considerar las interacciones de aguas superficiales y subterráneas y su influencia sobre su aprovechamiento, la utilización conjunta resulta una necesidad en zonas con problemas de suministro de agua. Además, es posible detectar problemas en la interconexión de las fuentes (superficial y subterránea), tales como aumentos en eficiencia de riego, cambios en el uso del suelo y disminución de recarga a acuíferos, recarga artificial e

incremento de niveles piezométricos producto de filtración de embalses, zonas de riego o pérdidas en canales, reducción de la variabilidad de caudales en tramos de río alterados por infraestructura hidráulica, etc. De esta forma, Álvarez-Villa (2014) expone que el aprovechamiento independiente de aguas superficiales y subterráneas tendrá consecuencias funcionales y ambientales, tales como: (i) la alteración del flujo y calidad química de ríos y acuíferos, (ii), la transformación de la condición de río ganador/perdedor y (iii) el ocasionar o mejorar problemas de drenaje o salinización de suelos y aguas.

2.2.2. Simulación de sistemas de uso conjunto

Los modelos de gestión que tienen como objetivo simular el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas deben lograr reproducir caudales circulantes en ríos y conducciones, niveles freáticos y la transferencia de caudal entre ríos y acuíferos, dada una satisfacción de demanda de agua, cumpliendo además con restricciones físicas del sistema de explotación y las necesidades ecológicas y ambientales a las cuales se encuentre restringido el sistema (Sahuquillo, 2010a).

Para analizar estos modelos de uso conjunto y sus alternativas de gestión, puede tomarse en cuenta la precisión con que se analiza el comportamiento de los acuíferos presentes. Generalmente, a los acuíferos se les considera como elementos de pocos parámetros agregados donde se condensan sus propiedades hidrodinámicas. El más simple de los modelos de acuífero usado en gestión conjunta es un modelo de tipo unicelular (Buras, 1963), frecuentemente utilizado en métodos de optimización de la gestión (Haimes, 1977; Schwarz, 1980). También han sido usados métodos de optimización para acuíferos de parámetros distribuidos, revisados por Goerlick (1983) y Haro (2014). Para el caso en que los sistemas son complejos y existen distintas interacciones de flujo superficial y subterráneo, se hace necesario el recurrir a técnicas de simulación de la gestión, sin embargo, la optimización suele ser ampliamente utilizada como paso previo para la reducción del número de alternativas de gestión.

Actualmente existen problemas con el tiempo de cálculo requerido para la precisión dada por modelos de diferencias o elementos finitos, cuando es necesaria la simulación de un gran número de alternativas de gestión (considerando el uso conjunto, en específico de la operación de acuíferos).

Schwarz (1971) propuso el uso del concepto de función de influencia, también conocida como función tecnológica o de kernel por Maddock (1972) y Morel-Seytoux y Daly (1975), la cual permite descomponer las acciones exteriores sobre un acuífero y superponer los resultados en espacio y tiempo, siempre y cuando se trate de un acuífero con comportamiento lineal (en el sentido de la técnica de análisis del sistema de ecuaciones). No obstante, comúnmente el sistema que define los flujos y niveles en un acuífero no es lineal, dada la variación de espesor saturado que produce cambios en la transmisividad, coeficiente de

almacenamiento y/o las condiciones de contorno (p.e. las variaciones en las relaciones río-acuífero).

Para simulaciones de pocos años, se han utilizado modelos distribuidos y cuasi-agregados con un número reducido de celdas en las que se toma en cuenta la variación de transmisividad y almacenamiento dado un espesor saturado a través del tiempo (Birtles y Reeves, 1977). A pesar de las simplificaciones que realizan estos modelos, sus resultados son suficientes. No obstante, cuando el comportamiento no es de tipo lineal, las técnicas de superposición no pueden ser utilizadas, debido a las grandes oscilaciones piezométricas que se presentan en la realidad y los cambios en las condiciones de contorno.

Sahuquillo (198X) propuso la técnica de Autovalores para simular de manera lineal la respuesta de acciones externas sobre caudales y niveles piezométricos de un acuífero. De acuerdo a Sahuquillo (2010b), en la técnica se utilizan los mismos criterios de discretización espacial que en elementos y diferencias finitas, pero la resolución de las ecuaciones diferenciales de flujo se resuelven de forma continua en el tiempo, transformando explícitamente las acciones exteriores y condiciones iniciales en vectores de estado, a partir del cual se obtienen explícitamente los niveles piezométricos y vectores de flujo en puntos de interés o en interacciones de agua superficial y subterránea. Dicha técnica ha sido ampliada por Solera et al. (2010) para su uso en la evaluación de condiciones de contorno no nulas como las relaciones río-acuífero, dren y/o manantial con conexión perfecta e imperfecta en modelos lineales de simulación de la gestión, mediante la aplicación iterativa de correcciones de caudal, lo cual permiten igualar los niveles y caudales esperados en un modelo de tipo no lineal.

2.2.3. Relaciones río-acuífero en el uso conjunto

Este tipo de relación en el uso conjunto permite la utilización del agua superficial y subterránea como complemento al suministro de demanda de un sistema de explotación, ya sea en períodos de escasez o de estacionalidad de menor disponibilidad de agua. La particularidad de estas relaciones es aprovechar la conexión natural entre los sistemas superficial y subterráneo (influencias mutuas), que se dan de manera relativamente rápida. De esta forma, es importante conocer de manera suficientemente precisa la interacción entre los flujos entrantes y salientes dados en dicha relación. Para lograr mayor disponibilidad de recurso, en el uso conjunto de las relaciones río-acuífero se juega con la distribución temporal de bombeos, la variación del almacenamiento y los estados de la piezometría. Puesto que la influencia de bombeos puede verse reflejada rápidamente en las relaciones río-acuífero, es necesario conocer las propiedades hidrogeológicas del acuífero estudiado, para con ello, evaluar de mejor manera los intercambios de agua entre los propios modelos de simulación de flujo y de simulación de la gestión. De acuerdo a Sahuquillo (2010b), la influencia estará dada por: (i) la cercanía del pozo de extracción respecto a la zona donde se produce la conexión entre el río y acuífero modelados; (ii) de la geometría y

extensión del acuífero y (iii) de la relación entre la transmisividad de los materiales del acuífero y su coeficiente de almacenamiento (difusividad hidráulica).

Por otro lado, de acuerdo a Álvarez-Villa (2014), según la relación del río con el acuífero, este puede ser ganador, perdedor y/o efímero. Se denomina ganador cuando se aporta flujo desde el acuífero (Figura 2.1), habitual en zonas húmedas donde los niveles piezométricos están sobre el nivel del agua del río. Un río perdedor por el contrario, alimenta al acuífero con el que puede (o no) tener conexión hidráulica, típica de zonas áridas con recarga pequeña, donde los niveles piezométricos del acuífero están por debajo del nivel del lecho del río y la pérdida de caudal en el mismo está controlada por la altura del agua en el río, la conductividad hidráulica y espesor del lecho; el fenómeno es conocido como efecto ducha (Sahuquillo, 2010c). Finalmente, un río de tipo efímero es considerado aquel que su flujo se presenta únicamente ante la respuesta de un evento de lluvia intensa, típico de zonas áridas y semi-áridas, cuando los niveles del acuífero están por debajo del lecho del río, dada una baja recarga.

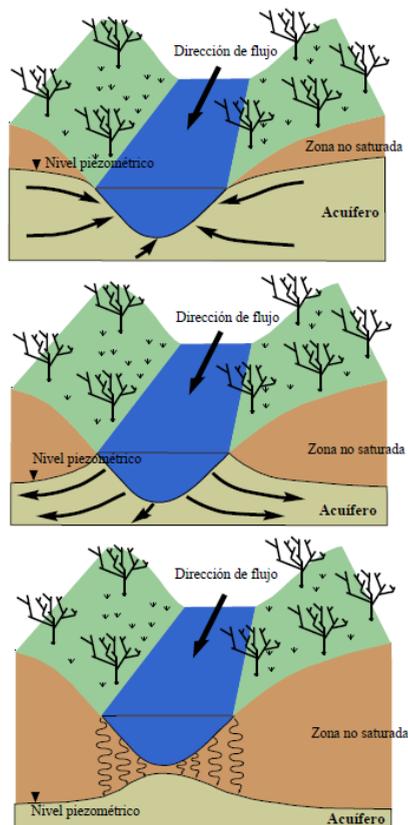


Figura 2.1. Tipos de relaciones río acuífero. Superior: río ganador. Centro: río perdedor. Inferior: río efímero. Fuente: Tomada de Álvarez-Villa (2014) y adaptada de Sahuquillo (2010a).

2.2.4. Evaluación de relaciones río-acuífero en modelos de gestión

Puesto que la evaluación del uso conjunto representa mayor exigencia de simulación y análisis, al considerar las aguas superficiales, acuíferos, relaciones e intercambios de agua entre ríos, embalses y acuíferos, se han desarrollado modelos de simulación y optimización de sistemas complejos de recursos hídricos. Distintos modelos han sido aplicados a cuencas españolas, europeas y de Latinoamérica para dar respuesta a problemas de gestión del agua, culminando con un sistema de soporte a la decisión conocido como AQUATOOL (REF), el cual es capaz de analizar sistemas complejos con múltiples componentes e interacciones entre ellos. Andreu et al. (1996) expone las características y potencial del sistema AQUATOOL, el cual engloba una interfaz gráfica para el diseño esquemático de sistemas, acceso a bases de datos, manejo de resultados y edición de informes. Además, el sistema contiene módulos de simulación y optimización, módulos de simulación de acuíferos y análisis de riesgos.

En particular, los acuíferos pueden ser simulados en función de la disponibilidad de datos o del detalle requerido (de tipo agregado o distribuido). En específico, los modelos de tipo distribuido utilizan la técnica de Autovalores para la simulación de acuíferos en sistemas con uso conjunto del agua, manteniendo la precisión de los métodos de diferencias finitas, pero resolviendo de manera más eficiente y en menor tiempo la ecuación diferencial de flujo.

Puesto que la solución dada por la técnica de Autovalores es en el supuesto de una ecuación de tipo lineal, los casos donde existe no-linealidad (p.e. el secado de un río, manantial o desconexión del río, producto de bombeos), tienen que ser tratados de manera especial, ya sea asumiendo que la variación de nivel piezométrico en el acuífero es despreciable y que las propiedades hidrodinámicas del mismo se mantienen en el tiempo, o bien, haciendo un ajuste a los valores de caudal de salida y niveles piezométricos, mediante la introducción de acciones exteriores ficticias que compensen el efecto de no-linealidad. Esta segunda asunción es la supuesta en la implementación de la mejora en la evaluación de condiciones de contorno no lineales en las relaciones río-acuífero evaluadas con la técnica de Autovalores en el módulo de AQUIVAL 2.0 (2011).

2.3. INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS LINEALES DE SIMULACIÓN CONJUNTA DE FLUJO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO EN MODELOS DE SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN

2.3.1. Modelación de sistemas de recursos hídricos

De acuerdo a Paredes et al. (2010), el análisis y planificación de sistemas de recursos hídricos ha sido tradicionalmente desarrollada mediante programación matemática, siendo los modelos de optimización y simulación de cuencas las herramientas más utilizadas. Yeh (1985) y Simonovic (2000), comentan que en el análisis de sistemas de recursos

hídricos, la simulación matemática es la principal herramienta utilizada, con la cual es posible obtener una aproximación del comportamiento del sistema al representar numéricamente aspectos y propiedades de interés.

En la modelación de sistemas de recursos hídricos, se puede diferenciar entre modelos de optimización y modelos de simulación de cuencas. La diferencia radica en que los primeros consideran al problema como el valor óptimo de la función objetivo (ya sea de maximización o minimización) para todo un período temporal de análisis, mientras que los de simulación optimizan para cada paso de tiempo analizado, correspondiente a una serie temporal. De esta forma, los modelos de optimización requieren modelos sencillos y simplificados y los de simulación permiten una mayor complejidad en su diseño, dado su carácter cercano a la descripción de la realidad del sistema.

En general, los modelos de simulación han sido mayormente utilizados dada su flexibilidad para representar situaciones reales de sistemas complejos de gestión. Recientemente se han desarrollado herramientas de modelación y análisis de la gestión en sistemas de recursos hídricos, pero en su gran mayoría se centran en el análisis del uso dado a las aguas superficiales, tratando a las aguas subterráneas de manera muy simplificada, dada su complejidad y dificultad de inclusión en modelos globales de simulación de la gestión.

Andreu et al. (2007), lanzaron el modelo SIMGES (2007), como una herramienta matemática que permite analizar distintos modelos matemáticos simulación del flujo subterráneo y su relación con las aguas superficiales. La solución del problema de simulación de la gestión en sistemas de recursos hídricos que consideren la gestión de aguas superficiales y subterráneas, está dada por el modelo SIMGES, el cual incluye la evaluación del uso conjunto en el entorno de AQUATOOL (Andreu et al. 1996).

Los modelos de análisis de gestión de sistemas de recursos hídricos utilizan herramientas de optimización matemática para la asignación mensual de recursos de una cuenca entre las distintas necesidades. Esta optimización trata de encontrar los valores de una variable x , tal que con este se haga máxima la función objetivo f , dada una serie de restricciones r , matemáticamente expresado como:

$$MAX f(x), \text{ dado } r(x) \geq t.$$

Múltiples técnicas para paliar este problema han sido elaboradas, entre ellas: programación lineal, no lineal, dinámica, separable, cuadrática, redes neuronales, redes de flujo, etc. El uso de una u otra técnica dependerá de las características específicas de la función objetivo planteada y sus restricciones. El problema al que se enfrentan este tipo de técnicas es que cada una de ellas considera solo un caso particular del problema general evaluado y al hacer simplificaciones del problema se representa con menor afinidad a la realidad, no obstante, a mayor simplificación del problema, más eficiente es el algoritmo con que se resuelve.

Además, Paredes et al. (2010) sostienen que para planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos, variables típicas de decisión son del tipo: sueltas de embalses, extracciones o recargas de acuíferos, suministro de demandas y cumplimiento de caudales mínimos en tramos de río. De esta forma, una función objetivo en realidad es una función de utilidad o penalización que asocia beneficios económicos, sociales y medioambientales de un sistema de recursos hídricos.

Por otro lado, es conocido que la técnica de programación lineal se aplica en modelación de sistemas de recursos hídricos, dada la eficiencia de los algoritmos disponibles en la obtención de óptimos globales. La particularidad de este tipo de programación es que tanto la función objetivo utilizada, como sus restricciones, son de tipo lineal. En este sentido, cuando se presentan no linealidades en los problemas o fenómenos naturales que desean evaluarse, la simplicidad de la programación lineal se vuelve poco eficiente.

Este tipo de no linealidades se presenta comúnmente en casos como: la evaporación de embalses, producción de energía eléctrica, funciones de costo/beneficio, relaciones río-acuífero, etc. De esta forma Paredes et al. (2010) comentan que se han desarrollado distintos métodos de resolución de no linealidades, siendo el más común la resolución iterativa del problema con aproximaciones sucesivas de los términos no lineales, o bien, mediante programación separada o cuadrática, según sea el tipo de función utilizada.

Por otro lado, Solera (2003) comenta que actualmente existen paquetes informáticos desarrollados específicamente para la modelación de sistemas de recursos hídricos, las cuales se clasifican de acuerdo a distintos criterios: (i) programas para optimizar o simular, (ii) redes de flujo u otro tipo de programación matemática, (iii) programas específicos o herramientas para modelación de sistemas genéricos, (iv) programas o sistemas de soporte a la toma de decisiones.

También se hace la distinción entre modelos basados y no basados en programación de redes de flujo, a los cuales el modelo AQUATOOL (Andreu et al., 1996) pertenece a la primera categoría, considerado como un sistema de soporte a la decisión para la modelación de sistemas de recursos hídricos, evaluando tanto la optimización como la simulación, la inclusión de aguas subterráneas, calidad de agua, evaluación del riesgo, etc. La evaluación de estos aspectos es realizada en distintos módulos acoplados a una única interfaz gráfica en la que se crean, editan y visualizan resultados de los módulos que lo componen.

Tres de los principales módulos son: (i) OPTIGES (Andreu, 1992), modificado por Haro (2014), el cual realiza la optimización de sistemas de recursos hídricos en largos períodos de tiempo, en sistemas con elementos como embalses, conducciones, demandas, retornos, acuíferos, etc.; (ii) SIMGES (Andreu et al., 2007), que simula los sistemas de recursos hídricos a partir de una red de flujo optimizada mes a mes, contando con una gran cantidad de elementos para la modelación de cuencas, así como la capacidad de integrar y modelar aguas subterráneas y la interacción agua superficial-agua subterránea con

distintos modelos matemáticos; (iii) AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1996), que es utilizado como un módulo de pre-proceso y simulación de acuíferos, que resuelve la ecuación de flujo subterráneo con el método de Autovalores, permitiendo la integración de modelos de acuífero de tipo distribuido en un modelo de simulación del uso conjunto.

La particularidad del tercer módulo es la posibilidad de resolver la ecuación de flujo subterráneo de manera directa y explícita (para cada paso de tiempo), mediante el método de Autovalores, proporcionando alturas piezométricas en puntos seleccionados, intercambios río-acuífero, descargas por manantiales, variaciones volumétricas del acuífero, etc. Este módulo ha sido modificado por Hernández et al. (2014), para considerar las no linealidades presentes en las relaciones río-acuífero, conexión (perfecta e imperfecta) y desconexión de acuíferos y manantiales al sistema superficial y condiciones de contorno no nulas, las cuales se exponen en apartados subsecuentes del trabajo de tesis.

2.3.2. Síntesis de modelos matemáticos de acuífero usados para el análisis de la gestión conjunta en sistemas de recursos hídricos

Invariablemente, los acuíferos se encuentran presentes en los sistemas de recursos hídricos, conectados con el sistema por acciones ejercidas sobre ellos (filtraciones de embalses y tramos de río, la conexión río-acuífero, infiltración natural o de retornos de riego, extracciones, recargas artificiales, etc.). En el módulo de simulación de la gestión (SIMGES), Paredes et al., (2010) hacen referencia a conceptos como “acciones elementales” y “parámetros de control”, los cuales controlan las relaciones entre el modelo superficial y subterráneo. Una acción elemental se define como la acción o conjunto de acciones ejercidas sobre un acuífero, variables o no a lo largo de la simulación del modelo (p.e., acuíferos de tipo agregado solo admiten un tipo de acción elemental: recarga/extracción; en cambio, acuíferos distribuidos admiten varias acciones elementales). En cambio, un parámetro de control representa cualquier situación o estado del acuífero en un momento dado, el cual es de interés conocer para lograr la calibración del modelo (p.e., el nivel en una celda, el volumen total de acuífero o la descarga por una relación río-acuífero). Los tipos conceptuales de acuífero usados en el módulo de SIMGES son:

2.3.2.1. Acuífero tipo Depósito

Se trata del caso más sencillo, en el cual un acuífero no se encuentra conectado hidráulicamente con el sistema superficial y en el cual solo interesa conocer su estado de llenado o vaciado, dado por el parámetro de “volumen almacenado”. Este tipo de acuífero requiere de un volumen inicial y la recarga natural aportada al mismo.

2.3.2.2. *Acuífero tipo Unicelular*

Este acuífero se encuentra conectado hidráulicamente con el sistema superficial, teniendo una descarga o desagüe controlado por un coeficiente α y requiriendo también un volumen inicial V_0 . Este tipo de acuífero es apropiado para modelar interacción con el sistema superficial cuando se utilizan series hidrológicas poco alteradas, cuando se tienen descargas de acuífero en régimen natural. El modelo solo admite la recarga neta R_n como acción elemental y (1) el volumen almacenado V_n y (2) caudal de relación con el río Q_{r_r} , como parámetros de control, permitiendo aportar o ceder agua del río al acuífero.

2.3.2.3. *Acuífero con Manantial.*

Se le llama así al tipo de conexión de acuífero que descarga por manantiales. Se utiliza básicamente un modelo de tipo unicelular, donde se anula la componente de volumen V es negativo, lo que representa un comportamiento no lineal. Cuando se cuenta con registros de caudales históricos, la no linealidad puede ser resuelta y calibrada con este modelo de acuífero, al obtener el valor del coeficiente de desagüe del acuífero α , de los caudales aforados en régimen natural Q_a y del volumen inicial del acuífero V_{n-1} .

Las acciones elementales de este tipo de acuífero son (1) recarga lejos del manantial, equivalente a la de un modelo unicelular, (2) recarga cerca del manantial, referente a una acción sobre el manantial en el mismo mes que condiciona los caudales de drenaje. Los parámetros de control son similares a los de un acuífero tipo unicelular.

2.3.2.4. *Acuífero de tipo Pluricelular.*

Es el tipo de acuífero relacionado con el sistema superficial de acuerdo a una ley en función de varios coeficientes de descarga asociados a una celda. Se debe utilizar un modelo pluricelular englobado para su simulación, donde es asignado un coeficiente de descarga para cada celda, coeficientes de reparto para cada celda del modelo de las acciones elementales que sean consideradas y un volumen inicial del acuífero para cada celda. De esta forma, el volumen total de afección sobre el manantial estará dado por la suma de los volúmenes de afección de cada celda evaluada. Cuando el valor de afección resulta negativo, físicamente se produce una detracción de caudal del río y si el río no dispone de caudal suficiente, se genera la denominada "detracción imposible", que representa una no linealidad en el modelo usado.

Existen dos formas de resolver este problema: (1) la suma de las detracciones imposibles para cada celda se acumulan y se descuentan del volumen almacenado de la celda en la que la interacción con el río es más rápida (celda de acuífero con α

mayor); se le suma al volumen almacenado del mes anterior en esa celda, el valor de la detracción imposible, con lo que puede secarse la conducción de río conectada con el acuífero, pero imposibilita el ceder agua cuando no existe en el río. (2) se reparte el volumen de la detracción imposible entre todas las celdas de acuífero. Ninguna de las opciones es exacta y debe realizarse un tratamiento más riguroso para evaluar este tipo de no linealidad en los modelos de acuífero.

2.3.2.5. *Acuífero de tipo Autovalores.*

Se trata de acuíferos en los que se construye un modelo de parámetros distribuidos en los que se ejercen acciones puntuales que condicionan la respuesta total del acuífero. De acuerdo a Sahuquillo y Andreu (1987), el uso de modelos lineales de acuífero resueltos con la técnica de Autovalores, resultan más eficientes para simular el comportamiento del flujo subterráneo de manera suficientemente aproximada. Se proporciona de manera explícita y directa respuestas específicas que son de interés del modelador, mediante el uso de parámetros de control y las acciones ejercidas sobre el acuífero (acciones elementales), se implementan como la combinación lineal de acciones unitarias.

De acuerdo a Paredes et al. (2010), es conveniente el disponer con un modelo calibrado en diferencias o elementos finitos o en su defecto, usar el módulo AQUIVAL 2.0 (2011) para calibrar un modelo de acuífero por Autovalores, del cual se obtienen matrices de Transmisividad (T) y Almacenamiento específico (SF), usadas para multiplicar el vector de estado del acuífero y obtener la respuesta de los parámetros de control usados. La técnica de Autovalores sigue los siguientes pasos para su implementación:

- i. Definir características hidrodinámicas del acuífero, geometría, condiciones de contorno e iniciales
- ii. Elaborar o importar una malla de diferencias o elementos finitos según sea la forma del acuífero y obtener un sistema de ecuaciones diferenciales con las alturas de los nodos de la malla como incógnitas
- iii. Obtener Autovalores y Autovectores correspondientes al cambio de base, que se puede realizar con una subrutina matemática o dentro del módulo AQUIVAL
- iv. Definir acciones elementales incidentes
- v. Definir parámetros de control de interés
- vi. Decidir el truncamiento del número de Autovalores a utilizar en la simulación (eficiencia en tiempo de cálculo)
- vii. Obtener matrices complementarias: matriz reducida de Autovectores $[A^R]$, matriz diagonal de Autovalores $[\alpha]$ y la matriz de modificación de estado $[\psi]$

2.3.2.6. *Acuífero rectangular homogéneo, conectado por uno de sus lados con un río totalmente penetrante*

Mediante este tipo de modelos es posible realizar una aproximación de aquellos acuíferos homogéneos y de geometría rectangular, que se consideran conectados con tramos de río. Se trata de una simplificación de la realidad que permite considerar los efectos diferidos en las relaciones río-acuífero de manera más precisa que con los modelos de tipo unicelular (Sahuquillo, 2010b). El modelo permite considerar distintas localizaciones de las acciones sobre el acuífero y su solución ha sido aplicada en la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas por Andreu y Segura (1983). Los datos necesarios para implementar este tipo de acuífero son:

- i. Parámetros hidrodinámicos y geometría
- ii. Niveles iniciales del acuífero, dados como valores aproximados del estado inicial del acuífero
- iii. Acciones elementales: de tipo puntual y distribuidas
- iv. Parámetros de control: volumen almacenado en el acuífero y la relación río-acuífero por el borde de interés x

2.3.2.7. *Acuífero rectangular homogéneo, conectado por dos de sus lados contiguos con ríos totalmente penetrantes*

Se trata de un modelo similar al caso anterior, pero considerando la existencia de un río totalmente penetrante en el eje y del modelo. Su solución analítica fue dada por Ramos et al. (1983) y adaptada por Sahuquillo (2010b) para su evaluación con la técnica de Autovalores. Se requieren los mismos datos que en el caso anterior, pero el vector de estado inicial se obtiene de forma distinta (desarrollado en Sahuquillo, 2010c). Los parámetros de control que requiere son los siguientes:

- i. Volumen almacenado en el acuífero
- ii. Salidas totales al río por los bordes x e y
- iii. Salidas al río por el borde x
- iv. Salidas al río por el borde y

2.4. AVANCES EN LA EVALUACIÓN DE LAS RELACIONES RÍO-ACUÍFERO EN SISTEMAS LINEALES DE GESTIÓN CONJUNTA DE RECURSOS HÍDRICOS

2.4.1. Modelo de acuífero por Autovalores

Dentro de la modelación numérica del flujo subterráneo, los modelos clásicos discretizan el tiempo para ejecutar la integración numérica de la ecuación de flujo. En cada intervalo temporal de integración se resuelve un conjunto de ecuaciones lineales, haciendo uso de un método iterativo eficiente (Álvarez-Villa, 2014). La ecuación de flujo subterráneo en

derivadas parciales con transmisividad invariante en el tiempo [E 2.16], para acuíferos con comportamiento lineal es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x * \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y * \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = S * \frac{\partial h}{\partial t}, \text{ donde:} \quad [E 2.16]$$

Donde $h = h(x, y, t)$, representa la altura piezométrica en un punto (x, y) para el instante t ; T_x y T_y , son las transmisividades horizontales en sentido (x, y) , correspondientes con las direcciones principales de conductividad hidráulica.

Las transmisividades vienen dadas por:

$$T_x(x, y) = K_x * b \text{ y } T_y(x, y) = K_y * b$$

Con $b = b(x, y)$, como el espesor saturado, invariante en el tiempo, para acuíferos de comportamiento lineal (confinados o libres con variaciones de nivel despreciable frente al espesor saturado); $S = S(x, y)$, que representa el coeficiente de almacenamiento y $Q = Q(x, y, t)$, es una recarga/extracción por unidad de área.

En el caso del método de Autovalores, este discretiza el dominio del acuífero y la integración temporal de forma analítica, con lo que se obtiene un sistema dinámico lineal estacionario, siempre y cuando las condiciones de contorno y los parámetros del acuífero no varíen en el tiempo. La expresión matricial de la ecuación [E 2.16], obtenida al sustituir las derivadas parciales por sus expresiones en diferencias finitas, de acuerdo a Sahuquillo (1983a) es:

$$[T] * \bar{H} + \bar{Q} = [SF] * \frac{d\bar{H}}{dt} \quad [E 2.17]$$

Donde \bar{H} , es el vector de alturas piezométricas, de dimensiones $n \times 1$, con n como el número de nodos o celdas activas en la discretización del acuífero; $[T]$, representa la matriz simétrica $(n \times n)$, con elementos que dependen de la transmisividad, la discretización espacial y las condiciones de contorno; $[SF]$, es la matriz diagonal $(n \times n)$, con elementos que dependen del coeficiente de almacenamiento y la discretización espacial y \bar{Q} , representa el vector de acciones exteriores (recarga/extracciones), de dimensiones $(n \times 1)$.

El método de Autovalores es una forma de resolver un sistema de ecuaciones en que se reparametriza la ecuación [E 2.17], haciendo un cambio de base o sistema de referencia, para obtener un nuevo sistema de ecuaciones orientado según las componentes principales. Esto permite resolver el sistema matricial con más eficiencia y rapidez. El Autoproblema a resolver es el siguiente:

$$[T] * [A] = [\alpha] * [SF] * [A] \quad [E 2.18]$$

Donde $[\alpha]$, representan la matriz diagonal de Autovalores, de dimensiones $(n \times n)$; $[A]$, es la matriz de los correspondientes Autovectores del problema de Autovalores, de igual dimensión $(n \times n)$.

Estableciendo un paso de tiempo $p = \Delta t$, se puede obtener explícitamente un vector de estado (\bar{L}_t) , para un intervalo de tiempo t conocido. Este vector tendrá tantas componentes como celdas activas existan en la discretización del acuífero, quedando como:

$$\bar{L}_t = [E]_p * \bar{L}_{t-1} + [X]_p * \bar{Q}_t \quad [E 2.19]$$

Donde $[E]_p$, representa una matriz diagonal de decaimiento de las condiciones iniciales en \bar{L}_{t-1} , con dimensiones $(n \times n)$. Su componente (i, i) está dada por la expresión $E_{p(i,i)} = e^{-\alpha \Delta t}$; $[X]_p = \left[\frac{[I] - [E]}{[\alpha]} \right] * [A]^T$, con $[I]$ como la matriz identidad y $[A]^T$ la traspuesta de la matriz $[A]$.

Al considerar el principio de superposición en sistemas lineales, las acciones sobre la discretización del acuífero pueden expresarse como combinación lineal de acciones unitarias, definiéndolas como una distribución espacial en el tiempo. Con la expresión $[Q]_t = [D_a] * \bar{B}_{t(m)}$, sustituida en la ecuación [E 2.19], se obtiene:

$$\bar{L}_t = [E]_p * \bar{L}_{t-1} + [X]_p = [E]_p * \bar{L}_{t-1} + [\psi]_p * \bar{B}_t \quad [E 2.20]$$

Donde \bar{B}_t , representa el vector de intensidad de las acciones aplicadas sobre el acuífero para el intervalo de tiempo t , con dimensiones $(n_a \times 1)$, siendo n_a el número de acciones elementales consideradas en el acuífero; $[D_a]$, es una matriz de dimensiones $(n \times n_a)$, con sus columnas compuestas por el reparto de las acciones elementales (en tanto por uno), aplicadas al acuífero; $[\psi]_p = [X]_p * [D_a]$, representa una matriz de afecciones a las acciones unitarias, de dimensiones $(n \times n_a)$.

Puesto que solo se requiere conocer las variables de interés (variables de control) para ciertos puntos o zonas del acuífero, Andreu y Sahuquillo (1987) proponen que no se requiere determinar la solución para todas las celdas discretizadas, sino únicamente aplicar el vector de estado [E 2.20], utilizando una matriz reducida $[A_R]$ de Autovectores, con tantas filas como variables se deseen conocer, de acuerdo a la fórmula $\bar{C}_t = [A_R] * \bar{T}$. Las simplificaciones y cambios de base complican el manejo de algunas condiciones de contorno, como es el caso de las de tipo no nulas (manantial, río, etc.) y son estas condiciones las que se trata de mejorar en el presente trabajo.

2.4.2. Modelo Pluricelular Englobado

La modelación de este tipo de acuífero se centra en resolver la ecuación de flujo subterráneo por el método de Autovalores, en general, se trata

de una simplificación de la metodología de Autovalores antes expuesta, aplicada para deducir el comportamiento de un acuífero mediante el uso de infinitos depósitos virtuales que tienen asociado un valor específico de coeficiente de descarga. Así mismo, las acciones exteriores ejercidas sobre el acuífero son repartidas entre los depósitos, según la distribución espacial e intensidad de las mismas, por lo que se le agrega un coeficiente de reparto dependiente de cada acción exterior concreta y de los parámetros hidrodinámicos del sistema modelado.

Este tipo de acuífero se desarrolló inicialmente para acuíferos rectangulares homogéneos, conectados total o parcialmente con un río en uno de sus lados (Sahuquillo, 1983a) y posteriormente para acuíferos heterogéneos con discretización espacial por diferencias o elementos finitos (Sahuquillo, 1983b). Los conceptos fundamentales y la formulación del modelo pluricelular englobado son descritos a detalle por Sahuquillo (2010b) y Pulido-Velázquez et al. (2005). A continuación se presenta un resumen de la formulación usada en los modelos pluricelulares de tipo englobado.

La solución para la ecuación diferencial de flujo subterráneo, dadas unas condiciones iniciales y de contorno puede descomponerse como la suma de la solución del estado estacionario h_p y la solución del estado transitorio w , tal como se mostró en apartados anteriores. Si representamos la variación de las componentes w de las alturas piezométricas del acuífero ante una acción total $Q(x, y)$, tendremos que:

$$w(x, y, t) = \sum_{i=0}^{\infty} l_i(t) A_i(x, y), \text{ donde:} \quad [E 2.21]$$

$$l_i(t) = \frac{(1-e^{-\alpha_i t})}{\alpha_i} \int_{\Omega} Q(x, y) A_i(x, y) d\Omega \quad [E 2.22]$$

Siendo A_i y α_i las autofunciones y autovalores del problema regular de Sturm-Liouville y Ω el dominio del acuífero modelado. Los valores de l_i representan las componentes del vector de estado del acuífero, con componentes infinitas, expresando las alturas piezométricas en función de la ecuación de $w(x, y, t)$. A partir de las expresiones [E 2.21] y [E 2.22] Sahuquillo (1983a) desarrolla formulaciones explícitas para calcular el efecto de acciones exteriores en el acuífero sobre el caudal de un río.

Sahuquillo (2010c) propone una solución analítica general para el problema de detracción o aumento de caudal en un río [E 2.23], como respuesta a una acción externa (bombeo o recarga), dada en un acuífero conectado a río. La relación obtenida es:

$$\frac{Q_r}{Q} = \sum_{i=0}^{\infty} b_i (1 - e^{-\alpha_i t}) \quad [E 2.23]$$

Siendo Q la acción integrada de caudal en todo el acuífero, Q_r el caudal de salida/entrada por el río, con:

$$b_i = \left[\int_{\Omega} Q(x, y) A_i(x, y) d\Omega / Q \right] F_i \quad [E 2.24]$$

$$y \quad F_i = \int_{\Omega} S(x, y) A_i(x, y) d\Omega \quad [E 2.25]$$

La formulación es similar a la de un modelo de tipo unicelular, pero para cada celda del modelo pluricelular englobado se cuenta con un valor de

α_i , a la que se le aplica una recarga $b_i Q$, en lugar de solo Q . De esta forma, cada acción externa Q puede descomponerse y distribuirse proporcionalmente con los valores de b_i (según su intensidad distribuida, usando E 2.24 y E 2.25), los cuales dependerán de cada acción exterior y la solución a un problema regular de Sturm-Liouville. Ahora bien, si consideramos que la salida o drenaje $D_i(t)$ por cada celda de este tipo de acuíferos viene dada por: $D_i(t) = \alpha_i V_i(t)$, entonces el intercambio total de agua en la relación río-acuífero estará dada como:

$$D(t) = \int_{i=0}^{\infty} D_i(t) = \int_{i=0}^{\infty} \alpha_i V_i(t) \quad [E 2.26]$$

El nombre de este tipo de acuífero viene dado por el uso de celdas virtuales o ficticias, que conceptualmente se encuentran englobadas o embebidas dentro de la solución analítica obtenida en la ecuación que relaciona el caudal de salida/entrada por una conexión río-acuífero (Q_r/Q). Los términos de dicha ecuación [E 2.27] pueden limitarse (en términos prácticos), mediante el uso de una serie de los primeros p términos de la ecuación, asociados a los Autovalores α_i más pequeños. Esto es, ya que los Autovalores son reales y positivos, sus términos decrecen con el tiempo, llegando a ser despreciables después de un cierto número, por lo que se sugiere desechar todos los α_i para los que $i \geq p$.

Por otro lado, el número de términos de p se puede determinar en función del error de estimación de la relación Q_r/Q , definiéndose como la diferencia entre la solución exacta y la aproximada, obtenida con las ecuaciones respectivas, siendo su fórmula la siguiente:

$$err(p) = \left(\frac{Q_r}{Q}\right) - \left(\frac{Q_r}{Q}\right)_{\alpha} = \left(1 - \sum_{i=0}^p b_i\right)e^{-\alpha_i t} - \sum_{i=p+1}^{\infty} b_i e^{-\alpha_i t} \quad [E 2.27]$$

Cuando se fija el error admisible que se puede cometer en el cálculo de la relación Q_r/Q , la variable p se puede obtener mediante iteración (Pulido et al., 2005). De esta forma, las acciones exteriores sobre el acuífero son repartidas entre todos los depósitos o celdas ficticias, según la distribución espacial e intensidad con que actúen sobre el acuífero, utilizando por lo general pocas celdas virtuales (no más de 5 en aquellos casos en que se requiere determinar de forma precisa la influencia de acciones sobre el acuífero, en intervalos temporales mensuales).

Además, Pulido-Velázquez et al. (2005) exponen soluciones analíticas para distintas acciones sobre un acuífero y casos de conexión río-acuífero, mediante la aplicación de la metodología de los pluricelulares englobados, entre ellas:

- i. Solución analítica de la detracción producida por acciones aplicadas sobre un acuífero rectangular homogéneo con tres bordes impermeables y uno de nivel constante.
- ii. Solución para conexión perfecta con masa de agua superficial y acción puntual.
- iii. Solución para conexión perfecta con masa de agua superficial y bombeo distribuido.

- iv. Solución para conexión imperfecta con masa de agua superficial y bombeo puntual.
- v. Solución para una masa de agua superficial parcialmente conectada y bombeo distribuido.

Finalmente, en Sahuquillo. (2010c) se exponen distintos ejemplos de aplicación de las metodologías expuestas por Pulido-Velázquez et al. (2005), obteniendo las soluciones analíticas para varios casos comunes de conexión río-acuífero (perfecta e imperfecta) y la evaluación de acciones exteriores sobre el acuífero.

2.4.3. Reducción de sistemas invariantes en el tiempo usados en la modelación hidrológica subterránea

Actualmente se han desarrollado distintas metodologías de reducción de las formulaciones usadas para resolver las ecuaciones de flujo subterráneo (ya sea de forma analítica o numérica), las cuales se exponen brevemente a continuación.

2.4.3.1. Reducción modal

Como se ha expuesto previamente, el método de los Autovalores, propuesta por Sahuquillo (1983a), resuelve de manera práctica los inconvenientes del uso de funciones de influencia, mediante una descomposición espectral y solucionando semi-analíticamente la ecuación en derivadas parciales de flujo subterráneo. Las ecuaciones de estado que así se obtienen, están explícitamente en función del tiempo, como expresiones en términos de series de Fourier. De esta forma, el método de Autovalores permite el desarrollo de soluciones analíticas y numéricas para distintas geometrías, distribuciones espaciales de los parámetros hidrodinámicos y tipos de acciones exteriores, así como para distintas variables de respuesta del acuífero. En específico, en las relaciones río-acuífero, el modelo Pluricelular Englobado realiza los cálculos de la relación de manera eficiente, directa y explícita mediante el uso de expresiones simples y operativas (Pulido-Velázquez et al., 2005). Adicionalmente, diversas soluciones analíticas se han desarrollado para problemas transitorios con condiciones de contorno nulas, en geometrías rectangulares y circulares, considerando acciones exteriores sencillas, de acuerdo a distintos investigadores (Sahuquillo, 1983a; Ramos et al., 1983; Pulido-Velázquez et al., 2005; Sahuquillo, 2010c).

En particular, para las soluciones numéricas, la ecuación de flujo subterráneo es planteada como un sistema lineal invariante en el tiempo, del cual se extrae un problema generalizado de Autovectores que debe resolverse eficientemente, es decir, encontrar los Autovalores y Autovectores de dicho sistema hidrológico subterráneo. Es importante mencionar que un Autovector (de la solución numérica), se corresponde con el MODO del sistema lineal invariante en el tiempo. Al integrar el MODO de flujo de la ecuación de estado explícita, es posible realizar la

simulación transitoria. Ya sea para la obtención de soluciones analíticas o numéricas, el uso de los MODOS dominantes de dichas soluciones permite el planteamiento de modelos reducidos con la metodología de Autovalores.

Para el caso de la obtención de la solución numérica, el método de Autovalores equivale al uso del procedimiento de reducción modal adoptado por Davison (1966), que propone que se llegue a un modelo reducido equivalente MODAL a partir de la proyección del modelo original sobre un sub-espacio generado por los Autovectores dominantes de la matriz de estados. Los MODOS dominantes del sistema son calculados eficientemente con métodos de cálculo de Autovalores especializados (Rommes, 2008).

Andreu y Sahuquillo (1987) plantearon la reducción del número de MODOS que deben considerarse en la formulación del método de Autovalores para la solución numérica, lo que les posibilita una reducción en la carga computacional operativa de un modelo por Autovalores. Dicha reducción se propone mediante el truncamiento de los términos asociados a los mayores Autovalores (asociados a MODOS de respuesta más rápidos de las variables de estado del acuífero). Este tipo de aproximación se conoce como Truncamiento Traumático.

Trabajos más recientes (Pulido-Velázquez et al., 2005; Pulido-Velázquez et al., 2007, 2009), han extendido el marco conceptual del método de los Autovalores, posibilitando la consideración de no linealidades en la modelación del flujo de acuíferos y su interacción con ríos. Las soluciones que se han planteado tratan casos en los que: (i) existe variación temporal de condiciones de contorno, (ii) se genera efecto ducha cuando el río se desconecta del acuífero, (iii) existe variación espacial de la topografía de los estratos del acuífero y (iv) se modela un acuífero libre o no es válida la asunción de descensos despreciables respecto del espesor saturado. Existen otras metodologías útiles para la reducción de modelos hidrológicos subterráneos generales, las cuales tienen el objeto de mejorar la eficiencia de su uso en modelos de evaluación de recursos hídricos. Entre estas metodologías se encuentra (i) la Reducción Semi-empírica, (ii) la Reducción basada en datos y (iii) la Reducción de los sub-espacios de Krylov. Dichas metodologías son ampliadas y explicadas por Álvarez-Villa (2014).

2.4.3.2. *Truncamiento modal de un modelo de flujo subterráneo*

Cuando el tamaño de un modelo de flujo permite efectuar el cálculo de todos los MODOS asociados al problema generalizado de Autovalores, una opción efectiva para reducir el tamaño del modelo es ejecutar un truncamiento de los MODOS superiores, reteniendo los m primeros MODOS, asociados a los menores Autovalores del espectro, que representan la mayor parte de la respuesta del sistema. Para efectos prácticos, Andreu y Sahuquillo (1987), proponen dos opciones de truncamiento: traumático y conservativo.

El truncamiento traumático restringe el número de términos adoptados en la ecuación de estado del acuífero (con fines de simulación), sin consideraciones adicionales sobre variables de respuesta del acuífero. Esta aproximación ha mostrado ser apropiada en la disminución de cálculos computacionales y la aceleración de la ejecución del modelo, sin embargo, cierta fracción de la masa de agua que entra o sale del acuífero (por efecto de acciones exteriores), no es contabilizada en la interacción río-acuífero, por tanto, los resultados de la simulación agregada no cumplen con la ecuación de continuidad.

Por otro lado, el truncamiento conservativo aplica la ecuación de continuidad sobre el acuífero para asegurar una representación detallada de sus interacciones con las masas de agua superficial, conservando la eficiencia computacional introducida por el truncamiento traumático, ampliado en Álvarez-Villa (2014).

Del procedimiento de truncamiento conservativo se extraen dos características importantes (i) se debe disponer de todos los MODOS del sistema, los n Autovalores y Autovectores n -dimensionales que cumplen con la ecuación de flujo subterráneo en derivadas parciales, antes de efectuar la reducción del modelo y (ii) de la ecuación de estados del sistema con truncamiento conservativo, el componente residual de continuidad solo aplica para variables agregadas en todo el dominio del acuífero, es decir, para los volúmenes de agua almacenados en el dominio del acuífero, $v(t)$, y la relación río-acuífero a lo largo de toda la red de drenaje, $Q_r(t)$. La segunda característica del truncamiento conservativo implica que para el cálculo de variables distribuidas como alturas piezométricas o relaciones río-acuífero parciales, es necesario el uso del truncamiento traumático para los m MODOS que se consideren.

2.5. IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

2.5.1. Introducción al cambio climático

Durante los últimos 200 años actividades humanas han influenciado la tasa de cambio del sistema climático global, estimándose que el sistema natural responsable del calentamiento de la superficie de la tierra (efecto invernadero), ha sido aumentado debido a la emisión de sustancias como los gases de efecto invernadero. Se cree que este aumento conllevará un calentamiento global superior al de fluctuaciones climáticas normales o naturales, manifestándose sobre todo en un aumento de la temperatura global.

Como tal, el cambio climático ha sido definido por la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), como “El cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (IPCC4, 2006).

El incremento de temperatura media de la Tierra para los últimos 140 años se muestra en la Figura 2.2, donde se observan las oscilaciones

periódicas de la temperatura y la tendencia cada vez más acusada de incremento de temperatura en los últimos 100 años, posteriores a la revolución industrial.



Figura 2.2. Variación de temperatura media en la Tierra para los últimos 140 años. Fuente: IPCC4 (2006).

El aporte antrópico a los gases de efecto invernadero es en forma de dióxido de carbono (CO₂), que ha incrementado su presencia en la atmósfera desde el uso de combustibles de tipo fósil, principalmente por los países industrializados, por lo que la propia industrialización ha sido señalada como principal aporte al cambio climático, dados los patrones de consumo de los países desarrollados y en vías de desarrollo. De esta forma, la generación y consumo de energía proveniente del carbón fósil y el petróleo, el transporte y los procesos industriales de uso intensivo de energía, se cree que son las actividades que mayormente impactan en la producción de gases de efecto invernadero (Hernández-Barrios, 2007). Para 2005, la distribución de la generación de emisiones de gases de efecto invernadero por macroeconomías mundiales era el mostrado en la Figura 2.3.

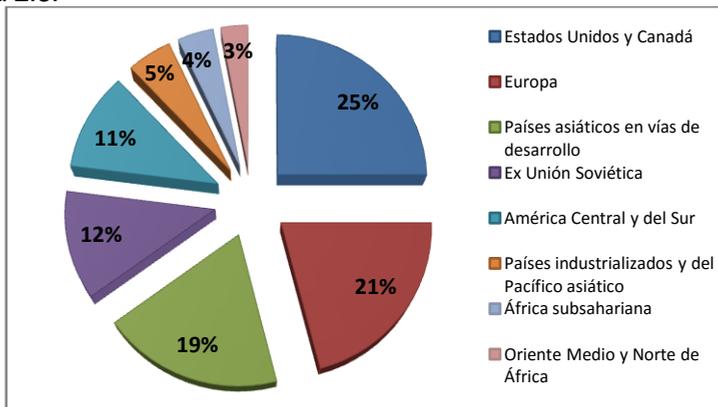


Figura 2.3. Distribución de la emisión de gases de efecto invernadero en distintas zonas del mundo, de acuerdo a Fonam (2005)

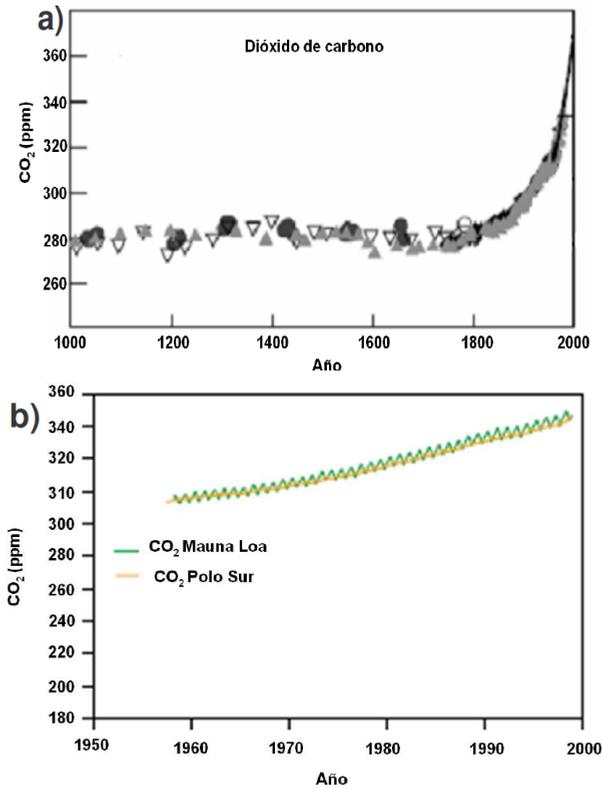
Actualmente, todos los países pertenecientes a la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático deben presentar sus inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y se ha establecido un Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) que marca una metodología común (transparente y consistente) para la comparación de datos obtenidos por los distintos países. De acuerdo al IPCC, 6 sectores contribuyen a nivel mundial a la emisión de gases de efecto invernadero: (i) energía, (ii) procesos industriales, (iii) disolventes, (iv) agricultura, (v) uso del suelo-bosque y (vi) desechos.

2.5.2. El efecto invernadero y sus implicaciones sobre el sistema climático

Existen ciertos gases, componentes de la atmósfera terrestre, tales como el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozono (O_3), óxido nitroso (NO_2) y compuestos halogenados (CFC), los cuales intervienen en los procesos de intercambio de radiación que inciden sobre las características salientes del clima terrestre. Ante la ausencia de estos gases, la temperatura media global sería de $-18^\circ C$. De esta forma, Hernández (2007) exponen que los actuales $15^\circ C$ de media global de temperatura (dado el efecto natural del calentamiento de la atmósfera), hacen posible la vida tal como se manifiesta en el planeta, lo cual es conocido como “Efecto Invernadero”. Entonces, dichos gases que intervienen en la creación de este efecto, son conocidos como Gases Efecto Invernadero (GEI).

Por otro lado, emisiones antrópicas de GEI tienden a incrementar progresivamente su concentración en la atmósfera, lo que intensifica el efecto invernadero y por consiguiente el incremento de la temperatura media global de la superficie del planeta, lo cual ha sido designado como “Calentamiento Global”.

Puesto que la composición principal de los gases efecto invernadero en la atmósfera es el dióxido de carbono (CO_2) con un 76% y el metano (CH_4) con 13%, el CO_2 producto de actividades humanas es el principal gas de efecto invernadero que afecta al balance radiativo de la Tierra (entendiéndose este como una perturbación del balance de energía del sistema Tierra–Atmósfera que se produce, por un cambio en la concentración de dióxido de carbono) (IPCC, 2001). De acuerdo al IPCC (2001), la concentración media de CO_2 en la atmósfera se ha incrementado desde 275ppm previas a la revolución industrial, a 315ppm al inicio del uso de estaciones de medición exactas (1958) y hasta 350ppm para 1996. Las figuras siguientes se muestra la evolución de las concentraciones de CO_2 en los últimos 1000 años, correspondientes a muestras de hielo de zonas de la Antártida y Groenlandia (Figura 2.4a), así como para el período 1950 al 2000, correspondientes a mediciones directas del Mauna Loa y el Polo Sur (Figura 2.4b).



Figuras 2.4^a y 2.4^b. Concentraciones atmosféricas del CO₂ en los últimos 1000 años y del período 1950-2000. Fuente: IPCC4 (2006).

El efecto invernadero sigue el siguiente proceso en la atmósfera: del total de rayos del Sol que llegan a la atmósfera, una parte es rechazada, otra más es reflejada por nubes y una más es absorbida por la atmósfera. De los rayos que llegan a la superficie, una parte se absorbe como calor, otra es reflejada y expandida en todas direcciones y una parte más se escapa al espacio (Figura 2.5). Cuando se incrementa la presencia de ciertos gases en la atmósfera (dióxido de carbono, metano, etc.), una menor cantidad de rayos solares escapan de la atmósfera, volviendo a la superficie terrestre en forma de calor, lo que resulta en un incremento de temperatura de la Tierra. De acuerdo a Hernández-Barrios (2007), el efecto invernadero se presenta de manera natural en la atmósfera, pero que ha sido modificado por el hombre, dada la generación de mayor cantidad de gases de efecto invernadero, efecto que se conoce como "Efecto Invernadero Artificial".

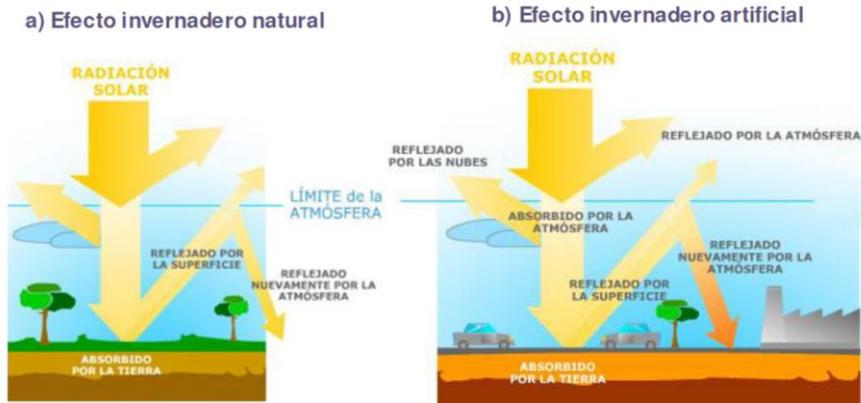


Figura 2.5. Proceso del efecto invernadero en la Tierra: (a) natural y (b) artificial. Fuente: IPCC4 (2006).

Por otro lado, al aplicar a modelos de la atmósfera los principios físicos de conservación de masa, el momento y la energía, así como otras leyes de radiación y de procesos dinámicos y termodinámicos, el conjunto de leyes resultante permite explicar numerosos procesos e interacciones atmosféricas, sin embargo, actualmente no resultan una teoría unificada que explique de manera global y comprensiva el clima del planeta (Hernández-Barrios, 2007).

El sistema climático terrestre es un sistema altamente complejo que está integrado por cinco grandes componentes: la atmósfera, la hidrosfera, la criósfera, la superficie terrestre y la biosfera, y las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona, en el tiempo, bajo la influencia de su propia dinámica interna, debido a forzamientos externos, como las erupciones volcánicas, las variaciones solares, y los forzamientos inducidos por el ser humano, como los cambios en la composición de la atmósfera y los cambios en el uso del suelo (IPCC4, 2006).

Se sabe que el clima terrestre ha sufrido importantes cambios en el pasado, como lo revelan los indicios de grandes avances y retrocesos de los glaciares, existiendo registros de cambios climáticos en épocas más recientes, así como la presunción de que éstos seguirán ocurriendo en el futuro por tratarse de un sistema dinámico que tiende hacia un estado de equilibrio termodinámico. Por tanto, de acuerdo a Hernández-Barrios (2007), los cambios climáticos pueden ocurrir en variadas escalas de tiempo y espacio, pudiendo afectar a la gestión actual y futura de los sistemas de recursos hídricos.

2.5.3. Escenarios de emisiones para el estudio del cambio climático

Cronológicamente, Hernández-Barrios (2007), expone la historia institucional de la evaluación del cambio climático mundial, de acuerdo a: (i) 1988, el establecimiento del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC); (ii) 1990, presentación del Primer Reporte del IPCC

(AR-1); (iii) 1992, realización de la Convención de Río de Janeiro y adopción de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC); (iv) 1994, entrada en vigor de la Convención de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático; (v) 1995, presentación del Segundo Reporte del IPCC (AR-2); (vi) 1997, adopción del Protocolo de Kyoto; (vii) 2001, presentación del Tercer Reporte del IPCC (AR-3); (viii) 2005, ratificación del Protocolo de Kyoto; (ix) 2007, presentación del Cuarto Reporte del IPCC (AR-4); (x) 2009, redacción del Acuerdo de Copenhague con promesas no vinculantes de reducción de emisiones y medidas de mitigación; (xi) 2010, redacción de los Acuerdos de Cancún, formalizando el Acuerdo de Copenhague; (xii) 2014, presentación del Quinto Informe del IPCC (AR-5).

Puesto que el estudio del cambio climático involucra demasiadas variables, es necesario plantear una serie de escenarios que posibiliten la representación de distintos aspectos, tales como la evolución del clima, características del suelo, población, sociedad, economía, etc. (IPCC4, 2006). Entre los escenarios más examinados actualmente se encuentran:

2.5.3.1. *Escenarios socioeconómicos*

Que examinan la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la sociedad y naturaleza, observando el cambio en las emisiones de CO₂, producto del incremento poblacional, cambios tecnológicos, valores sociales, etc. Dadas las condiciones sociales y naturales actuales e imponiendo un cambio climático futuro, es posible identificar vulnerabilidades y analizar adaptaciones.

2.5.3.2. *Escenarios de cambio en el uso del suelo*

Producto del cambio del uso del suelo y la cobertura vegetal, es posible estimar el cambio climático y sus impactos a nivel más regionalizado, mediante la evaluación del flujo de carbono y emisión de gases de efecto invernadero. Si se consideran las características de la superficie del suelo actuales y la posible conversión de la cobertura vegetal, es posible construir una gran variedad de escenarios, que sin embargo, se centran más en cuestiones como seguridad alimentaria y ciclo del carbono, no así en cuestiones explícitas de cambio climático.

2.5.3.3. *Escenarios ambientales.*

Se trata de aquellos escenarios que toman en cuenta factores ambientales que pueden incidir en un cambio climático futuro, por ejemplo, las posibles condiciones ambientales futuras producto de un incremento del CO₂ atmosférico, cambio en la disponibilidad de agua, etc. Al igual que los anteriores escenarios, no son desarrollados explícitamente para evaluar el cambio climático.

2.5.3.4. *Escenarios de incremento del nivel medio del mar.*

Son escenarios creados a partir del incremento de temperatura en los océanos, principalmente en zonas cubiertas por hielo, dado que propician el derretimiento de glaciares, así como del fenómeno de expansión molecular termodinámico en zonas del mar más cálidas. Estos escenarios intentan estimar los incrementos de nivel para los próximos años y las posibles poblaciones (zonas) afectadas, recientemente en términos probabilísticos, evaluando el incremento de nivel del mar como el riesgo de excedencia de un umbral crítico de impacto.

2.5.3.5. *Escenarios de emisión de los Reportes Especiales sobre los Escenarios de Emisiones del IPCC (Special Reports on Emissions Scenarios, SRES por sus siglas en inglés)*

Este tipo de escenarios consideran distintas fuerzas motrices, tales como el crecimiento poblacional y el desarrollo socio-económico, con las que se generan escenarios futuros que influyen sobre fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero (sistemas energéticos y cambio del uso del suelo). Puesto que la evolución de las fuerzas motrices respecto al cambio climático es incierta, da como resultado un gran abanico de posibles caminos de emisiones de gases de efecto invernadero. Con estos escenarios se estima principalmente el incremento futuro de las temperaturas y variación de precipitación futura.

En las últimas décadas, el IPCC ha generado distintos escenarios de emisiones: (i) los escenarios IS92 del AR-1 (IPCC, 1994), (ii) los escenarios SRES/IEE-EE del AR-3 (IPCC, 2001), los escenarios RRP del AR-4 (IPCC, 2006) y (iv) los escenarios RCP del AR-5 (IPCC, 2014).

Información detallada de los escenarios de emisiones relacionados con los reportes AR-1 y AR-2 puede ser encontrada en Hernández-Bedolla (2007). Los escenarios RPP (Report on Proposals and Policies, por sus siglas en inglés) del AR-4 y los escenarios RCP (Representative Concentration Pathways, por sus siglas en inglés) del AR-5, son descritos a continuación.

2.5.3.6. *Escenarios RPP del AR-4 del IPCC*

Están basados en los escenarios de los reportes especiales del IPCC (SRES/IEE-EE), que abarcan el intervalo de valores de emisiones de todas las especies de gases de efecto invernadero y azufre. Presentan cuatro líneas evolutivas principales (A1, A2, B1, B2) y en cada línea evolutiva existen escenarios distintos de acuerdo a supuestos planteados como factores de inflexión (Figura 2.6). Se plantean 40 escenarios en el IE-EE que abarcan los valores de incertidumbre actuales, las fuerzas motrices y grandes cambios tecnológicos, según se describe en cada línea

evolutiva. En cada línea evolutiva se desarrollaron dos escenarios principales: (i) los basados en supuestos armonizados sobre la población mundial, el crecimiento económico y el uso final de la energía y (ii) los basados en una cuantificación alternativa de la línea evolutiva (Hernández-Bedolla, 2007).

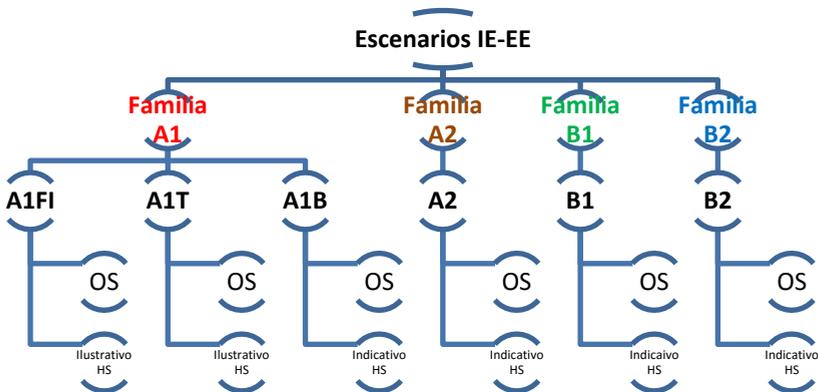


Figura 2.6. Familias y ramas evolutivas propuestas para la creación de escenarios IE-EE. Fuente: IPCC4 (2006).

En la línea evolutiva y familia de escenarios A1, se describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo a mediados del siglo XXI y una posterior disminución de la misma, con una rápida introducción de tecnologías nuevas y eficientes. En esta familia se distinguen tres alternativas del cambio tecnológico para el uso de la energía: (i) utilización intensiva de combustibles fósiles (A1FI); (ii) utilización de fuentes de energía no fósiles (A1T); (iii) utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).

La línea evolutiva y familia de escenarios A2 representa un mundo heterogéneo caracterizado por la autosuficiencia y conservación de las identidades locales, con un desarrollo económico regionalizado, crecimiento económico y cambio tecnológico fragmentados, mucho más lentos que en otras líneas evolutivas.

La línea evolutiva y familia de escenarios B1 representa un mundo convergente hacia una misma población mundial que alcanza un máximo a mediados del siglo XXI y desciende posteriormente como la línea A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientadas a una economía de servicios e información, con un uso menos intensivo de los materiales y la introducción de tecnologías limpias y aprovechamiento eficaz los recursos. En esta línea resaltan las soluciones de orden mundial sobre sostenibilidad económica, social y medioambiental, mayor igualdad y ausencia de iniciativas adicionales sobre el clima.

La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo donde predominan soluciones locales sobre sostenibilidad económica, social y medioambiental, con un aumento progresivo de población a un ritmo menor que en la línea A2, niveles de desarrollo económico intermedio, cambio tecnológico más lento y diverso que en las líneas B1 y A1. Los escenarios se orientan a la protección del medio ambiente y la igualdad social, pero a nivel local y regional.

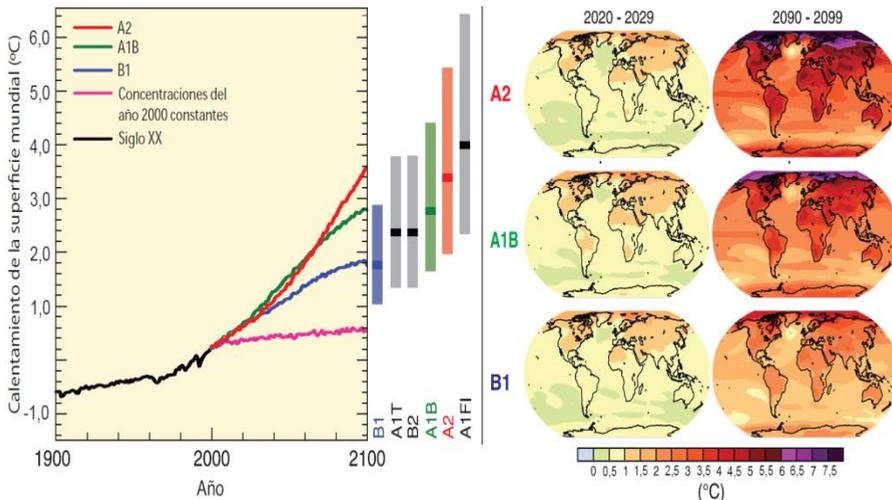
En los decenios próximos, las proyecciones de los escenarios IE-EE indican un calentamiento aproximado de 0.2°C/decenio, aun cuando se mantuviese constante la concentración de todos los GEI y aerosoles registrados para el año 2000 (IPCC, 2001). Del año 2000 en adelante, la proyección de temperatura depende de los escenarios de emisiones de GEI. En la Tabla 2.1 se muestra el promedio mundial proyectado del calentamiento en superficie y aumento de nivel del mar para finales del siglo XXI (IPCC4, 2006).

Tabla 2.1. Promedio mundial proyectado del calentamiento en superficie y del aumento de nivel del mar para finales del siglo XXI (Fuente: IPCC4, 2006)

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999)		Aumento del nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo según los modelos
Concentraciones del año 2000 constantes	0.6	0.3 – 0.9	No disponible
Escenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
Escenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
Escenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
Escenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
Escenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
Escenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

El calentamiento proyectado para el siglo XXI apunta a unas pautas geográficas similares a las observadas en los últimos decenios, con independencia del escenario. Se espera un calentamiento máximo sobre tierra firme y en la mayoría de las latitudes septentrionales altas y mínimos sobre el Océano Austral y sobre el Atlántico Norte (GTI-RRP, 2007). Se proyecta una contracción de la extensión de la cubierta de nieve, aumentos profusos del espesor de deshielo en regiones de permafrost, retracción de hielos marinos en el ártico y antártico para todos los escenarios IE-EE, desapareciendo en verano el hielo marino ártico casi completamente hacia el final del siglo XXI (GTI-RRP, 2007). Es muy probable el aumento de la frecuencia de valores extremos, de olas de calor y precipitaciones intensas, con probabilidad de que los ciclones tropicales sean más intensos, acentuando la velocidad del viento y abundancia de precipitaciones, vinculado a un constante aumento de temperatura de superficie del mar tropical. Además, las trayectorias de tempestades extra tropicales progresarían

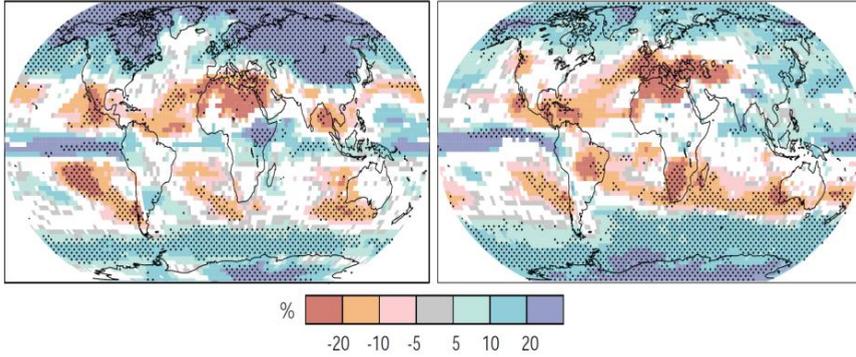
hacia los polos, con cambios en las pautas de viento, precipitación y temperatura (GTI-RRP, 2007). Las proyecciones promedio mundial del calentamiento en superficie para un conjunto de modelos de circulación general atmósfera-océano, de los escenarios IE-EE A2, A1B y B1 se muestran en la Figura 2.7a, junto con proyecciones del cambio de temperatura en superficie para el comienzo y final del siglo XXI (Figura 2.7b), respecto del período de referencia (1980-1999), siendo el promedio de proyecciones de modelos climáticos MCGAO, de los escenarios IE-EE A2, A1B y B1 para los decenios 2020-2029 y 2090-2099.



Figuras 2.7a y 2.7b. Proyecciones promedio del calentamiento global con modelos de circulación global atmósfera-océano. Fuente: IPCC4, 2006.

Por otro lado, las Figuras 2.8a y 2.8b, muestran los cambios de precipitación relativos (a manera de valores porcentuales) para el período 2090-2099, respecto del período 1980-1999, como un promedio multi-modelo para el escenario A1B, para la temporada diciembre-febrero (Figura 2.7a) y la temporada junio-agosto (Figura 2.7b). En ambas figuras, las áreas en blanco representan un 66% de coincidencia en el conjunto de modelos evaluados sobre el cambio de signo de precipitación y las áreas punteadas representan un 90% concordancia en los modelos sobre el signo de cambio (GTI-RRP, 2007).

Los cambios en precipitación y temperatura introducirán consecuentemente cambios en la escorrentía mundial (Figura 2.9) y de la disponibilidad de agua, sabiéndose con un grado de confianza alto que la escorrentía aumentaría entre un 10% y un 40% de ahora hasta mediados del siglo XXI en latitudes superiores y ciertas áreas tropicales pluviales (incluidas áreas populosas del este y sureste de Asia).



Figuras 2.8a y 2.8b. Proyecciones multi-modelo sobre las pautas de cambio en la precipitación mundial para la década 2090-2099. Fuente: IPCC4, 2006.

Además se esperaría una disminución entre el 10% y el 30% en regiones secas de latitudes medias y trópicos secos, producto de disminución de lluvias y aumento de evapotranspiración; además, numerosas áreas semi-áridas (cuenca mediterránea, oeste de Estados Unidos, sur de África, nordeste de Brasil), se padecerá una disminución de recursos hídricos. Las áreas afectadas por sequías aumentarán en extensión, repercutiendo negativamente en sectores como el agrícola, de suministro hídrico, producción de energía o salud; además, la demanda regional de agua para riego aumentaría en estas zonas (GTI-RRP, 2007).

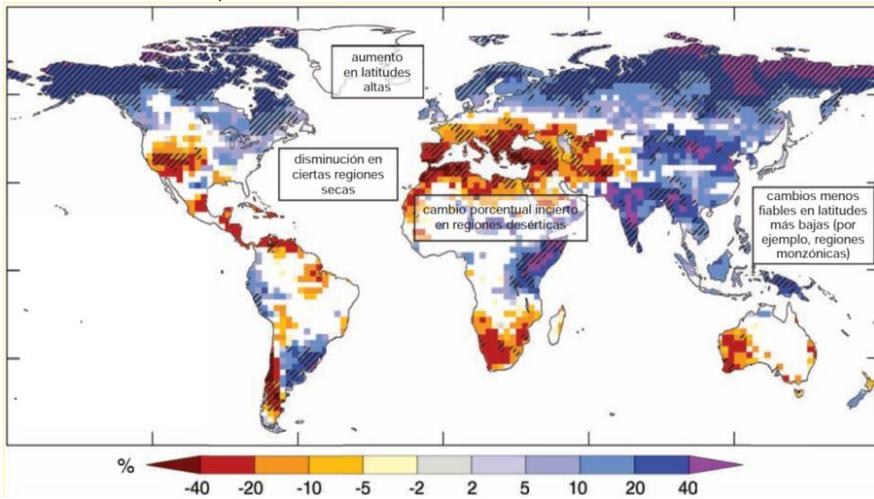
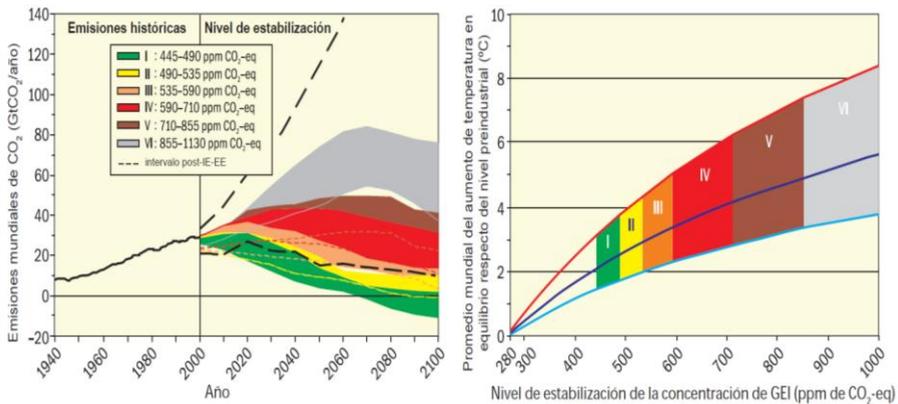


Figura 2.9. Proyección multi-modelo de cambios relativos a la escorrentía respecto del clima actual y el de finales del siglo XXI. Fuente: IPCC4, 2006.

Es probable que hasta un 20% de la población mundial habite áreas vulnerables a crecidas de ríos (de ahora hasta el decenio de 2080); y producto del incremento en frecuencia y gravedad de

las crecidas y sequías, se afectaría negativamente el desarrollo sostenible. Además, el incremento de temperaturas afectaría las propiedades físicas, químicas y biológicas de lagos y ríos de agua dulce, teniendo efectos sobre numerosas especies de agua dulce, la composición de las comunidades y calidad del agua. En áreas costeras, el aumento del nivel del mar agravaría las limitaciones de los recursos hídricos, dada la salinización de las zonas de suministro de agua subterránea (GTI-RRP, 2007).

Finalmente, para poder mitigar las emisiones de GEI y reducir la rapidez y magnitud del cambio climático, se debe tomar en cuenta la inercia del clima y los sistemas socio-económicos. Las emisiones de GEI tendrían que alcanzar su nivel máximo y disminuir posteriormente, conociendo que cuanto más bajo sea el nivel de estabilización, más rápidamente se alcanzaría el máximo de concentración y posteriormente su disminución. En los próximos decenios, los esfuerzos de mitigación determinarán en gran medida las oportunidades de alcanzar niveles de estabilización más bajos (GTI-RRP, 2007). En las Figuras 2.10a y 2.10b se muestran las emisiones de CO₂ mundiales desde 1940 al 2000 y los distintos abanicos de emisión, categorizados por escenarios de estabilización entre los años 2000 y 2100 (Figura 2.10a); además, se presenta la correspondiente relación entre el objetivo de estabilización y el probable aumento del promedio mundial de temperatura en equilibrio (respecto del nivel pre-industrial), Figura 2.10b.



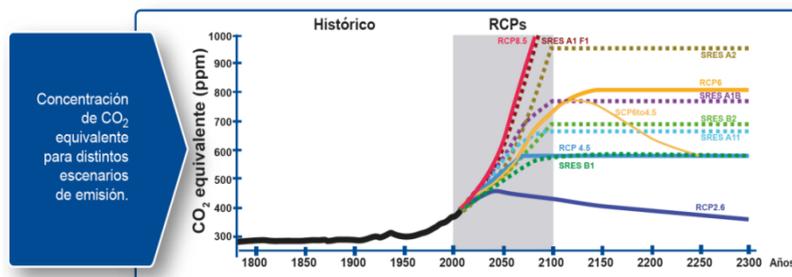
Figuras 2.10a y 2.10b. Emisiones de CO₂ y aumentos de temperatura en equilibrio para los abanicos de niveles de estabilización. Fuente: IPCC4, 2006.

2.5.3.7. Escenarios RCP del AR-5 del IPCC

En quinto informe de cambio climático (AR-5) se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, que se denominan Sendas Representativas de Concentración (Representative Concentration Pathways, RCP por sus siglas en inglés), las

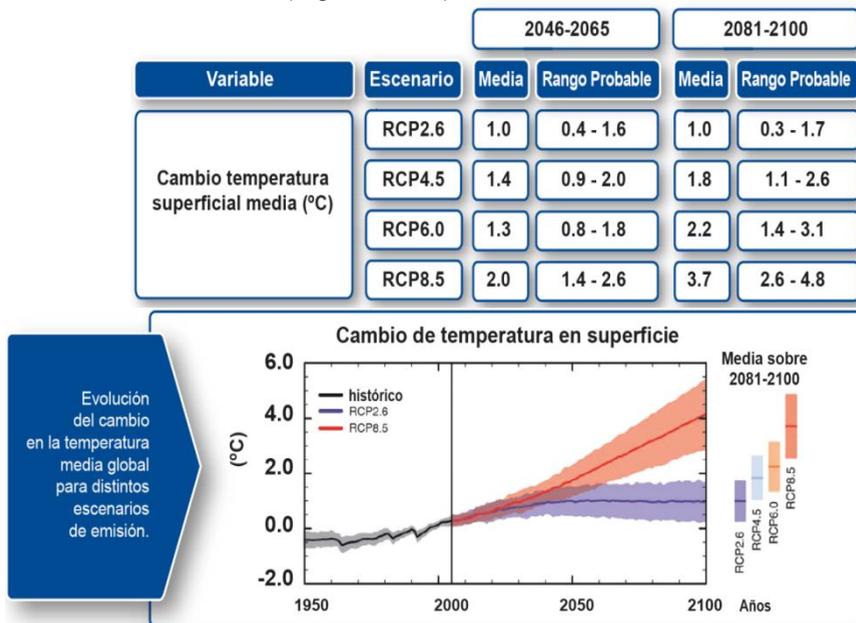
cuales se identifican por su forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100, que varía de 2.6 a 8.5 W/m². Algunos de los nuevos escenarios RCP contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático en el siglo XXI, algo que los escenarios de emisión usados en el AR-4 no contemplaban. Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes, de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de uso del suelo hasta el año 2100, en base a una combinación de modelos de distinta complejidad sobre la química de la atmósfera y el ciclo del carbono. La Figura 2.11a muestra los distintos escenarios RCP, en función de la tendencia del forzamiento radiativo y su correspondiente emisión de bióxido de carbono (CO₂) equivalente para el año 2100. Además, la Figura 2.11b compara la concentración de CO₂ equivalente para distintos escenarios de emisión, tanto del AR-4 como del AR-5. Las emisiones continuadas de gases de efecto invernadero causan un calentamiento adicional al actualmente existente. Unas emisiones iguales a las tasas actuales o superiores inducirán cambios en todos los componentes del sistema climático, algunos de ellos sin precedentes en cientos o miles de años. Los cambios tendrán lugar en todas las regiones del globo, incluyendo cambios en la tierra y el océano, en el ciclo del agua, en la criósfera, en el nivel del mar, en algunos episodios extremos y en la acidez de los océanos. Muchos de estos cambios persistirán durante siglos, lo que requerirá reducciones substanciales y sostenidas de las emisiones de CO₂ (RCP-PCC5, 2014).

	FR	Tendencia del FR	[CO ₂] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m ²	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m ²	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m ²	creciente	936 ppm



Figuras 2.11a y 2.11b. Escenarios RCP de emisión de CO₂ equivalente para el año 2100, en función del forzamiento radiativo (FR) y comparativa del CO₂ equivalente de los escenarios del AR-4 y AR-5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

Las proyecciones realizadas en las próximas décadas de muchas variables muestran cambios similares a los ya observados, siendo el cambio del clima proyectado en los escenarios RCP similar al mostrado con los escenarios RPP del AR-4. El cambio de temperatura superficial no será regionalmente uniforme, pero a largo plazo, el calentamiento será mayor sobre suelo que sobre el océano. En este clima más cálido, la diferencia entre la precipitación estacional media de regiones secas y húmedas será mayor, incrementándose la precipitación en regiones de latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial. De esta forma, en la Figura 2.12a se muestran los cambios en temperatura superficial para distintos escenarios RCP y períodos temporales, junto con la evolución simulada del cambio en la temperatura media global de los escenarios RCP (Figura 2.12b).



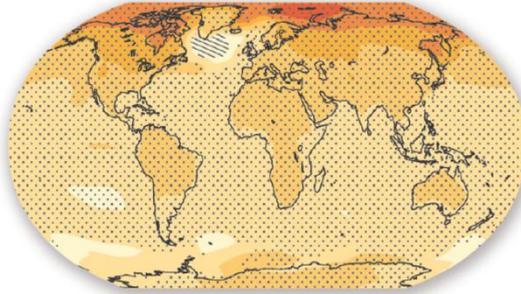
Figuras 2.12a y 2.12b. Cambios estimados de temperatura media global para distintos escenarios RCP de emisión de CO2 equivalente. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

Los escenarios RCP del AR-5 indican que los océanos se calentarán indudablemente, continuando este proceso durante largas escalas temporales, debido a la transferencia de calor entre la superficie y el océano profundo, aun cuando las emisiones de GEI decrezcan o se mantengan constantes. Es de especial cuidado la circulación termohalina atlántica, que posiblemente se debilite entre 1-24% (en el escenario RCP-2.6) y entre 12-54% (en el escenario RCP-8.5), de acuerdo al RCP-

IPCC5 (2014) .En la Figura 2.13a se muestra el cambio de temperatura media de superficie terrestre para los escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5, como la diferencia entre los períodos 1986-2005 y la proyección para 2081-2100. Además, la Figura 2.13b presenta la correspondiente variación de la precipitación media para los mismos escenarios y períodos temporales.

Puesto que la mayoría de las regiones tendrán mayores episodios de extremos de altas temperaturas que de bajas temperaturas y que las olas de calor serán más frecuentes y de mayor duración, los fríos invernales extremos seguirán ocurriendo ocasionalmente, aumentando la frecuencia, intensidad y/o cantidad de precipitaciones fuertes en algunas áreas del planeta.

Escenario RCP 2.6



Escenario RCP 8.5

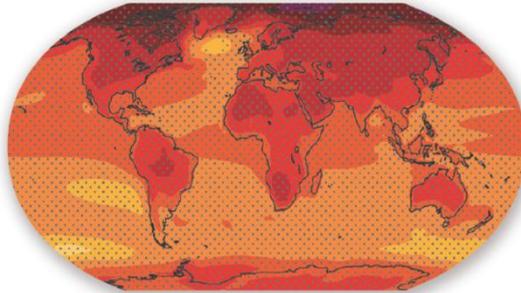
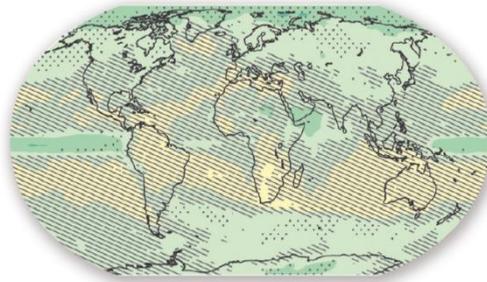


Figura 2.13a. Cambio de temperatura media en superficie para escenarios RCP del AR-5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

Escenario RCP 2.6



Escenario RCP 8.5

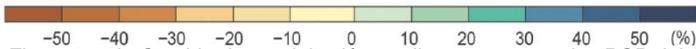
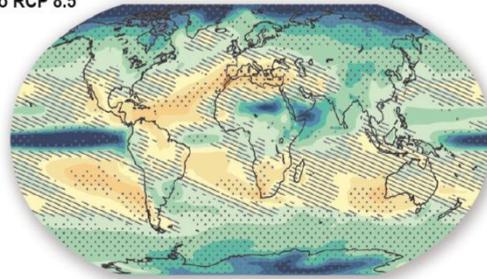


Figura 2.13b. Cambio de precipitación media, para escenarios RCP del AR-5.
Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

En particular, la Región Mediterránea y Oriente Medio, el suroeste de Estados Unidos y sur de África, la escorrentía se verá reducida (agua disponible), así como la humedad del suelo. La Figura 2.14 muestra el cambio de escorrentía y humedad del suelo (en porcentaje), para el período 2081-2100, respecto del período de referencia 1986-2005, según las emisiones de CO₂ equivalente proyectadas para el escenario RCP-8.5 (RCP-IPCC5, 2014).

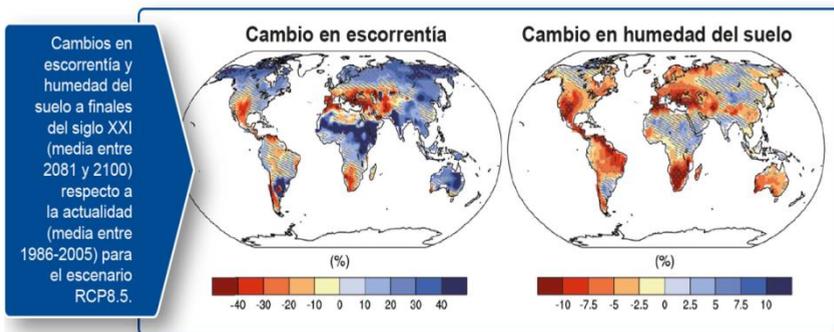


Figura 2.14. Cambios porcentuales en escorrentía y humedad del suelo para el escenario de emisiones de CO₂ equivalente RCP-8.5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

De los informes AR-4 y AR-5 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático se extraen los escenarios de emisiones que actualmente están siendo considerados como los más robustos y de mayor fiabilidad de cara a la evaluación del impacto del cambio climático global y regional. Los escenarios de emisiones, junto con las proyecciones de variación de temperatura y precipitación, obtenidas por los distintos modelos climáticos de circulación global y regional, permiten evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos actuales y las posibles variaciones futuras de los mismos. Dicha evaluación propicia el poder adelantarse y prevenir escenarios con presencia de fenómenos extremos (lluvias extremas, inundaciones, sequías, etc.).

2.5.4. Modelos climáticos de circulación global (MCG)

Un modelo climático está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Estas ecuaciones expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático que son: la conservación del momento, de masa, la ecuación de estado de los gases, la conservación de la energía y la conservación de vapor de agua, respectivamente (Sordo, 2006). Actualmente, los modelos climáticos de circulación global de la atmósfera (MCG) incluyen además modelos de funcionamiento de los océanos denominados modelos de circulación global acoplados océano atmósfera (MCGAO-A).

Los modelos numéricos para simular procesos de circulación atmosférica han mejorado notablemente en las últimas décadas, siendo la simulación y el pronóstico del clima los objetivos primordiales de los científicos atmosféricos. Además, los MCG han sido para el estudio de la variabilidad y el cambio climático. Tanto para los modelos numéricos como los climáticos, una vez conocido el forzante del proceso a simular, es utilizado un modelo que permita comparar la simulación numérica del forzante impuesto, respecto de aquella generada por el modelo pero sin forzantes (Hernández-Bedolla, 2011).

De esta forma, para analizar los impactos en el clima del planeta, es usado un modelo de circulación de la atmósfera en el que se impone una anomalía de temperatura para la superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes (Hernández-Bedolla, 2011). Evidentemente, para que un modelo climático sea considerado útil como herramienta de análisis, debe ser capaz de simular (al menos aproximadamente) el ciclo anual promedio del clima.

Para el estudio del cambio climático se realiza un manejo o variación de los forzantes radiativos, mediante simulaciones numéricas con aumento gradual de las concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC4, 2006). Dependiendo del tipo de aumento en estos gases propuesto, será la respuesta en el clima que se obtenga. Sin embargo, la mayoría de los

modelos del clima sugieren que a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor será la magnitud de la anomalía climática.

No existe un experimento climático único para analizar el cambio climático, pues depende de cómo se piensa que serán las emisiones. Una buena descripción de qué son los modelos de circulación del clima aparece en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) del Grupo I del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001). En ella se analizan los elementos de los modelos que, por su complejidad y también por su importancia en el clima, requieren consideración especial.

De acuerdo a Hernández-Bedolla (2011), para que las predicciones de algún modelo sean consideradas, éstas deben incluir algunas características observadas hasta ahora del calentamiento global. Idealmente se esperaría que un modelo climático describiera los siguientes parámetros:

- i. La temperatura de superficie (en continentes y océanos)
- ii. La temperatura en la tropósfera
- iii. La amplitud del ciclo diurno de temperatura
- iv. Reducción de glaciares, cubierta de hielo y nieve
- v. La temperatura de los océanos
- vi. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera
- vii. Variación del clima por hemisferios
- viii. Extensión y cubierta de hielo y nieve en la Antártida
- ix. Variación de la intensidad y frecuencia de ciclones extra-tropicales

Se sabe que no todos los modelos simulan adecuadamente todos los parámetros mencionados, sin embargo, las proyecciones que de ellos se obtienen pueden tomarse en serio, como una primera aproximación de los posibles efectos del cambio climático global. No obstante, también existen simulaciones más confiables, a escala sub-continental y de períodos temporales cortos (décadas). Sin embargo, es difícil obtener conclusiones precisas sobre el cambio climático a escalas regionales o locales, puesto que el grado de respuesta del sistema climático ante un forzamiento tiene una inercia enorme y difícil de cuantificar. De esta forma, el IPCC4 (2006) expone que los modelos de clima actuales consideran de forma explícita los procesos atmosféricos y oceánicos y sus principales interacciones, debido a que el océano desempeña un papel crucial en el clima de la Tierra y condiciona su variabilidad.

Dado que los MCGAO-A están basados en la resolución de un conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física y que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano, se trata de un sistema complejo no lineal de ecuaciones diferenciales que no tienen solución analítica. Por tanto, todas las ecuaciones deben resolverse a través de métodos numéricos, dividiendo el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdas tridimensionales, donde se asignan valores a las diferentes variables que caracterizan el estado físico de la atmósfera y el océano (Hernández-Bedolla, 2011).

El grupo de trabajo I (bases físicas) del IPCC4 (2006) ha expuesto que para observar las evoluciones temporales de las variables en cada celda de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos de tiempo cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdas. Cuanto menor sea dicho tamaño, también ha de serlo el tiempo de simulación. La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGAO-A actuales varía entre 2° y 10° de latitud y longitud en la horizontal (entre 220km y 1100km) y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesores variables, mientras que las resoluciones horizontales y verticales de la parte oceánica suelen ser similares o algo superiores a las atmosféricas.

El análisis de modelos simples y la comparación de las respuestas de los MCGAO-A en escenarios de forzamiento hipotéticos sugieren que en la mayoría de los escenarios, en los próximos decenios, es probable que los errores en las proyecciones a gran escala de las temperaturas aumenten en forma proporcional a la magnitud de la respuesta general. La magnitud estimada de los ritmos de calentamiento atribuibles a la influencia humana que se observan actualmente y la incertidumbre que los rodea permiten por lo tanto estimar, con relativa independencia de los modelos, el grado de incertidumbre de las proyecciones que abarcan varios decenios y respecto de la mayoría de los escenarios. Si se tienen en cuenta las observaciones recientes, es probable que el calentamiento antropogénico oscile entre 0.1 y 0.2°C por decenio durante los próximos decenios (IPCC4, 2006).

2.5.5. Modelos climáticos regionalizados (MCR)

2.5.5.1. Generalidades

La necesidad de migrar de los modelos climáticos globales a los regionales es debido a que en los primeros no se tienen en cuenta especificidades del clima de una región en particular, siendo su discretización muy gruesa y la parametrización de los procesos es menor que el tamaño de la malla usada, lo que hace necesario el generar resultados detallados mediante modelos climáticos regionales (Pérez, 2012). Estos últimos, incluyen características climáticas locales y mediante técnicas de bajada de escala (downscaling), permiten detallar los resultados de un modelo global, para un determinado territorio de interés.

Mientras que en los modelos de circulación global el tamaño de celda oscila entre 200-300km, en los modelos regionales se usan celdas de 45-50km, lo que posibilita la inclusión a mayor detalle de procesos atmosféricos que podrían estar encubiertos a una mayor resolución (influencia orográfica, vegetación, línea de costa, influencia de tornados, trombas, etc.).

2.5.5.2. *Proyecciones futuras a nivel regional a partir de los escenarios RCP del IPCC 2014*

De acuerdo al RCP-IPCC5 (2014), las proyecciones regionales para la región mediterránea indican que muy probablemente existirá:

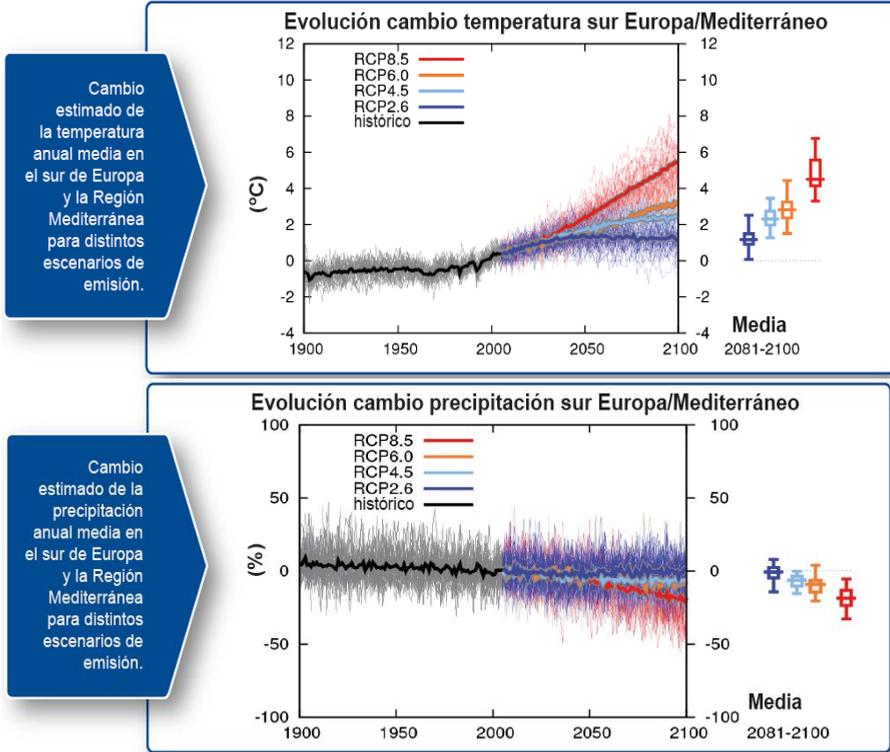
- i. Un incremento de temperatura superior a la media global, que será más pronunciado en los meses estivales que en los invernales, con incrementos medios entre 3.8°C y 6.0°C para los meses invernales y estivales respectivamente, según el escenario RCP8.5.
- ii. Una reducción en la precipitación anual en la península ibérica, más acusada hacia el sur, fuertemente reducidas en meses estivales. La reducción media en el escenario RCP8.5 indica una precipitación entre 12% y 24% menor en los meses invernales y estivales respectivamente.
- iii. Un aumento de los extremos, relacionados con las precipitaciones de origen tormentoso principalmente.

La Tabla 2.2 resume los resultados del escenario RCP8.5, representando los cambios de temperatura (en °C) y de precipitación (en %) para los períodos invernal, estival y anual, según distintos horizontes temporales.

Tabla 2.2. Cambio en temperatura y precipitación por periodo y distintos horizontes temporales en el escenario RCP8.5 (Fuente: RCP-IPCC5, 2014)

Período	Año	Temperatura (°C)					Precipitación (%)				
		min	25%	50%	75%	max	min	25%	50%	75%	max
Diciembre Enero Febrero	2035	0.0	0.6	0.9	1.1	1.7	-10	-4	-1	1	8
	2065	0.7	1.8	2.2	2.7	3.1	-24	-9	-4	-2	6
	2100	2.4	3.3	3.8	4.6	5.7	-35	-18	-12	-7	0
Junio Julio Agosto	2035	0.6	1.1	1.4	1.6	2.7	-15	-7	-3	1	8
	2065	2.1	2.6	3.3	3.7	5.6	-31	-18	-12	-7	9
	2100	3.9	4.9	6.0	6.8	9.3	-58	-35	-24	-17	-4
Anual	2035	0.4	1.0	1.1	1.3	2.0	-8	-4	-2	0	5
	2065	1.6	2.3	2.5	3.0	4.1	-23	-11	-7	-5	1
	2100	3.3	4.1	4.5	5.6	6.9	-35	-23	-19	-13	-2

Los cambios de la Tabla 2.2 están referidos al período 1986-2005, mostrándose también los percentiles de 25%, 50% y 75%, asociados al intervalo de incertidumbre en la predicción, así como el valor máximo y mínimo de 39 modelos utilizados. Respecto a la evolución de temperatura y precipitación para la región de Europa/Mediterráneo, el RCP-IPCC5 (2014) ha obtenido las Figuras 2.15a y 2.15b, para los escenarios RCP8.5, 6.0, 4.5 y 2.6.



Figuras 2.15a y 2.15b. Evolución de cambio en temperatura y precipitación para la región Europa/Mediterráneo, de acuerdo a los resultados del RCP-IPCC5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

La Figura 2.16 presenta una comparación de distintos modelos climáticos, usando resoluciones diferentes para representar el cambio estimado de la distribución de la precipitación en Europa, esto para un horizonte temporal de final de siglo (2081-2100), comparado respecto al período 1986-2005. Las figuras individuales corresponden a las estimaciones de emisión de gases de efecto invernadero calculadas en el IPCC-4, el IPCC-5 y un modelo climático regional de alta resolución (respectivamente, de izquierda a derecha), para el período estival (tres figuras individuales superiores) y el período invernal (tres figuras individuales inferiores). Los valores de los pixeles de los modelos climáticos están en mm/día/°C.

Los tres modelos coinciden en una reducción de precipitación en la península ibérica, siendo más acusada en el período estival del modelo climático regionalizado de alta resolución, con valores del orden de -0.2 a -0.8 mm/día/°C y de -0.0 y -0.4 mm/día/°C en el período invernal.

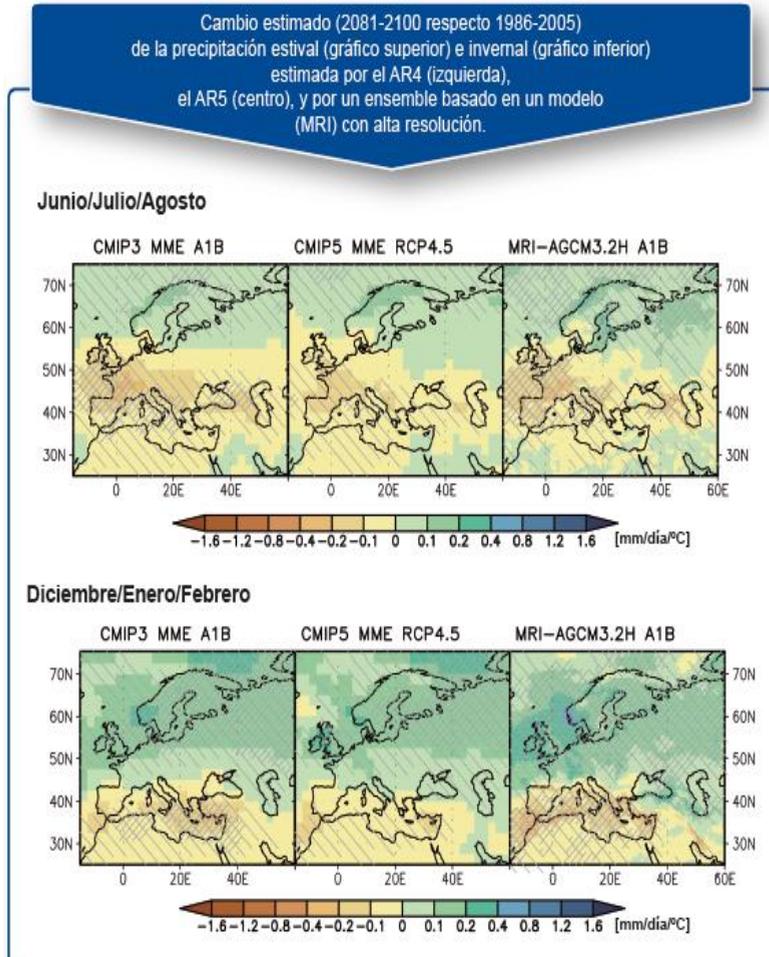


Figura 2.16. Comparación de la predicción del cambio en la precipitación para distintos modelos regionales respecto del escenario RCP4.5. Fuente: RCP-IPCC5, 2014.

2.5.6. Efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico

Los cambios en la precipitación, condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes, y los cambios en las temperaturas, modifican los valores de evaporación y evapotranspiración, quedando alterada la cantidad y las características de las escorrentías (Hernández-Bedolla, 2011). Por tanto, los aspectos cuantitativos del agua serán afectados por un cambio en el clima, así como los aspectos relacionados con la disminución de la calidad de la misma, que pueden verse acentuadas si se produce un descenso en la cantidad del recurso. Un menor volumen de agua disponible provocaría el empeoramiento de la calidad de las aguas y el descenso de los niveles piezométricos en los acuíferos, lo que

en zonas costeras, facilitaría la intrusión marina, hecho además favorecido por el aumento del nivel del mar.

Algunos procesos físico-químicos y biológicos en el agua dependen de la temperatura, como por ejemplo, el desarrollo de las algas, que aumentaría con la temperatura, produciendo un mayor consumo de oxígeno en su descomposición. Todo ello puede afectar a la calidad del agua en embalses, afectada por la reducción de las concentraciones de oxígeno y la disminución de aportaciones a los mismos. En muchas regiones del mundo, hay aparentes tendencias de aumentos y disminuciones en los caudales de los ríos, pero es muy difícil asegurar que el cambio climático sea quien de origen a estos cambios, debido a la existencia de otros factores, como puede ser la variabilidad del comportamiento hidrológico a lo largo del tiempo, la escasez de registros y el corto periodo de tiempo en las mediciones, así como la respuesta de los caudales de los ríos a diferentes estímulos ocasionados por otros factores ajenos al cambio climático (IPCC, 2001).

Los posibles cambios de la temperatura en los cuerpos de agua, en general, degradarían la calidad del agua, modificando la calidad del agua por una posible disminución de los volúmenes en los caudales. El aumento de la temperatura del agua altera la velocidad de los procesos biogeoquímicos (algunos producen degradación, otros limpieza), reduciendo la concentración de oxígeno disuelto en el agua. De acuerdo a Hernández-Bedolla (2015), es probable que la magnitud y la frecuencia de las crecidas aumenten en algunas regiones, y que los caudales pequeños disminuyan en muchas otras. El aumento en la magnitud y frecuencia de las crecidas es una consecuencia de un aumento en la frecuencia de las tormentas, aunque el efecto de un cambio determinado en las precipitaciones depende en gran parte de las características de la cuenca y no precisamente por factores ocasionados por el cambio climático.

Las demandas de agua urbana están aumentando, producto del crecimiento de la población y el desarrollo económico, pero también disminuye en algunos países donde existe emigración. El cambio climático puede reducir la disponibilidad de agua en algunas regiones con estrés hídrico y aumentarla en otras y puesto que las demandas para consumo humano tienen mayor prioridad de abastecimiento, el cambio climático probablemente no tendría grandes repercusiones sobre la demanda municipal o industrial, pero sí podría afectar sustancialmente el uso de agua para agricultura (tradicional y de riego).

El impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos depende no solo de los cambios en volumen, calidad de los caudales y de las recargas en los acuíferos, sino también de las características del sistema, la forma en que evoluciona la operación y manejo del sistema, y de las adaptaciones al cambio climático que se apliquen (Rodríguez, 2004). Algunos sistemas de recursos hídricos están evolucionando continuamente para hacer frente a nuevos retos en el manejo y operación, pero los sistemas sin un adecuado manejo de los recursos hídricos probablemente serán los más vulnerables al cambio climático.

Según Pérez (2005), en la actualidad al diseñar una infraestructura hidráulica se debería considerar el efecto del cambio climático, ya que no se puede suponer que el futuro régimen hidrológico será similar al del pasado. El reto principal, por lo tanto, consiste en incorporar la incertidumbre del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

La gestión integrada de los recursos es un medio que se utiliza cada vez más para conciliar los diferentes usos de agua y parece tener una mayor flexibilidad que su gestión en forma convencional (Rodríguez, 2004). La capacidad de adaptación, concretamente, la capacidad para poner en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos, está distribuida en forma muy dispareja en todo el mundo, por lo que puede ser difícil modificar las prácticas de manejo y gestión de los recursos hídricos en un país cuando no estén bien establecidas las instituciones responsables, ni haya procesos semejantes a los del mercado.

En este sentido, Andreu et al. (1996), comenta que en la actualidad es necesario desarrollar medios para introducir las prácticas de un manejo integrado de los recursos hídricos en entornos institucionales específicos, mismos que son necesarios aún en ausencia del cambios climáticos, para mejorar la eficiencia en el manejo de los recursos y sistemas hidráulicos.

Tesis Doctoral

"El científico está motivado principalmente por la curiosidad y el deseo de la verdad".

Irving Langmuir.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN DE MODELOS DE ACUÍFERO EN SISTEMAS DE USO CONJUNTO

3.1. INTRODUCCIÓN

Puesto que los procesos naturales del ciclo hidrológico en una cuenca se encuentran relacionados entre sí, el uso del agua (desde sus distintos orígenes) y los procesos en sí (de intercambio natural de agua), afectan no solamente al ciclo hidrológico, sino también a las componentes de los aprovechamientos con los que se encuentran relacionados. De esta forma, los procesos asociados a los acuíferos y la interacción de flujo superficial y subterráneo presente en los mismos, son de los procesos más generalizados y difíciles de medir, conocer y controlar en la modelación de una cuenca hidrológica, por lo que se requiere de un estudio cuidadoso, metódico e integrado del sistema en su conjunto.

Para poder realizar el estudio integral del uso conjunto de recursos hídricos en una cuenca hidrológica se requiere del conocimiento del funcionamiento general del sistema, pero en su conjunto (incluyendo la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas), el uso de herramientas y la aplicación de metodologías que permitan simular de manera adecuada los procesos naturales y la alteración de los mismos bajo la influencia del hombre. Por tanto, en el contexto del uso conjunto, una metodología de integración es requerida.

En este sentido, dentro del uso conjunto, un análisis integral del balance de recursos debe considerar tantos aspectos e interacciones físicas del

agua y el medio en el que se desplaza, que lo vuelve un problema de análisis complejo. La Figura 3.1 intenta representar la complejidad dada en las relaciones naturales y antrópicas dentro de una cuenca hidrológica, que a su vez requieren ser medidas y analizadas en el contexto de uso conjunto de recursos hídricos.

La complejidad de representar las relaciones naturales de los sistemas superficial y subterráneo de una cuenca (precipitaciones, recargas subterráneas, evapotranspiraciones, interacciones río-acuífero, descargas superficiales y subterráneas, etc.), junto con las afecciones al sistema natural hechas por el hombre a lo largo del tiempo (extracciones, filtraciones de riego y embalses, recargas artificiales, embalse y trasvase de agua superficial, suministro de demandas, retornos de riego, etc.), condicionan que el funcionamiento conjunto del sistema de recursos haya sido paulatinamente alterado, respecto del funcionamiento natural del mismo, por lo que se dificulta el conocer o simular los procesos e interacciones para un estado natural del sistema hidrológico. Sin embargo, es necesario realizar aproximaciones del funcionamiento conjunto y natural del sistema, que permitan simular el funcionamiento actual y futuro del mismo, con el objeto de entender el sistema en su conjunto y poder llegar a tener una herramienta robusta para la simulación del sistema hidrológico y la evaluación de alternativas de gestión.

Al disgregar las alteraciones y al utilizar modelos simplificados (capaces de reproducir de manera robusta el funcionamiento conjunto del flujo superficial y subterráneo, así como evaluar eficientemente el intercambio de flujo entre los sistemas superficial y subterráneo), se logra integrar en una simulación conjunta las inter-relaciones naturales entre los sistemas hídricos, así como el impacto de las afecciones antrópicas asociadas al sistema en su conjunto.

La propuesta metodológica de integración plantea el uso de métodos y herramientas específicos, de manera progresiva, con el objetivo de establecer una metodología genérica de evaluación del uso conjunto en cuencas hidrológicas complejas, donde interaccionen intensamente masas de agua superficiales y subterráneas.

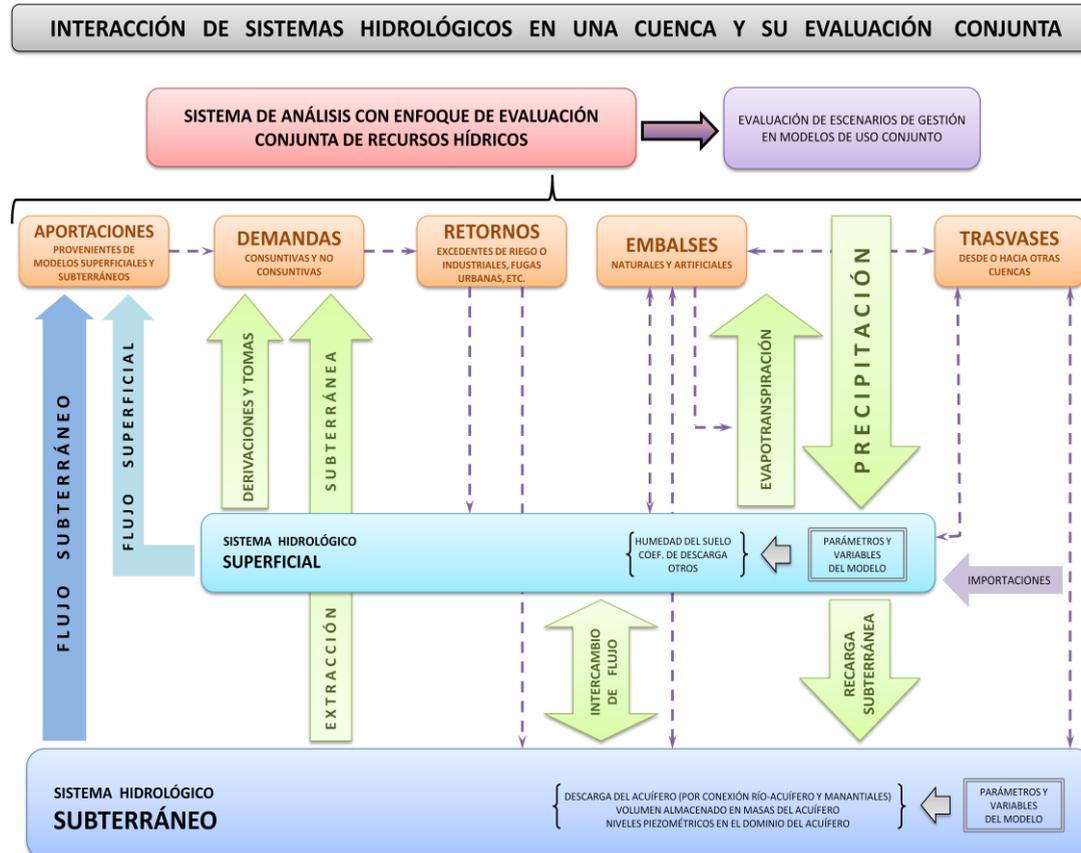


Figura 3.1. Relaciones naturales y acciones antrópicas que intervienen en una cuenca hidrológica. Fuente: Elaboración propia.

3.2. INTEGRACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

En este apartado se describen las bases de la metodología de integración propuesta en la investigación de esta tesis. La integración metodológica parte de reconocer las fortalezas y debilidades de los modelos hidrológicos actuales y su uso para la evaluación conjunta de sistemas de recursos hídricos. Por tanto, los modelos hidrológicos utilizados son aquellos capaces de acoplarse de manera sencilla y eficiente a sistemas de soporte a la decisión, en los cuales es posible analizar alternativas de uso conjunto del agua de una cuenca hidrológica. Dada la complejidad de los sistemas naturales, los datos requeridos por los modelos hidrológicos que intentan reproducir dichos sistemas, normalmente son abordados y determinados de manera aislada y puesto que su inter-relación (natural y antrópica) es muy estrecha, los mismos deberían abordarse de manera conjunta. Comúnmente es posible encontrar estudios de análisis de balance, determinación de aportaciones superficiales y simulación del flujo subterráneo, de manera dislocada respecto de un funcionamiento conjunto de un sistema, lo que lleva a suponer o simular de manera simplificada los procesos menos importantes según el objetivo del análisis. Sin embargo, un análisis de mayor rigor, debería ser capaz de integrar y analizar los sistemas superficial y subterráneo bajo el enfoque de uso conjunto, lo cual requiere invariablemente un conocimiento integral del sistema analizado y de su funcionamiento conjunto.

A su vez, dada la complejidad de las cuencas analizadas, es posible que no todos los estudios puedan ser realizados bajo la dirección de un mismo investigador o grupo de investigación, por lo que comúnmente se contará con modelos, estudios y análisis previos útiles para su integración en modelos de flujo superficial y subterráneo que permitan una evaluación integral del uso conjunto de recursos hídricos en una cuenca, lo cual es el objetivo de la metodología propuesta en este apartado.

El entendimiento del sistema en su conjunto es logrado (i) al realizar un análisis del balance de sus recursos hídricos, (ii) al conocer y estimar las aportaciones superficiales y subterráneas y (iii) al entender y simular el sistema subterráneo y sus interacciones con el sistema superficial. Con esto es posible conocer la situación actual del sistema en su conjunto (bajo régimen alterado), permitiendo a su vez la evaluación de situaciones futuras, mediante el análisis de gestión dentro de un sistema de soporte a la decisión.

Para lograr esta integración, en la Figura 3.2 se plantean diversas mejoras en cuanto a los datos de partida y de las fortalezas y debilidades de los modelos actuales, mediante: (i) el análisis del balance de recursos hídricos con un enfoque de uso conjunto; (ii) separando las aportaciones superficiales y subterráneas mediante modelos lluvia-escorrentía acoplados a sistemas de soporte a la decisión y a modelos de flujo subterráneo, evitando la duplicidad de recursos; (iii) afinando los parámetros hidrogeológicos de los modelos de flujo subterráneo utilizados, permitiendo reflejar eficientemente los volúmenes de

intercambio dados en las relaciones río-acuífero del sistema modelado; (iv) evaluando eficientemente las relaciones río-acuífero presentes en el intercambio volumétrico entre masas de agua superficial y subterráneas.

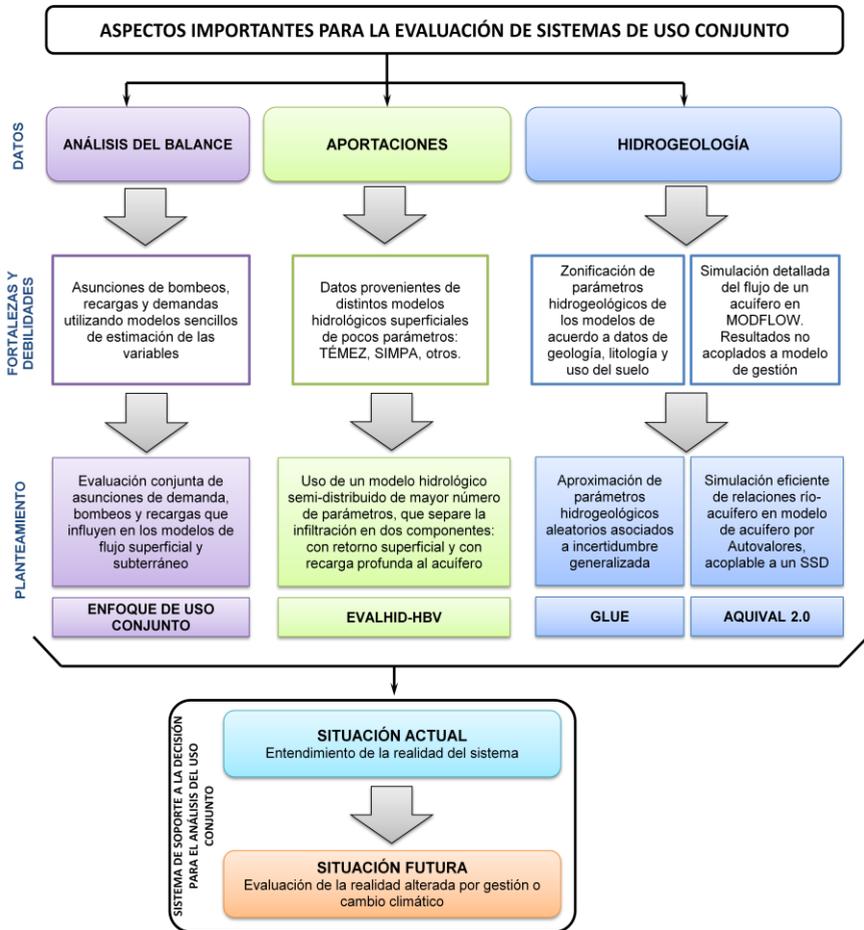


Figura 3.2. Planteamiento para la evaluación de un sistema de recursos hídricos con enfoque de uso conjunto. Fuente: Adaptada de Solera (2010) y Elaboración propia.

Una metodología genérica que integre los aspectos importantes de la evaluación del uso conjunto en cuencas complejas, debe considerar las características principales de los fenómenos naturales que se desean modelar y su integración con modelos de flujo superficial y subterráneo, sin perder de vista la interacción natural presente entre los mismos. En este sentido, es de interés lograr una calibración conjunta de los modelos de flujo superficial y subterráneo, en función de la interacción de datos de entrada y resultados que los mismos generan.

Por tanto, las características principales de los modelos de acuífero usados para su integración en sistemas de uso conjunto son: (i) que

permitan evaluar eficientemente el flujo subterráneo, la conexión entre masas superficiales y subterráneas y las relaciones río-acuífero, (ii) su fácil integración en un sistema de análisis de gestión y soporte a la decisión y (iii) que puedan ser generalizados a cuencas complejas y de grandes dimensiones.

En este sentido la Figura 3.3 presenta un esquema genérico y simplificado de los aspectos a considerar en la integración de modelos de acuíferos en sistemas de uso conjunto. El esquema describe de manera generalizada los siguientes pasos:

- i. Realizar análisis integral y conjunto del balance de recursos hídricos.
- ii. Proponer un modelo hidrológico de tipo superficial, de mayor o menor complejidad, en función del análisis previo, el entendimiento del funcionamiento del sistema conjunto y los datos disponibles. Dicho modelo debe considerar lo siguiente:
 - a. La conformación de unidades y sub-unidades superficiales, calibradas con datos restituidos a régimen natural.
 - b. La existencia de sub-unidades superficiales específicas, conectadas con masas subterráneas a las que aporta directamente recarga.
 - c. Tiene que ser capaz de dividir las aportaciones superficiales y subterráneas del sistema.
 - d. Ambas aportaciones deben estar relacionadas y ser directamente acoplables a un modelo de evaluación del uso conjunto.
- iii. Proponer un modelo hidrológico de tipo subterráneo, acoplable al modelo de evaluación conjunta, que considere principalmente los aspectos siguientes:
 - a. Una formulación o estructura del acuífero a simular en el modelo de flujo subterráneo.
 - b. Unos parámetros hidrogeológicos iniciales, en función del análisis integral previamente hecho.
 - c. Una hipótesis de recarga proveniente del modelo superficial.
 - d. Una formulación integrada al modelo hidrológico subterráneo, que permita la simulación eficiente de relaciones río-acuífero.
- iv. Comparar los resultados obtenidos de la simulación del modelo de acuífero respecto de las variables observadas (niveles piezométricos, caudales de descarga, variación volumétrica en masas subterráneas, etc.). El resultado de esta comparación será:
 - a. Si se reproducen las variables observadas, por tanto, los parámetros del modelo de acuífero estarán calibrados y son útiles para su integración directa en

un modelo de uso conjunto, así como las aportaciones definidas por los modelos hidrológicos superficiales calibrados en pasos anteriores.

- b. No se reproducen las variables observadas, por tanto, es necesario revisar el planteamiento del modelo hidrológico superficial y su consecuente hipótesis de recarga, así como los parámetros del modelo de acuífero y (en última instancia), su formulación.

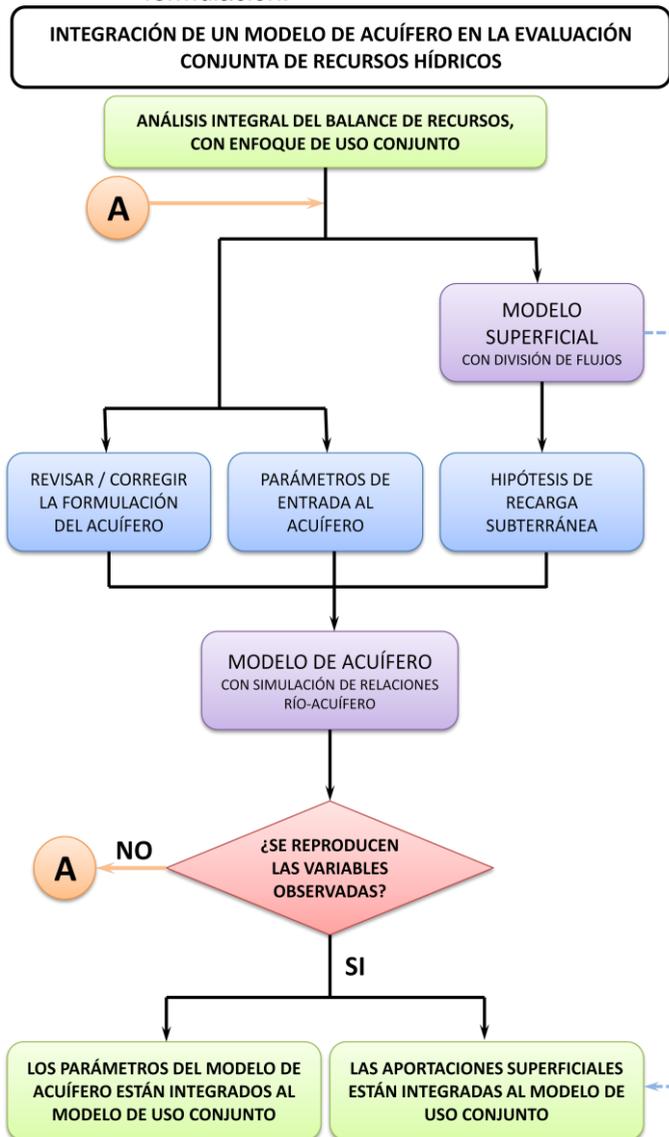


Figura 3.3. Esquema genérico de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se realiza una descripción más detallada de la metodología propuesta para la integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto. En el esquema de la Figura 3.4 se muestra el proceso de calibración y simulación conjunta de una cuenca hidrológica, en base a sus modelos hidrológicos utilizados para dicho fin. El proceso describe aproximaciones sucesivas de calibración, en función de los objetivos de análisis del uso conjunto, la disponibilidad de datos y la habilidad del modelador para utilizar las herramientas propuestas.

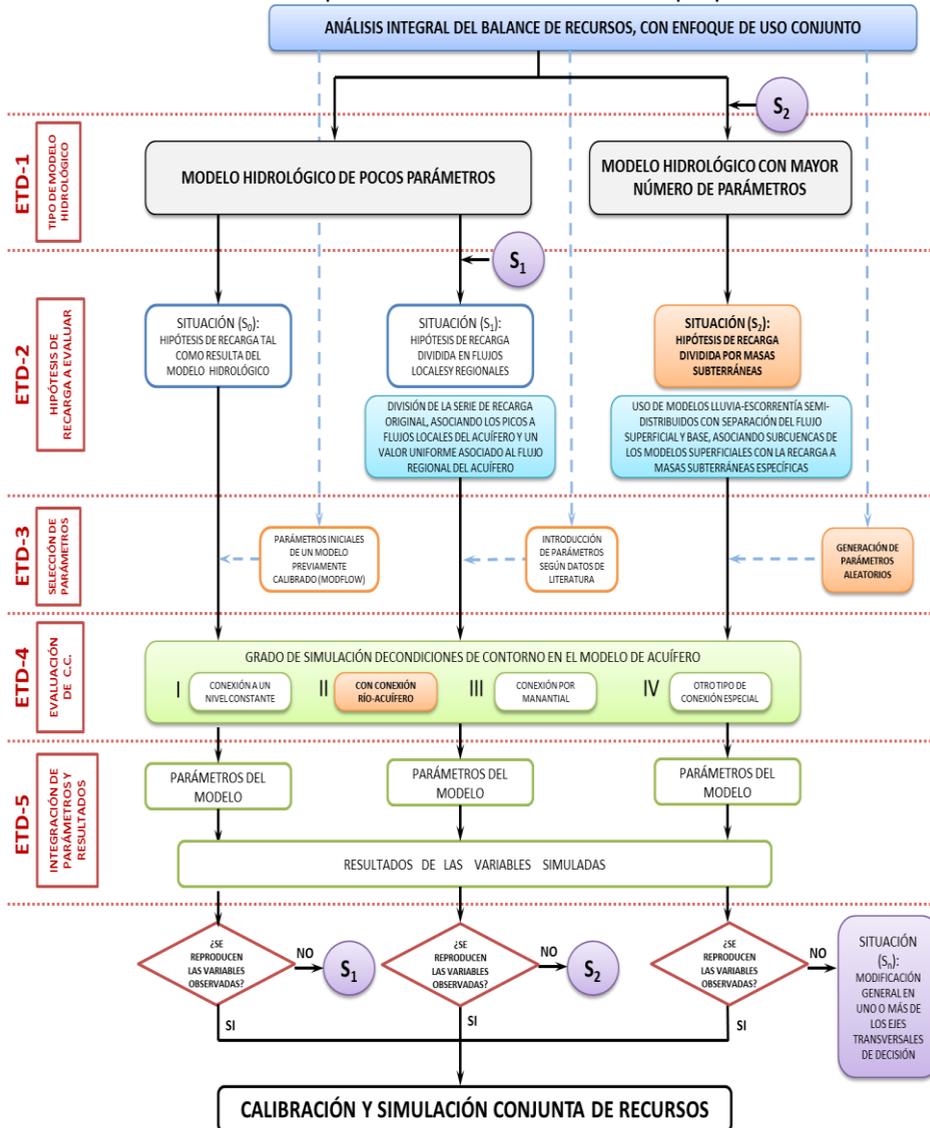


Figura 3.4. Esquema genérico usado para la calibración y simulación conjunta de recursos hídricos en una cuenca compleja. Fuente: Elaboración propia.

Básicamente son mostradas tres alternativas de calibración, partiendo desde la situación más sencilla (modelo hidrológico de pocos parámetros y modelo subterráneo sin evaluación de relaciones río-acuífero), hasta la más compleja (modelo hidrológico superficial de mayor número de parámetros, con separación de aportaciones, modelo subterráneo con evaluación de relaciones río-acuífero e interacción entre masas superficiales y subterráneas).

Dentro de la metodología propuesta existen ejes transversales de decisión (ETD), como lo son: (i) el tipo de modelo hidrológico a emplear, (ii) la hipótesis de recarga a evaluar, (iii) la selección y tratamiento de los parámetros hidrogeológicos, (iv) la evaluación de condiciones de contorno para la simulación conjunta (conexión a un nivel constante, conexión con manantial, conexión río-acuífero, otro) y finalmente (v) la integración de los parámetros del modelo subterráneo y sus resultados a modelos de gestión.

De forma generalizada, la metodología propuesta para la integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto (Figura 3.4) sigue los pasos descritos a continuación:

- i. Realizar un análisis integral del balance de recursos, con enfoque de uso conjunto del agua.
- ii. Calibrar un modelo hidrológico superficial (de pocos o muchos parámetros), con independencia del modelo subterráneo
- iii. Adaptar un modelo en Diferencias Finitas a un modelo por Autovalores, el cual será directamente acoplable a modelos de gestión y análisis de uso conjunto.
- iv. Proponer hipótesis de recarga a evaluar en modelo subterráneo adaptado, de acuerdo a los objetivos del análisis conjunto.
- v. Seleccionar y evaluar distintos parámetros hidrogeológicos y (si es requerido), implementar una herramienta de generación aleatoria y evaluación de parámetros.
- vi. Determinar el grado y tipo de simulación de condiciones de contorno a evaluar, según los objetivos del análisis conjunto.
- vii. Formular y comprobar el balance general de recursos, agregando y comparando los valores simulados de las variables de los modelos superficial y subterráneo con los valores observados de las mismas.
- viii. Extraer los parámetros que definen el comportamiento del modelo subterráneo, para su migración a un modelo de gestión y análisis de uso conjunto.
- ix. En caso de no reproducir las variables observadas con el modelo subterráneo, deberán hacerse nuevas propuestas en los ETD, mejorando los siguientes aspectos:
 - a. Mayor complejidad en el tipo de modelo hidrológico superficial que separa las aportaciones superficiales de las subterráneas

- b. Mayor complejidad y/o mezcla de hipótesis de recarga a evaluar
- c. Implementación de herramientas automáticas de generación y evaluación de parámetros hidrogeológicos para el modelo de acuífero utilizado
- d. Mayor grado de simulación de condiciones de contorno y/o reestructuración del esquema general del modelo de acuífero utilizado
- e. Decisión sobre qué variables simuladas, bajo los parámetros dados, se requiere llevar al modelo de gestión y análisis de uso conjunto

3.3. APORTACIÓN A PROCESOS DE LA METODOLOGÍA

Dentro del proceso de simulación de la gestión y uso conjunto en un sistema general de análisis, existen las componentes de simulación superficial y subterránea del sistema estudiado, las cuales pueden ser evaluadas y/o calibradas con distintas herramientas. Como parte de la metodología de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto, en los apartados siguientes se describen las aportaciones específicas que se han realizado dentro de los módulos de simulación y calibración (Figura 3.5), los cuales también son descritos en mayor detalle en los Anejos de esta tesis.

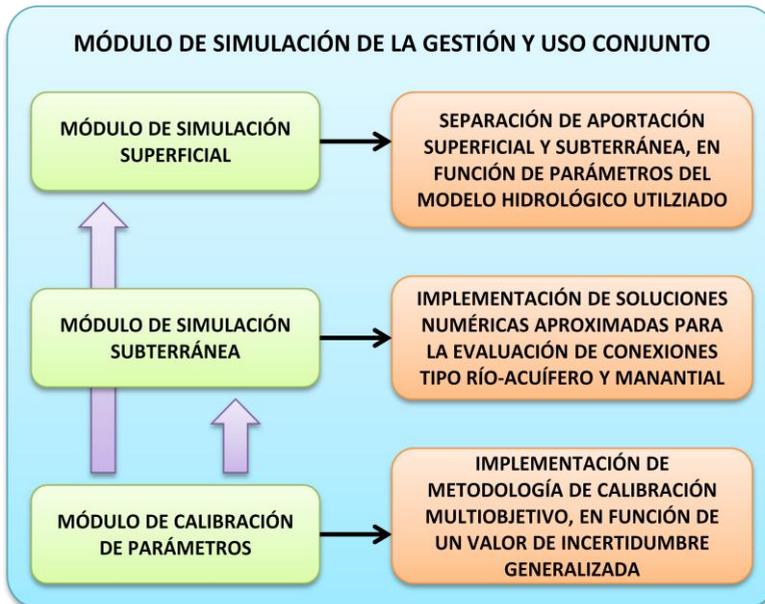


Figura 3.5. Aportaciones realizadas a distintos procesos dentro del módulo general de simulación de la gestión y uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Adecuación de la herramienta de estimación de aportaciones

Dentro del análisis de sistemas de recursos hídricos, la estimación de aportaciones es un aspecto fundamental para la planificación y gestión, pudiendo utilizar para este propósito las metodologías de restitución a régimen natural o la modelación lluvia-escorrentía.

Los modelos lluvia-escorrentía suelen aglutinar la simulación de masas superficiales y subterráneas con una misma extensión y correspondencia, evaluando en mayor detalle los procesos hidrológicos superficiales. El problema surge al intentar evaluar la recarga para un acuífero cuya extensión excede las dimensiones de una cuenca superficial, por lo que el planteamiento propuesto se basa en la separación del modelo subterráneo respecto del proceso de calibración del(los) modelo(s) lluvia-escorrentía asociados a la totalidad del acuífero evaluado.

En este apartado se expone la adecuación hecha al modelo hidrológico HBV (1987) dentro de la herramienta EVALHID (2012), para lograr la separación de la recarga subterránea de la aportación superficial, dentro de una serie de modelos lluvia-escorrentía implementados con un enfoque de uso conjunto. La adecuación se basa en el forzamiento de los parámetros de los modelos superficiales (de tipo HBV), dentro de rangos razonables, con el propósito de:

- i. Realizar una separación entre las componentes de flujo superficial y subterráneo.
- ii. Verificar la hipótesis de reparto de la recarga por sub-cuencas, asociada a masas subterráneas y ligada a un modelo de acuífero por Autovalores.
- iii. Obtener conjuntamente la serie de aportación superficial y la serie de recarga válida para la simulación de un modelo de acuífero por Autovalores a usar en modelos de gestión y simulación conjunta de recursos hídricos.

La herramienta EVALHID es un módulo informático que aglutina distintos modelos lluvia-escorrentía, usados en función de la disponibilidad de datos, la complejidad de la cuenca y la habilidad técnica para su manejo y entendimiento. Los modelos que utiliza la herramienta son de tipo agregado, con aplicación semi-distribuida y sus resultados son directamente acoplados a un sistema general de análisis de gestión.

Las cuencas modeladas con esta herramienta son divididas en sub-cuencas en las que se plantea alguno de los modelos hidrológicos disponibles (de mayor o menor complejidad y número de parámetros). Dichos modelos requieren de datos temporales de temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial, superficie de cuenca, etc.

Además, son requeridos datos de aforos, que deben ser restituidos a régimen natural, para lograr una correcta calibración de los parámetros de cada modelo. Estos modelos pueden ser usados para la determinación de las aportaciones superficiales de las cuencas simuladas, junto con la infiltración asociada a cierta masa subterránea.

La adecuación propuesta para la estimación selectiva de infiltración en el modelo HBV se muestra en la Figura 3.6.

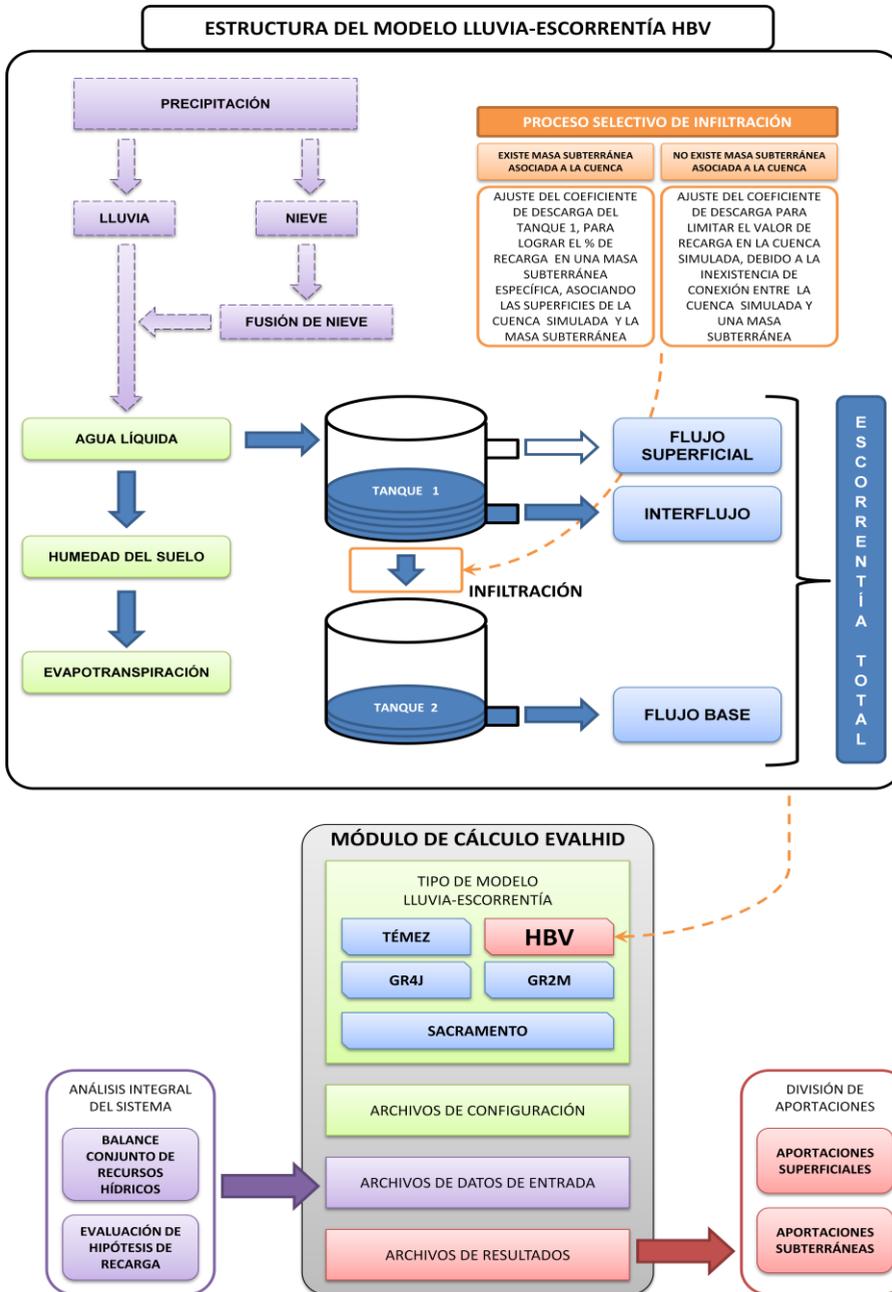


Figura 3.6. Adecuación propuesta en el modelo de aportaciones HBV para la evaluación del recurso hídrico en términos del uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Soluciones numéricas aproximadas desarrolladas para la evaluación eficiente de condiciones de contorno no lineales con el método de Autovalores

El estado de un acuífero puede tener distintas situaciones dispares, como la presencia de períodos de sobreexplotación en época de sequía o de niveles piezométricos muy altos ante períodos húmedos. Dada la inercia del flujo en los sistemas acuíferos, la consecuencia de un período húmedo o seco, así como la de períodos de mayor o menor extracción, pueden mezclarse y modificar drásticamente los valores observados de las variables de interés (caudales, niveles, volúmenes, etc.). En la planificación y estudio de cuencas con enfoque de uso conjunto, suelen analizarse alternativas para la recuperación de niveles en sistemas acuíferos de interés, bajo una tendencia próxima a un régimen natural, teniendo como punto de partida el estado actual del sistema (comúnmente cercano ya a la sobreexplotación).

Desde el punto de vista de la modelación subterránea, la presencia de grandes oscilaciones en los niveles piezométricos de un acuífero, tienden a cambiar radicalmente la forma en que deben calcularse el intercambio de flujo en el medio, es decir, las condiciones de conexión entre masas y su forma de cálculo. Por tanto, las condiciones de contorno de una misma zona podrían variar a lo largo del tiempo, en función de condiciones de humedad o sequía y/o mayor o menor extracción a que esté sometido de manera general un sistema acuífero.

La solución general de las ecuaciones de flujo queda definida cuando se le asignan propiedades permanentes, es decir, condiciones iniciales y de contorno invariantes en el tiempo. Sin embargo, como ya se expuso anteriormente, las condiciones de contorno de un mismo sitio pueden cambiar a lo largo del tiempo, cuando tratamos con problemas de simulación de la gestión y uso conjunto. Herramientas de modelación de acuíferos con mayor complejidad, como es el caso de MODFLOW, han implementado soluciones, que son resueltas dentro de la discretización en diferencias finitas, pero tienen como limitante el excesivo tiempo de cálculo en para modelos complejos y la no compatibilidad con modelos de flujo superficial y los sistemas de análisis de gestión y uso conjunto. Por tanto es necesario implementar una mejora en las formulaciones adecuadas, de manera que se pueda lidiar con este problema.

Una alternativa para lograr simular el régimen natural y alterado de un sistema acuífero, es el uso de modelos de flujo subterráneo de pocos parámetros y de simulación eficiente en términos de tiempo de cálculo. La adopción de estas características ya está contemplada dentro de la formulación de las ecuaciones de flujo en medio saturado desarrolladas en términos de Autovalores, no así características especiales como la evaluación de intercambio de caudal en relaciones río-acuífero o conexión de manantial, las cuales representan un cierto tipo de condición de contorno no lineal.

Al ser una condición no lineal, su tratamiento directo por la técnica de Autovalores se ve limitado, sin embargo en este apartado son presentadas un conjunto de soluciones numéricas aproximadas, que han

sido integradas en un módulo de flujo subterráneo existente, acoplado en un sistema de análisis de gestión y uso conjunto. La adecuación realizada permite mejorar la evaluación del uso conjunto en sistemas de recursos hídricos, mediante la linealización de la evaluación de relaciones río-acuífero.

La linealización de las condiciones de contorno se logra mediante un proceso de cálculo iterativo, el cual resuelve simultáneamente las matrices de descenso piezométrico (asociadas a la corrección de la altura de conexión entre río y acuífero, y un caudal ficticio de entrada o salida dado por la conexión río-acuífero), que permiten equilibrar la ecuación de flujo y la conservación de masa en el sistema analizado. Los elementos de las matrices de descenso están constituidos por las propiedades de las celdas de acuífero en conexión con río/manantial y sus celdas adyacentes. Su solución se basa en el proceso iterativo de la técnica de descomposición matricial LU (1975). Los casos presentados son para celdas de acuífero con nivel de conexión constante y distinta de cero (en referencia de Autovalores), considerando: (i) la presencia de una conexión perfecta para la descarga de caudal, dada entre la celda de acuífero y manantial/río; y (ii) la presencia de una conexión imperfecta entre las celdas.

Los resultados obtenidos con un modelo de acuífero resuelto por la técnica de Autovalores son referentes a la modelación propia del acuífero (caudales, niveles, volúmenes) y los necesarios para la simulación de la gestión y uso conjunto dentro de un sistema general. En la Figura 3.7 se muestra la inclusión de estas soluciones y los tipos de resultados obtenidos dentro del módulo de cálculo subterráneo acoplado a un sistema de análisis de gestión.

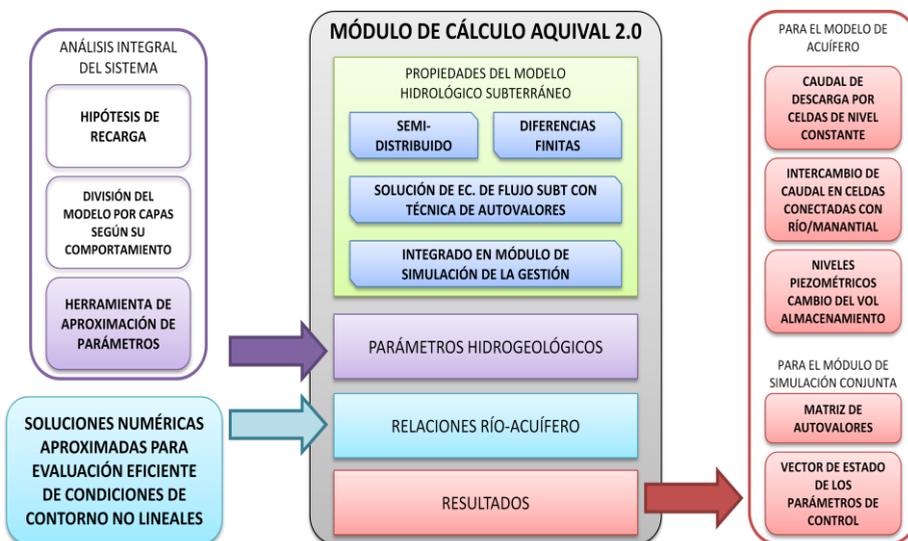


Figura 3.7. Integración de soluciones numéricas aproximadas en modelos de acuífero de sistemas de uso conjunto. Fuente: Elaboración propia.

El planteamiento se basa en lo siguiente: Si se considera un caso sencillo, como la conexión hidráulica de una celda de acuífero con descarga por un manantial, cuando el nivel del acuífero ascienda a una cota superior a la del terreno, se tendrá un comportamiento similar al de un acuífero de tipo libre. En la zona de conexión de la celda del acuífero y el manantial se producirá un drenaje (por diferencia de alturas piezométricas) y este drenaje desaparecerá cuando el nivel descienda por debajo de la cota de descarga del manantial.

Esta condición de contorno no ha sido contemplada en la formulación general de Autovalores, por lo que se plantea evaluarla mediante una aproximación de corrección de descensos en celdas de este tipo, dentro de modelos de acuífero integrados a sistemas de uso conjunto.

Primero se analizará la formulación para celdas con conexión perfecta. Posteriormente se revisará la formulación particular para el caso de celdas en conexión imperfecta (con limitante en el flujo entre río/manantial y el acuífero) y finalmente se planteará la solución general del problema. Una vez establecidas las formulaciones matemáticas, el siguiente paso del planteamiento es presentar una solución computacional que permita la evaluación eficiente de este tipo de condición de contorno no lineal.

3.3.2.1. Caso de celdas de acuífero con nivel de descarga constante (distinto de cero) y conexión hidráulica perfecta

La solución de alturas piezométricas en el problema de Autovalores, de acuerdo a Sahuquillo (2010c), viene dada por la fórmula:

$$h_i^*(t) = h_i^*(t - 1) * e^{-\alpha_i t} + \sum_{a=1}^n Q_a * \psi_{i,a}, \quad [E 3.1]$$

Donde $h_i^*(t)$, representa las alturas piezométricas de interés, proveniente de la matriz reducida de parámetros de control.

El planteamiento consiste en calcular el volumen de agua que se necesitaría extraer y/o suministrar en una determinada celda del acuífero, tal que como resultado de su aplicación, se obtenga una altura en dicha celda igual a la que proporcionaría el manantial en el caso real. Los pasos para evaluar este tipo de condición son:

- i. Determinar la altura (h) en la celda i , considerándola como una celda normal, usando la ecuación [E 3.1].
- ii. Calcular la diferencia entre la altura simulada (h_i) y la altura de conexión (hc_i) con la expresión: $\Delta h_i = h_i - hc_i$.
- iii. Calcular el volumen de agua que debe extraerse/aportarse en la celda en cuestión durante un paso de tiempo (t), para causar un descenso/incremento igual a la diferencia anterior (Δh_i).
- iv. Simular un nuevo vector de estado (\bar{L}_t^*) del acuífero, bajo el efecto de la extracción/aportación de agua del paso anterior.

De acuerdo con la estructura de la técnica de Autovalores, se propone que los cálculos anteriores se realicen de manera más rápida y eficiente, realizando previamente los siguientes pasos:

- Para calcular (i), se propone el uso de una acción elemental consistente en un bombeo/recarga, aplicada en la celda evaluada.
- Para calcular (ii), se propone utilizar un parámetro de control que proporcione la altura de conexión en la celda evaluada.
- Para obtener (iii), el descenso en la celda i debido a un bombeo unitario en la misma, se propone su cálculo mediante la expresión:

$$d_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}^2 * \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k}.$$

- En el caso de considerar varias celdas de contorno, un bombeo en una celda i afecta al nivel en la celda contigua j . Por tanto se debe resolver conjuntamente para todas las celdas de contorno. Dado un bombeo unitario en una celda j , se propone calcular el descenso correspondiente en la celda i (d_{ij}), mediante la expresión:

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} * a_{jk} * \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k} = \sum_{k=1}^n a_{ik} * X_{kj}, \quad [E 3.2]$$

Donde:

a_{ik}, a_{jk} , son los términos i y j del Autovector k que afectan el descenso en celdas i y j , con condiciones de contorno no lineales.

α_k , representa el Autovalor k .

X_{kj} , es parte de la solución de altura piezométrica, para la celda j en función de la acción elemental k .

La expresión propuesta [E 3.2], formulada para todas las celdas de contorno en que se evalúe la condición estudiada, permite construir una matriz $[D_{ij}]$ con la que se calcularía el vector de extracciones/aportaciones (\bar{B}_j) en las celdas de contorno, expresándolo como:

$$[D_{i,j_n}] * (\bar{B}_j) = [h'_{i_n} - h_{i_n}], \text{ donde:} \quad [E 3.3]$$

$[D_{i,j_n}]$, es una matriz propuesta para el cálculo de descensos en la celda i , debido a la acción de un bombeo unitario en una celda adjunta j .

(\bar{B}_j) , es el vector incógnita que representa el bombeo a aplicar en la celda j .

$[h'_{i_n} - h_{i_n}]$, representa el vector de diferencia de alturas entre los niveles de la celda i , cuando se considera el nivel que debería existir en la condición de contorno no nula y el nivel si no es considerada la condición.

3.3.2.2. *Caso de celdas de acuífero con nivel de descarga constante (distinto de cero) y conexión hidráulica imperfecta*

Cuando la conexión con el punto de descarga está limitada por un contorno semipermeable y alcanza una pequeña parte de la celda, el flujo intercambiado con el nivel externo se ve limitado hidráulicamente. Por tanto, las formulaciones propuestas anteriormente en [E 3.2] y [E 3.3] deben modificarse, ya que el nivel en la celda de contorno a final del periodo no llega a ser el nivel de contorno. Esta altura en la celda analizada se puede estimar como la que daría el caudal teórico si existiese conexión.

De acuerdo a Sahuquillo (2010c), la formulación en Autovalores para determinar el caudal de salida por celdas no nulas con conexión imperfecta está dada por la ecuación [E 3.4]. Si se expresa con el cálculo del bombeo en la celda según las expresiones anteriores, se tendría la ecuación [E 3.5].

Despejando h_{C_j} y sustituyendo en [E 3.4] se obtiene la ecuación [E 3.6] con la que se propone el cálculo de la extracción/recarga en la celda de contorno con conexión imperfecta, para que se cumpla la condición indicada. Si se utiliza la estructura del sistema de ecuaciones de [E 3.3], se logra la expresión [E 3.7].

$$Q_{m_j} = T_{m_j} (h_{C_j} - \bar{h}_j) \quad [E 3.4]$$

$$Q_j = (h_{m_j}^* - h_{C_j})/d_{m_j} \quad [E 3.5]$$

$$Q_{m_j} = \frac{T_{m_j}}{1+T_{m_j}d_{m_j}} (h_{m_j}^* - \bar{h}_j) \quad [E 3.6]$$

$$\left(\frac{1}{T_{m_j}} + d_{m_j}\right) Q_{m_j} = (h_{m_j}^* - \bar{h}_j) \quad [E 3.7]$$

La expresión [E 3.6] propuesta, representa la cantidad de caudal necesario a extraer/aportar, que permitiría calcular el valor definitivo de la altura en la celda con conexión imperfecta considerada. Dicha fórmula debe incluirse en una expresión similar a la ecuación [E 3.1], quedando como:

$$h_j^*(t) = h_j^*(t-1) - Q_{m_j} * (\bar{\psi}_j^*), \quad [E 3.8]$$

Donde:

T_m , representa la conductancia de la celda j , de tipo río y/o manantial.

h_C , es la altura de conexión en la celda j . Que si es de tipo manantial, con el nivel por debajo de esta el caudal es nulo y si es de tipo río se invierte el sentido del flujo.

\bar{h} , es la altura piezométrica en la celda j , de tipo río y/o manantial.

d_m , representa el descenso que se produce en la celda j , de tipo río y/o manantial al aplicarle un bombeo unitario, calculable con la ecuación propuesta [E 3.2].

Q_m , es el caudal necesario a aplicar en la celda j , de tipo río y/o manantial para que se iguale la altura piezométrica obtenida antes y después de considerar el descenso a corregir en la celda j , calculado con la expresión propuesta [E 3.6].

h_m^* , es la altura provisional de la celda j , que resulta de la multiplicación del Autovector de esa celda por su altura piezométrica cuando no se considera la condición tipo río y/o manantial.

Nuevamente, ante la presencia de más de una celda con conexión imperfecta, el proceso anterior sigue siendo válido, con las siguientes consideraciones propuestas:

- i. La ecuación propuesta que proporcionará la altura final en la celda m_i , se puede expresar como:

$$\sum_j d_{m_i} * b_j = [h_{m_i}^* - h_{C_{m_i}}], \text{ donde:}$$

$h_{C_{m_i}}$ es la altura que ha de alcanzar la celda en contacto con el nivel externo.

- ii. Se sustituye $h_{C_{m_i}}$ por su expresión deducida en [E 3.7], de donde se obtiene la expresión:

$$\sum_j d_{m_i} * b_j = [h'_{m_i} - \frac{1}{T_{m_i}} b_{m_i} - \bar{h}_{m_i}] \quad [E 3.9]$$

Al cambiar el término b_j al lado izquierdo de la ecuación quedaría la misma expresión inicial donde al término m_i de la diagonal se le sumaría el coeficiente $1/T_{m_i}$.

Para obtener el caudal de salida por las celdas tipo río y/o manantial (en conexión imperfecta), es necesario conocer el valor de conductancia T_{m_i} , que es usada en [E 3.9]. El cálculo de este valor se propone mediante una expresión similar a la de la formulación propuesta en ModFlow (McDonald y Harbaug, 1988), que evalúa la conductancia en la base de un río con la expresión:

$$T_{m_j} = \frac{K_m L_m a_m}{e_m}, \quad [E 3.10]$$

Donde:

K_m , representa la conductividad del material del lecho del río.

L_m, a_m, e_m , son las dimensiones de longitud, ancho y espesor del lecho del río.

En resumen, generalizando la formulación para un problema con múltiples celdas de conexión imperfecta y contornos impermeables, los

términos (\bar{d}_{ij}) de la matriz $[D_{ij}]$ se construyen como se indica en la expresión propuesta en [E 3.2], para todos los términos que quedan fuera de la diagonal ($i \neq j$). Los términos de la diagonal principal se construyen de igual forma, ya sea si se trata de una celda de contorno con conexión perfecta o si se tiene conexión imperfecta. Pero, en específico, para el caso de conexión imperfecta, se propone la anexión de un sumando con el término: $1/T_{m_i}$, siendo T_{m_i} la conductancia en el contacto de la celda m_i con el nivel externo en esta celda, calculada con [E 3.10].

El sistema de ecuaciones propuesto será válido mientras se mantenga activa la condición de contorno. Sin embargo, si el nivel piezométrico en la celda evaluada desciende por debajo de la altura de conexión h_c (para celdas tipo manantial) o por debajo de un nivel inferior en el cual se produzca una desconexión (en celdas tipo río), entonces esta celda dejaría de comportarse como una celda de contorno y debe ser retirada del sistema de ecuaciones.

La particularidad del cambio en el tipo de conexión hace necesario modificar el sistema de ecuaciones en [E 3.3], eliminando de esta los términos correspondientes a la(s) celda(s) desconectada(s). Por tanto, en la matriz $[D_{ij}]$ debe quitarse la fila y columna correspondiente.

Para lograr esta eliminación de celdas que cambian su condición de conexión, se propone la revisión de desconexión de las celdas evaluadas originalmente, almacenando las distintas configuraciones que se pueden presentar de celdas en conexión o desconexión, las cuales tendrán asociados unos respectivos vectores de estado (L).

La Figura 3.8 resume los pasos a seguir para la evaluación de condiciones de contorno no lineales presentes en celdas de acuífero con relación río-acuífero, bajo hipótesis de conexión perfecta e imperfecta.

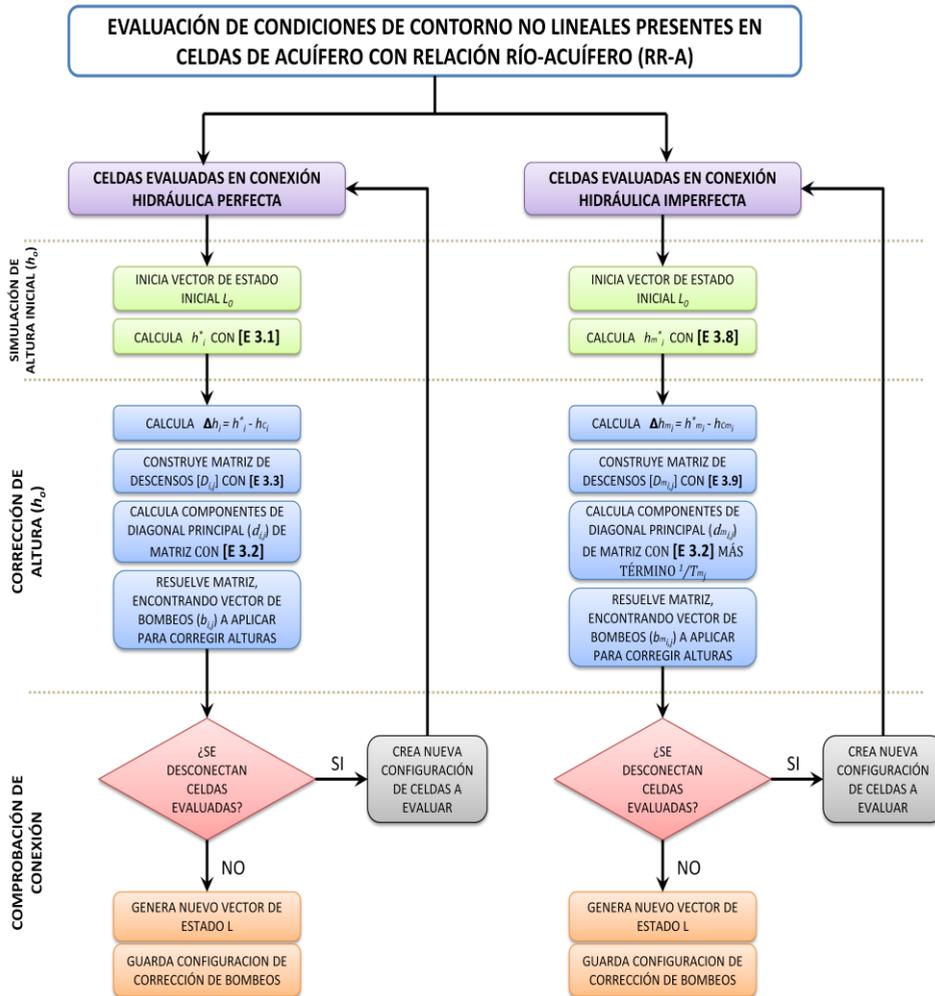


Figura 3.8. Evaluación de relación río-acuífero en celdas con conexión hidráulica perfecta e imperfecta del módulo AQUIVAL 2.0. . Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Uso de herramienta de aproximación de parámetros hidrogeológicos en modelo de acuífero por Autovalores

La calibración de parámetros de un modelo de simulación de flujo (superficial o subterráneo) es un problema complejo, el cual se vuelve aún más complejo al tratar de calibrar simultáneamente múltiples parámetros de distintos modelos. Este problema suele tratarse como un conjunto de procesos independientes, que se aglutinan al final como un problema resuelto por superposición lineal de resultados. Otra forma de tratarlo es mediante el uso de simplificaciones, como el aglomerado y uso uniforme de parámetros en zonas comunes de uno o más modelos

hidrológicos, lo que reduce el número de parámetros a evaluar, pero perdiendo precisión sobre la calibración detallada de las zonas en que se haya subdividido el modelo.

La adecuación propuesta para la calibración de los parámetros hidrogeológicos de un modelo de flujo subterráneo considera la aplicación de una metodología diseñada para tratar con problemas de múltiples parámetros y soluciones, como es el caso de la metodología GLUE (estimación de similitud bajo incertidumbre generalizada). El funcionamiento de la metodología, su aplicación al caso de estudio y sus resultados son expuestos en el Anejo 2.

La metodología propuesta (Figura 3.9) es completamente compatible con la modelación de acuíferos integrados en sistemas de uso conjunto, pudiéndose incluso utilizar para calibrar simultáneamente los modelos superficiales y el subterráneo. Sin embargo, en función de la complejidad de la cuenca analizada, las dimensiones de la misma, el número de datos y modelos superficiales a calibrar, la aplicabilidad de esta metodología u otra similar, requerirá necesariamente una intervención inteligente que la acote, oriente y perfile, de acuerdo a los objetivos de evaluación y análisis.

Se propone la aplicación de esta metodología para afinar o reducir la incertidumbre sobre el rango de variabilidad de los parámetros hidrogeológicos introducidos en un modelo de acuífero por Autovalores y los pasos que deben seguirse para su aplicación se muestran a continuación:

- i. Mediante un análisis integral del sistema estudiado, se determina la zonificación espacial de los parámetros hidrogeológicos y se definen los rangos máximo, medio y mínimo de los mismos, en función de las estructuras geológicas y estratigrafía del terreno analizado.
- ii. Se adecúa un código matemático (MATLAB) que permita:
(a) evaluar iterativamente x número de simulaciones, asociados a y conjuntos de parámetros aleatorios; (b) comparar resultados (observados vs simulados) y (c) asignar pesos de similitud de las simulaciones.
- iii. El código debe permitir la extracción de los mejores conjuntos de parámetros, que estarán asociados a un determinado intervalo de confianza (definido a criterio del experto evaluador)

Es de esperarse la presencia del fenómeno de Equiprobabilidad, por lo que es posible obtener conjuntos de parámetros distintos pero con pesos de similitud iguales. Por tanto, los conjuntos de parámetros que mejor simulen el comportamiento del acuífero modelado (según los valores observados utilizados como valores de contraste), deberán ver reducido su rango de variabilidad inicial. Finalmente, será posible tomar cualquier conjunto equiprobable de parámetros y darlo como válido, siendo los que se deberán introducir al modelo de acuífero por Autovalores a usar en los modelos de gestión del uso conjunto de recursos hídricos.

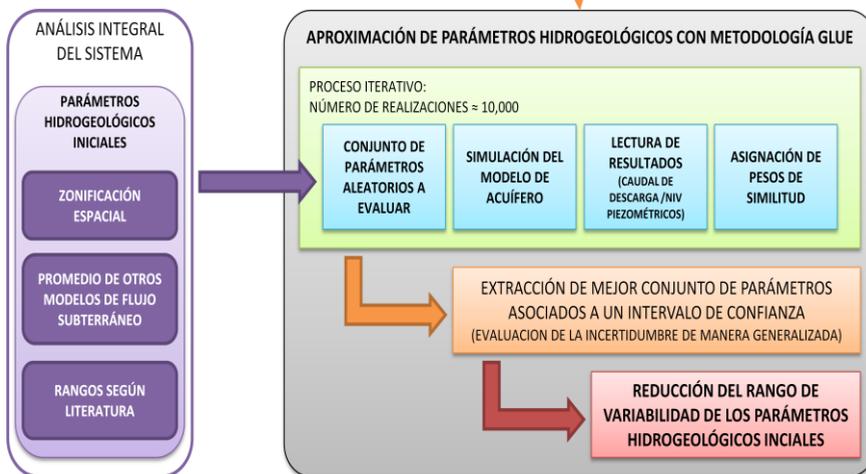
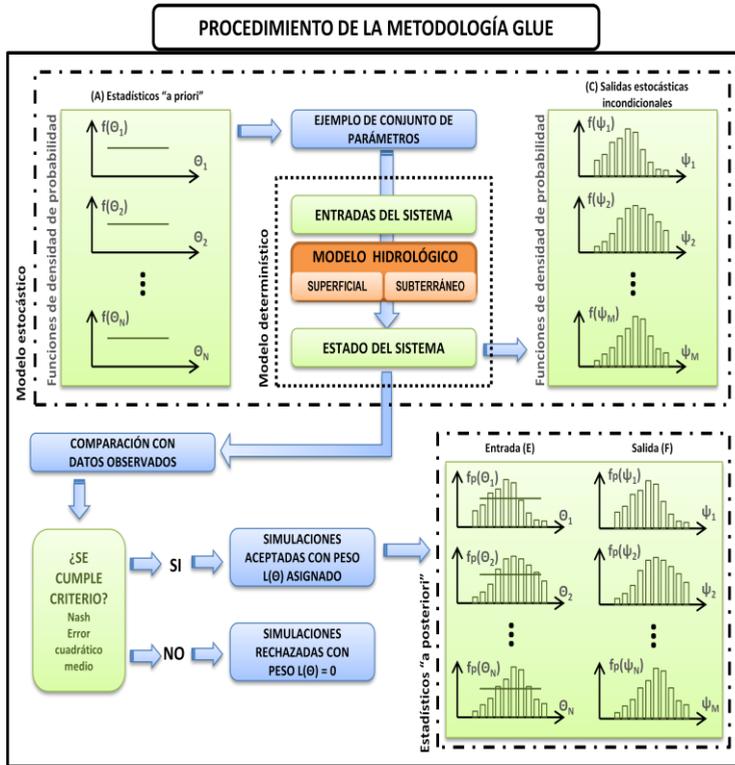


Figura 3.9. Aproximación de parámetros hidrogeológicos de un acuífero, en base al procedimiento de la metodología GLUE. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Adecuación de la metodología de evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas

Los modelos climáticos tienen como objetivo reproducir mediante expresiones matemáticas las variables que caracterizan al clima (precipitación y temperatura, por ejemplo), por medio del análisis de posibles climas futuros, asociados a escenarios climáticos de tipo predictivo. Para realizar un proceso de modelación climática predictiva, es necesario tener como base un escenario de variación climática futura, comúnmente asociada a escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, derivado del crecimiento poblacional y su desarrollo asociado.

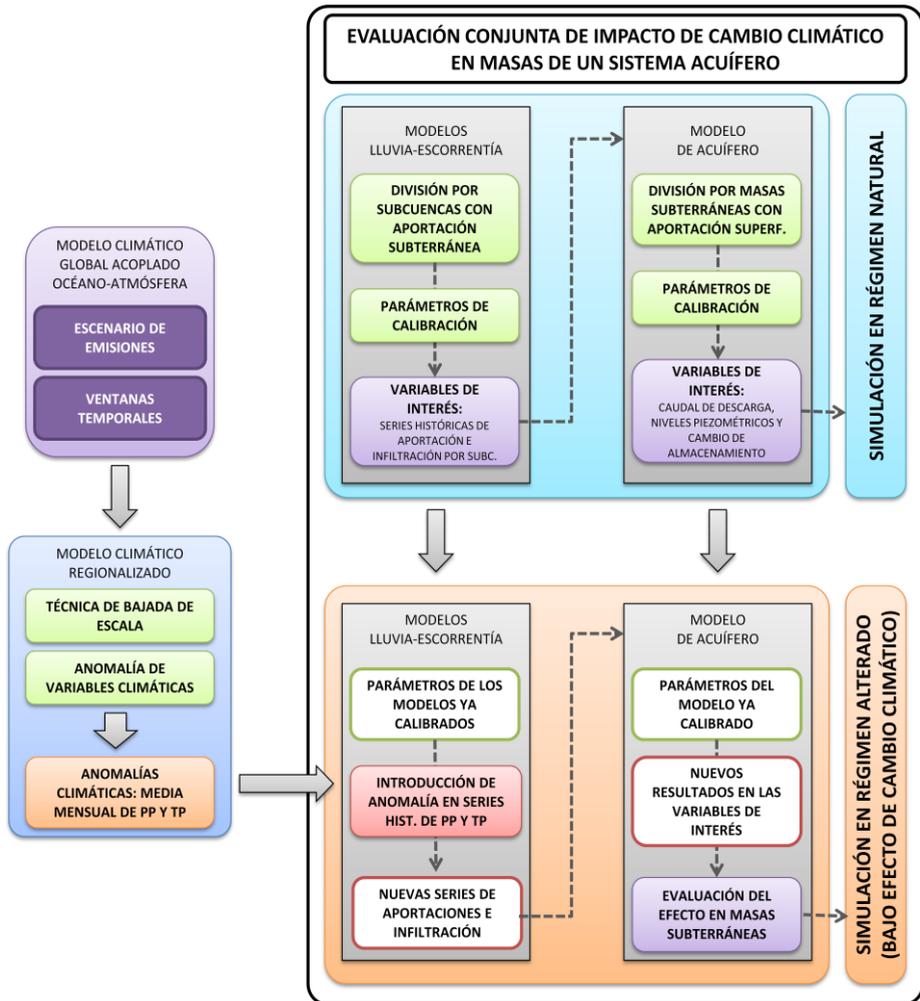


Figura 3.10. Evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas de un acuífero. Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de un proceso de modelación del clima histórico, donde el modelo empleado necesita ser calibrado, el proceso de simulación climática únicamente asocia una posible variación del clima futuro para las condiciones actuales de un modelo ya calibrado.

Tanto los modelos climáticos de circulación global acoplados océano atmósfera (MCGAO-A), como los de circulación regional (MCR), tienen asociado un escenario de emisión de gases de efecto invernadero. A partir de estos modelos climáticos, se generan escenarios de posibles fluctuaciones medias de las variables climáticas. Dichos escenarios son el producto final usado como dato de entrada a los modelos hidrológicos de una cuenca en las que se desea evaluar el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos.

Mediante la aplicación de un incremento o reducción mensual de las variables climáticas sobre los datos históricos y, suponiendo que en el futuro se presentarán con la misma estacionalidad y variabilidad, se asume que el clima futuro (bajo la influencia de los escenarios climáticos), repercutirá sobre las variables hidrológicas (evapotranspiración, escorrentía e infiltración) de una cuenca, de manera positiva o negativa, incrementando, reduciendo o acentuando la estacionalidad de las variables climáticas sobre la cuenca.

En este apartado se propone una adecuación de la metodología de evaluación de impacto de cambio climático regionalizado (Figura 3.10), asociando su efecto sobre masas subterráneas en un acuífero. Los modelos climáticos y las técnicas de bajada de escala utilizados para la estimación de la oscilación de las variables climáticas históricas producto del cambio climático, así como el análisis de su impacto sobre masas subterráneas de un caso de estudio son presentados en el Anejo 3.

3.4. FACTORES QUE HAN CONDUCIDO AL DESARROLLO METODOLÓGICO PROPUESTO

3.4.1. Papel de la metodología propuesta en la evaluación del uso conjunto en sistemas de explotación complejos

La metodología de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto permite abordar la modelación de sistemas superficiales y subterráneos complejos de manera conjunta. En esta metodología se hace énfasis en asociar la infiltración selectiva desde masas superficiales, la evaluación eficiente del intercambio de flujo entre las masas superficiales y subterráneas y la simulación conjunta de recursos en un sistema complejo con uso intensivo de aguas superficiales y subterráneas.

La metodología propone conectar los resultados de recarga proveniente de modelos superficiales de cuenca de tipo semi-distribuido, asociándola a las masas subterráneas subyacentes (en las que también se modela el flujo de manera semi-distribuida), detallando los parámetros

hidrogeológicos por masas subterráneas usados en un modelo de acuífero que sea capaz de evaluar condiciones de contorno no lineales (relaciones río-acuífero) de manera eficiente y suficientemente aproximada y que sea directamente acoplable a sistemas globales de análisis de gestión.

Se debe tomar en cuenta que en las masas subterráneas modeladas actúan no solo las entradas y salidas naturales del sistema acuífero, sino también las afecciones antrópicas (extracciones y recargas artificiales), las cuales deben ser calibradas para lograr la simulación de un régimen alterado que permita conocer el estado actual del sistema. Dicho régimen alterado (ya calibrado) se vuelve posteriormente el punto de partida para el análisis de escenarios futuros de un sistema.

El apartado referente al uso de una herramienta de aproximación de parámetros hidrogeológicos introduce una mejora en el proceso de calibración de un modelo de acuífero. La mejora consiste en la asignación de parámetros al modelo que, dado un intervalo de confianza, logre reproducir las variables observadas (caudales de descarga y/o niveles piezométricos). Al unir los resultados de esta herramienta particular (como paso previo) en la metodología de integración de acuíferos en sistemas de uso conjunto de recursos hídricos, se disminuye sustancialmente la necesidad de realizar pruebas manuales de ensayo y error, asociados a la simulación y calibración del modelo de acuífero.

El papel de la metodología propuesta es plantear una serie de pasos genéricos a seguir para lograr una correcta evaluación del uso conjunto de recursos en una cuenca hidrológica, que permita posteriormente lograr un análisis de la gestión conjunta de los sistemas de explotación de una zona de interés.

En resumen, la metodología propuesta presenta un marco para la evaluación conjunta de un sistema de recursos hídricos, mediante la integración de mejoras particulares para la simulación superficial y subterránea, con enfoque de uso conjunto, tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- i. El análisis del balance de recursos hídricos (con enfoque de uso conjunto).
- ii. En el uso de modelos y herramientas particulares de simulación conjunta del flujo superficial y subterráneo.
- iii. En la mejora del módulo de simulación subterránea, evaluando eficientemente el flujo dado celdas con relaciones río-acuífero y por celdas de nivel constante distinto de cero.

Finalmente, la metodología de integración propuesta (sus procesos, herramientas y modelos particulares presentados), resultan en un aporte significativo para la evaluación del uso conjunto de recursos hídricos en sistemas complejos de cuencas hidrológicas.

3.4.2. Factores asociados al desarrollo metodológico

El desarrollo de una metodología genérica de evaluación del uso conjunto en sistemas complejos de recursos hídricos surge debido a los factores siguientes:

- i. La existencia de desarrollos previos de evaluación conjunta en sistemas sencillos, bajo esquemas de modelación superficial y subterránea simplificados e independientes.
- ii. La necesidad de evaluar conjuntamente los valores de balance de recursos de un sistema de explotación complejo, primero en régimen natural y posteriormente, por superposición, en régimen alterado.
- iii. La necesidad de rediseñar y mejorar las herramientas de modelación subterránea usadas en sistemas globales de análisis de gestión conjunta, para lograr una mejor integración de sus resultados en esquemas de sistemas de soporte a la decisión
- iv. Trabajos previos sobre modelación subterránea para distintos casos de estudio, así como trabajos sobre la validación del funcionamiento de la herramienta de simulación de intercambio de flujo en conexiones río-acuífero (casos de acuíferos ficticios y sencillos), enmarcaron la metodología seguida para evaluar el uso conjunto en sistemas cada vez más complejos.
- v. La existencia de una línea de investigación consolidada de análisis de gestión conjunta y uso de sistemas de soporte a la toma de decisiones, que ha colaborado desde distintos enfoques en la integración y puesta a punto de la metodología y modelos particulares aplicados en la presente tesis.

"Una de las condiciones básicas del razonamiento científico es que las teorías deben ser apoyadas por los hechos".

Imre Lakatos.

CAPÍTULO 4

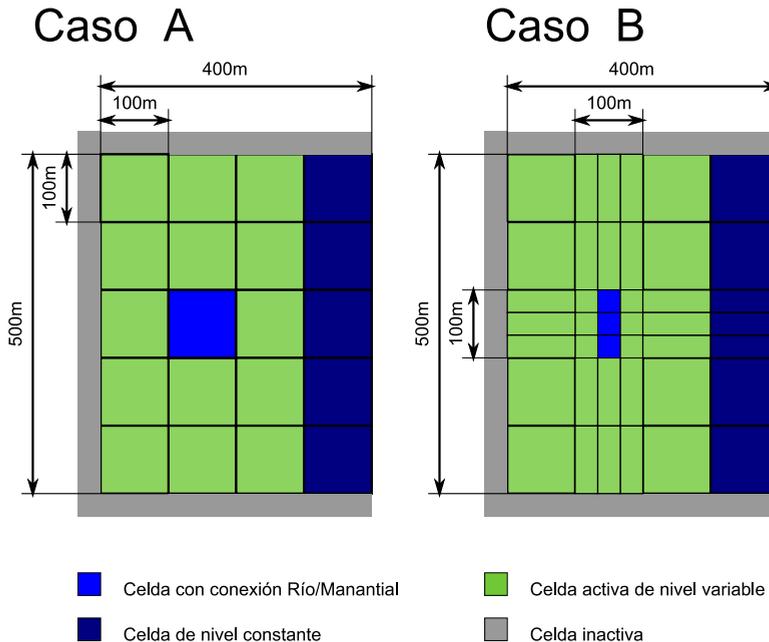
EJEMPLOS DE EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO NO LINEALES EN ACUÍFEROS CON INTERACCIÓN SINTÉTICA Y REAL DE RELACIONES RÍO-ACUÍFERO Y MANANTIAL

Como casos de referencia son presentados distintos modelos de acuífero resueltos por la técnica de Autovalores, desarrollada dentro del módulo AQUIVAL 2.0 (2011). Los casos de referencia son: (i) dos modelos sintéticos de evaluación de las condiciones de contorno no nulas de celdas de acuífero conectadas con ríos y/o manantial, contrastados con modelos de acuífero similares, resueltos con el software libre y comercial PMWIN-MODFLOW y, (ii) un modelo de acuífero por Autovalores desarrollado para estimar la descarga por manantiales en la conexión con el acuífero Beniardá-Polop (Alicante, España).

4.1. MODELOS DE ACUÍFERO SINTÉTICOS REGULARES

4.1.1. Características geométricas e hidrogeológicas

Los modelos sintéticos de acuífero (casos A y B) utilizados para evaluar las condiciones de contorno no nulas fueron discretizados de tal forma que pudiese ser evaluada la conexión de una o múltiples celdas de acuífero en conexión con ríos y/o manantiales. Las geometrías de los modelos sintéticos son simples, teniendo las mismas dimensiones generales (400 x 500m), tal como se muestra en las Figuras 4.1a y 4.1b.



Figuras 4.1a y 4.1b. Discretización de los acuíferos sintéticos por Autovalores.

El modelo sintético A tiene una configuración geométrica regular de 20 celdas de 100x100m y espesor uniforme de 100m, con bordes impermeables y de nivel constante en la porción derecha, el cual simula la conexión hidráulica con un cuerpo de agua. Adicionalmente, en la celda central (x_2, y_3), se evalúa la conexión del acuífero a una descarga por río/manantial. Por su parte, el modelo sintético B es un modelo de 42 celdas, sub-discretizado de tal forma que la misma celda central (x_2, y_3) del modelo A es sub-dividida en 9 celdas de tamaño menor, en donde 3 de las celdas centrales contiguas es evaluada también la conexión y descarga de un río/manantial por múltiples celdas. Dicha descarga debe ser similar a la obtenida en el caso sintético A, puesto que son evaluadas condiciones iniciales y de contorno similares. En ambos modelos se considera una recarga uniforme de 100m³/día, que tienen como salida las celdas de nivel constante y las celdas en conexión con río/manantial. Las propiedades de conductividad hidráulica (K) y almacenamiento (S) se consideran uniformes, del orden de: 10m/día y 0.001 respectivamente. Los valores de conductividad corresponden a una mezcla de arenas con rangos de conductividad de 1 a 50m/día, de acuerdo a Custodio y Llamas (1983); los valores de almacenamiento a materiales de tipo poroso intergranular de gravas y arenas, de acuerdo a Iglesias (1984), con rangos entre 1E-2 y 1E-4.

Como parámetros de control de los modelos sintéticos se toman en cuenta las alturas piezométricas para 3 zonas distintas y un promedio de varias celdas; el volumen total del acuífero (variación del

almacenamiento); el caudal de salida por las celdas de nivel constante y las celdas tipo río/manantial.

Para la obtención de un valor de conductancia razonable, necesario en el análisis del funcionamiento de las condiciones de contorno no nulas, se proponen las siguientes dimensiones de la zona de contacto con río/manantial y las celdas del acuífero consideradas:

- Una conductividad K_m del material permeable del lecho del río/manantial, distinto al del acuífero, correspondiente a un material arcilloso con valor medio de $1E-3$ m/día
- Una longitud de contacto L_m de 100m, para el caso de una sola celda y de 33.33m para el caso de 3 celdas tipo río/manantial
- Un ancho a_m de la zona de contacto de 50m
- Un espesor e_m del material permeable de 10m

Tomando en cuenta estas simplificaciones, el valor de la conductancia en las celdas tipo río/manantial se aproxima a $5m^2/día$ (para el caso sintético A) y de $1.667 m^2/día$ (para el caso sintético B), de acuerdo a la formulación propuesta por McDonald y Harbaug (1988), que evalúa la conductancia en la base de un río con la expresión [E 4.1].

Con estos valores de conductancia y una diferencia entre la altura piezométrica y la altura de descarga Δh de 10m, se obtendría un caudal de salida de $50m^3/día$ para ambos casos. Dicho caudal es aceptable, considerando que el valor de recarga es del orden de $100m^3/día$. Otras combinaciones de caudal de descarga por las celdas con conexión no nula, respecto a conductancia y Δh sobre la celda con conexión río/manantial, se muestran en la Figura 4.2.

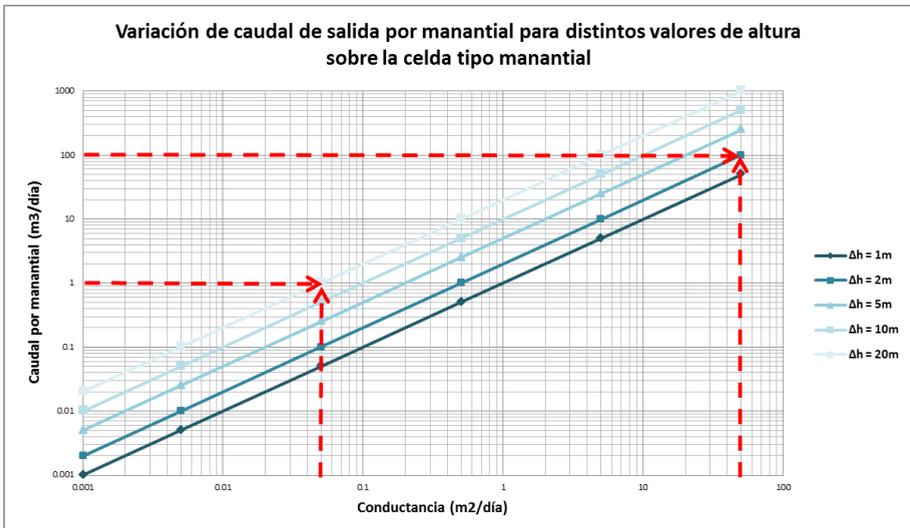


Figura 4.2. Variación del caudal de descarga por celdas de acuífero con conexión a río/manantial. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Análisis de eficiencia y tiempo de cálculo

En este apartado se muestran dos tipos de resultados, referentes al tiempo de cálculo (T_c) y el error relativo (E_r) entre los modelos de flujo subterráneo en PMWIN-MODFLOW y AQUIVAL 2.0. El análisis se llevó a cabo en un ordenador INTEL Core 2 de 2.51GHz, con sistema operativo Windows 7 Enterprise de 64bits. Respecto al tiempo de cálculo, en la Tabla 4.1 se muestran los (T_c) para los casos sintéticos A y B de las distintas formulaciones en Autovalores y diferencias finitas, comparándose la simulación de 1200, 600 y 100 pasos de tiempo en ambos modelos. El resultado está expresado en milisegundos y en porcentaje para representar el tiempo de mejora obtenida.

Tabla 4.1. Comparativa de tiempo de cálculo (milisegundos) en los modelos sintéticos

Modelo	1200 t-s		600 t-s		100 t-s	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
PMWIN-MODFLOW	860	890	540	550	230	270
AQUIVAL 2.0	480	760	360	540	270	370
Diferencia (%)	44.19	14.61	33.33	1.82	-17.39	-37.04

Los resultados muestran una mejor eficiencia computacional para un modelo por Autovalores, de discretización sencilla y períodos de simulación largos (1200 y 600 t-s), no así para períodos de simulación pequeños, donde el desempeño de Autovalores es menor (porcentualmente del orden de 17 y 37%). La diferencia porcentual entre ambos modelos para una simulación de 1200 pasos de tiempo es del orden de 44 y 15% (casos A y B), que representan una mejora en la reducción del T_c . Si dicha mejora se extrapola a modelos de mayor complejidad en su discretización y para períodos de tiempo mayores (como en el caso de análisis de sistemas de recursos hídricos), la reducción del T_c es significativamente mayor con la formulación presentada en Autovalores, respecto a la de diferencias finitas en MODFLOW. En general, se mejora el tiempo de cálculo en los modelos sencillos y de grandes períodos de simulación, mientras que en los modelos de pocos pasos de tiempo, los modelos en diferencias finitas son más eficientes.

Por otro lado, para el cálculo del error relativo de los resultados obtenidos con PMWIN-MODFLOW y la formulación propuesta en Autovalores de AQUIVAL 2.0, se utiliza la fórmula:

$$E_r = \frac{Q_{pm-win} - Q_{aqual}}{Q_{pm-win}} * 100, \tag{E 4.1}$$

Donde:

Q_{pm-win} , caudal de descarga por celdas tipo dren en el modelo PM-WIN.

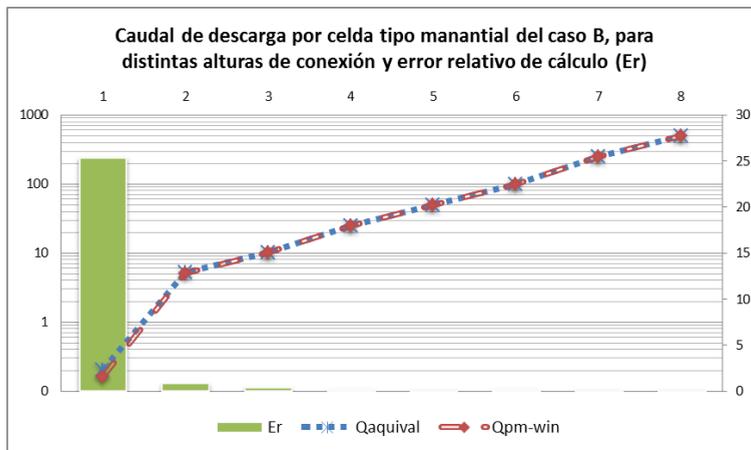
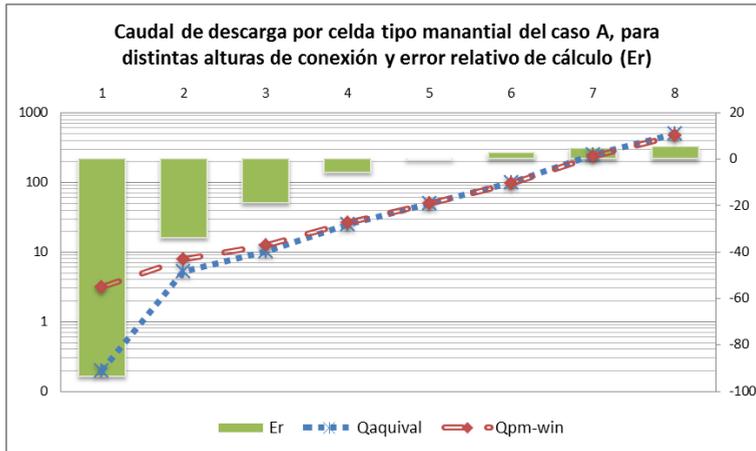
Q_{aqual} , caudal de descarga por celdas de acuífero en conexión con río/manantial, para la formulación por Autovalores de AQUIVAL 2.0.

En la Tabla 4.2 se presenta el error relativo calculado con [E 4.1] para el caso A y B de los ejemplos de aplicación evaluados. En la tabla se observa que conforme se incrementa el caudal simulado, la diferencia de cálculo entre modelos disminuye, enmascarándose el error cometido. Sin embargo, diferencia de cálculo es variable, tanto en función de la altura de conexión, como del detalle del modelo usado (1 y 3 celdas), para simular la descarga por conexión del acuífero a un manantial.

Tabla 4.2. Caudal de descarga por celdas de acuífero en conexión con río/manantial de los modelos sintéticos y el error relativo de cálculo cometido con la aproximación propuesta

Número de evaluación	Variables			Modelo A: 1 celda			Modelo B: 3 celdas		
	h_c	h	Δh	AQUIVAL	PM-WIN	E_r	AQUIVAL	PM-WIN	E_r
	(m)	(m)	(m)	Q (m ³ /día)			Q (m ³ /día)		
1	0	0	0	0.1994	3.1368	-93.64	0.2036	0.1624	25.35
2	-1	0	1	5.1838	7.8420	-33.90	5.1877	5.1465	0.80
3	-2	0	2	10.1681	12.5471	-18.96	10.1718	10.1306	0.41
4	-5	0	5	25.1213	26.6627	-5.78	25.1240	25.0828	0.16
5	-10	0	10	50.0432	50.1886	-0.29	50.0444	50.0032	0.08
6	-20	0	20	99.8871	97.2404	2.72	100.0000	99.8440	0.16
7	-50	0	50	249.4186	238.3957	4.62	249.4074	249.3662	0.02
8	-100	0	100	498.6378	473.6547	5.27	498.6111	498.5701	0.01

En las Figuras 4.3a y 4.3b se grafica el caudal de descarga por las celdas tipo manantial, para el caso A y B evaluados con la formulación planteada. A su vez, en ellas se representa el error relativo (E_r) cometido en el cálculo, al compararlo con los resultados de PM-WIN. Para el caso en que es usada una sola celda tipo manantial, en la formulación de Autovalores subestima el caudal de descarga hasta en un 94%, cuando Δh es nulo.



Figuras 4.3a y 4.3b. Comparativa de caudal de descarga por celdas tipo manantial para los modelos de 1 y 3 celdas en AQUIVAL 2.0 y PM-WIN.

El cálculo mejora conforme se incrementa Δh , llegándose a infraestimar el caudal de descarga en un 5% cuando se tiene un $\Delta h = 100m$, que sería la situación en la cual la celda tipo manantial es totalmente penetrante en el acuífero. En general, la descarga por manantial calculada es muy similar para Δh entre 5 y 100m, teniéndose un error relativo de cálculo de $\pm 5\%$.

Ahora bien, respecto al caso B, que considera la subdivisión de la celda manantial del caso A en 3 celdas menores, se observa que el mayor error relativo se obtiene para un Δh nulo, lo que significa que la formulación de Autovalores infraestima la descarga hasta en un 25%. Respecto al caso A, la estimación del caudal de descarga mejora a partir de un $\Delta h > 1m$ y hasta los 100m, siendo el error relativo en cualquier caso menor al 0.8%, respecto del cálculo en PM-WIN.

En resumen, la descarga por celdas tipo manantial se realiza con mejor precisión para el caso B, donde se tiene un mayor detalle en la

discretización de la conexión del acuífero con el manantial. Dicha precisión se observa al comparar el valor de E_r para el caso A y B, ante Δh pequeños. Cuando el valor de Δh se incrementa, el error cometido en el cálculo de Q_m se enmascara con el proceso de cálculo de otras variables de la formulación planteada.

De cara a la estimación del caudal de entrada/salida por celdas de contorno de nivel distinto de cero (tratadas en el presente trabajo), si dicha estimación es realizada en un modelo de flujo subterráneo real y de mayor complejidad que el caso de estudio presentado, será necesario realizar un estudio de sensibilidad, que considere la incertidumbre proveniente de los datos de entrada y de la estructura propia de las ecuaciones que rigen el flujo en el modelo planteado.

De esta forma, se reflejará mejor el aporte realizado con estas formulaciones para la evaluación de condiciones de contorno no nulas en modelos lineales de flujo subterráneo, acoplando la interacción aguas superficiales y subterráneas. Para posteriores análisis, donde se incluyan datos reales observados, será posible medir la eficiencia del cálculo de la formulación propuesta, respecto a otro modelo de flujo subterráneo.

Los indicadores de eficiencia de cálculo más comunes son la raíz del error cuadrático medio (RECM) y el coeficiente (N) de Nash-Sutcliffe (1970). Sin embargo, en análisis de sistemas de recursos hídricos es común tener como indicadores, valores como la media de recarga (anual, mensual, inter-anual), la serie de recarga anual y mensual observadas, contrastadas gráficamente con los resultados de los modelos usados (Sahuquillo, 2010b).

4.1.3. Síntesis y discusión

Se abordó de manera generalizada la evaluación de condiciones de contorno no nulas en términos de la metodología de Autovalores, para el caso de celdas con esta condición (en conexión perfecta o imperfecta), mediante el uso de factores correctores del descenso en las celdas tratadas como de tipo río y/o manantial.

El proceso iterativo planteado para la corrección de los niveles y caudales de descarga en la matriz de descensos $[D_{ij}]$, que se recalcula para distintos estados de conexión/desconexión de las celdas estudiadas y el acuífero, no supone un coste computacional significativo, como quedó demostrado en el análisis de resultados, en el apartado de tiempos de ejecución del modelo de Autovalores, comparado con el de diferencias finitas.

Es importante señalar que el tiempo de ejecución mejora en simulaciones de largos períodos de tiempo con la formulación de Autovalores, pues ésta solo requiere realizar una sola vez el cálculo del vector de estado (L_t^*) y su corrección cuando exista conexión y desconexión de las de las celdas con condiciones de contorno no nulas. Lo anterior mejora el tiempo de cálculo para subsecuentes pasos de tiempo evaluados, pues en ellos solo se requiere asignar de manera directa el valor de las acciones elementales consideradas en el modelo

evaluado, evitando la resolución de ecuaciones en derivadas parciales que requiere la formulación de MODFLOW.

La evaluación de las condiciones de contorno no nulas del presente trabajo, se ha logrado mediante la inclusión de la formulación lineal en Autovalores, lo que permite la evaluación de la conexión río-acuífero y descarga por manantial en modelos de flujo subterráneo usados en el análisis del uso conjunto en sistemas de recursos hídricos.

Se observó que los resultados del cálculo del caudal de descarga por celdas tipo manantial son mejores cuanto mayor es el detalle de la discretización en esas zonas. De igual forma, se mejora la eficiencia en el tiempo de cálculo requerido para períodos de simulación largos.

4.2. MODELO DE ACUÍFERO POR AUTOVALORES BENIARDÁ-POLOP

4.2.1. Introducción

En cuencas con una marcada relación entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, la utilización de modelos de gestión conjunta es fundamental para representar y estudiar el abastecimiento de agua y las reglas de operación asociadas. Según el grado de complejidad de las masas de agua subterránea, su interacción con las aguas superficiales y la explotación de ambas, es conveniente seleccionar algún tipo de modelo de acuífero que permita interpretar de mejor forma su comportamiento ante variables de gestión de los recursos hídricos disponibles. De esta forma, el Sistema Soporte a la Decisión Aquatool (SSD AQUATOOL) de Andreu et al. (1996), permite simular el funcionamiento de diversos tipos de acuíferos para su integración en un esquema de gestión de recursos hídricos, entre ellos: tipo depósito, unicelular, manantial, tres niveles, Autovalores, etc. Esta herramienta tiene la ventaja de permitir simular conjuntamente el uso de las aguas superficiales y subterráneas en sistemas de recursos hídricos con un alto grado de interacción, mediante la selección del tipo de modelo matemático más adecuado a los datos disponibles y los problemas analizados, minimizando el coste computacional del análisis de grandes series hidrológicas y alternativas de gestión.

Es de particular interés la gestión del sistema de explotación de la Marina Baja, debido a que la mayor parte de sus demandas son urbanas, principalmente con zonas de alto interés turístico. Además, el sistema presenta una complejidad elevada, debido a que, por un lado, el balance anual de recursos es muy cerrado en cuanto a demandas y aportaciones (con más del 50% de los recursos del sistema de origen subterráneo) y, por otro lado, que los recursos son obtenidos mediante un conjunto de bombeos localizados en una zona sensible de marcado interés medioambiental. En este sentido, la compleja variabilidad de demandas y restricciones físicas y ambientales (propias del sistema) conlleva un elevado grado de interacción entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, requiriendo una anticipación en la activación de bombeos para la generación de reservas extraordinarias que permitan almacenar suficiente agua para la época de verano y/o años de sequía. Por otro lado, geológicamente, la estructura

fragmentada de los estratos de las masas subterráneas en la zona complica la interpretación adecuada de los datos requeridos por los modelos matemáticos y a su vez, sobre su certidumbre al proporcionar las respuestas requeridas, lo que incrementa la complejidad de la zona de estudio.

4.2.2. Descripción del área de estudio

El Sistema de Explotación Marina Baja (Figura 4.4) se sitúa en la provincia de Alicante (España), entre los 1,100msnm y el mar Mediterráneo, conformado por las cuencas de los ríos Algar y Amadorio principalmente, con una superficie de 583 km². El clima es mediterráneo semiárido, con precipitación media anual de 400 mm/año y una temperatura media de 16 °C. La población en la zona es de 173,421hab (para 2010), que en temporada estival, debido al turismo, se incrementa un 225%, lo que conlleva una mayor demanda de recursos hídricos para abastecimiento urbano (PHJ, 2007).

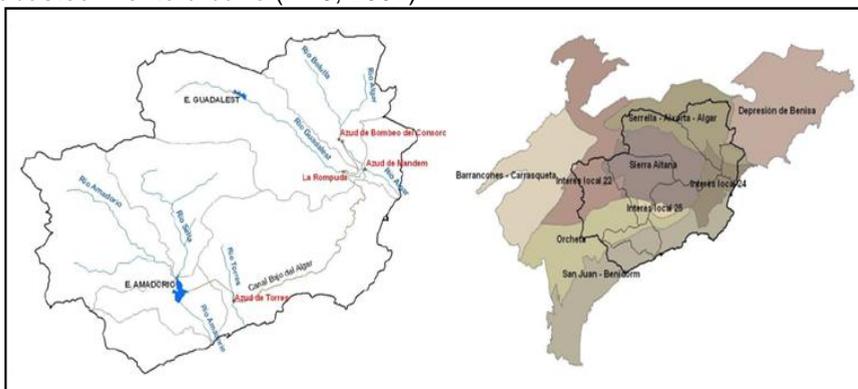


Figura 4.4. Sistema de explotación de la Marina Baja (Alicante, España) y masas de agua subterránea de interés relacionadas. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al balance del sistema, la media de los recursos totales (para 1994-2009) son captados 34hm³ por embalses y recargados 32hm³ a los acuíferos. Por su parte, las demandas están repartidas entre agrícolas (26hm³) y urbanas (28hm³), las cuales son suministradas de forma superficial en un 77%, en un 10% por recursos subterráneos y un 13% por reutilización. En particular, en el acuífero Beniardá-Polop, las extracciones medias son de 7.15hm³/año, mientras que la recarga de 8.55hm³/año, siendo la diferencia de ambos el valor de caudal de salida por manantiales, con 1.37hm³/año, las cuales, socialmente son de especial interés. Las salidas naturales del acuífero se producen a través de manantiales localizado en el borde oriental, que anualmente los más importantes descargan: Garrofer (0.50hm³), Cotelles (0.35hm³) y Rovira y Gallo (0.24hm³). En esta zona la infiltración directa de lluvia se da sobre los afloramientos permeables (de tipo carbonatados y detríticos), que suponen una media de 4.0hm³/año. Además, si se considera la disposición del borde de conexión con el acuífero Serrella Aixorta al norte del Acuífero Beniardá-Polop, se debe tomar en cuenta la existencia

de una aportación lateral procedente de la conexión hidráulica entre ambos acuíferos, del orden de $4.55\text{hm}^3/\text{año}$. Esta aportación se justifica por la piezometría observada en la zona y sus oscilaciones, producto de la precipitación incidente y el almacenamiento, que se equilibra al considerar la aportación externa del acuífero Serrella-Aixorta.

4.2.3. Interpretación del funcionamiento hidrológico subterráneo

El acuífero Beniardá-Polop es una de las masas subterráneas que más ha sido estudiada en esta provincia, debido a la complejidad de su disposición hidrogeológica, de demandas y recurrencia de aportaciones. En 2006 el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 2006) elaboró un modelo matemático de flujo del acuífero, considerado el funcionamiento hidrodinámico de profundidad, la distribución de recargas y la revisión de las explotaciones presentes, actualizando series de recarga, piezometría y bombeo.

El modelo matemático actual tiene una malla rectangular de 59 filas por 90 columnas de $250 \times 250\text{m}$, con 5,310 celdas que abarcan una superficie de $331,875\text{km}^2$, de una sola capa y de espesor variable. La transferencia lateral se simula como recarga en el norte del acuífero y el resto de recarga se reparte en cuatro áreas de afloramiento permeable. Las salidas se simulan con celdas de flujo dependiente de la altura piezométrica (como tipo dren), para considerar las descargas por manantial, con una conductancia de $500\text{m}^2/\text{día}$. Las zonas de explotación son representadas como la suma de los bombeos en el área que ocupa la celda en la zona. Respecto a los parámetros hidráulicos son resultado de la calibración del modelo, con una permeabilidad media o muy baja, que oscila entre 5 y $0.0001\text{m}/\text{día}$ y un almacenamiento específico entre $1\text{E}-5$ y $1\text{E}-9$. Sin embargo, los resultados de este modelo de flujo en diferencias finitas (desarrollado en Visual ModFlow) no son directamente acoplables a un modelo de gestión, por lo que ha sido necesario desarrollar un modelo de acuífero que permita acoplar aquellos resultados de interés para la simulación y análisis de la gestión conjunta de los recursos en el sistema, tales como volúmenes de descarga por manantial y niveles piezométricos en zonas de interés.

Los autovalores (Sahuquillo, 1983a; Andreu, y Sahuquillo, 1987), como técnica numérica de resolución de ecuaciones que definen el flujo en medio saturado, se ha utilizado para modelar acuíferos de parámetros distribuidos en régimen transitorio con comportamiento lineal a un reducido coste computacional, estando sus resultados vinculados con un modelo de gestión conjunta. En específico, para analizar el funcionamiento del acuífero de Beniardá-Polop, se ha utilizado el módulo AQUIVAL 2.0 (2011), que permite el pre-procesamiento y la simulación de acuíferos con comportamiento lineal por el método de los Autovalores. Esta versión incluye el uso de condiciones de contorno tipo manantial, que posibilita la evaluación del flujo de salida por celdas de este tipo en el acuífero estudiado.

El modelo desarrollado (Figura 4.5) consta de una sola capa, de 15 filas por 20 columnas de ancho variable (entre 500 y 1500m), con total de 181 celdas activas, de espesor variable (entre 120 y 310m). En el modelo son utilizados los mismos valores de conductividades (0.0001 y 5.0 m/día) y almacenamiento (0.0001 y 0.01) para cada una de las zonas de acuífero definidas en el modelo de acuífero del IGME. Para evaluar el caudal de salida por manantial, se asignaron 4 celdas de este tipo, con una conductancia de 800m²/día y 4 tipos de acciones elementales: 2 para bombeos y 2 para recargas (de lluvia y por transferencias). Finalmente, para su calibración se tomó en cuenta el caudal de salida por manantiales, 4 niveles piezométricos y el volumen almacenado en el acuífero (para medir la variación volumétrica anual), contrastados con valores medidos en la zona para el período 1994-2009.

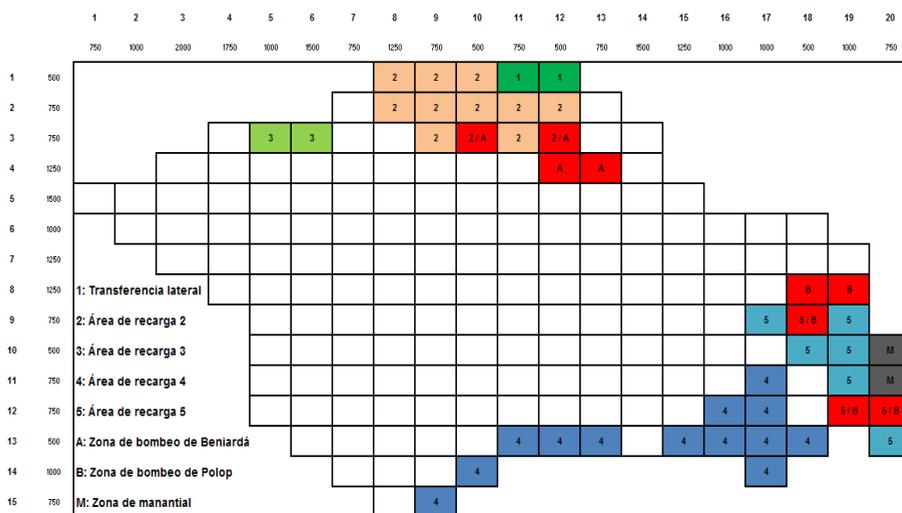


Figura 4.5. Zonas de aportaciones y demandas en el acuífero Beniardá-Polop. Fuente: Elaboración propia.

La importancia de la migración del modelo en diferencias finitas de ModFlow a Autovalores en AQUIVAL 2.0 radica en conocer explícitamente la influencia de la variación de los bombeos sobre la disponibilidad de recursos en zonas de manantial para horizontes a mediano y largo plazo, en función de la gestión que se realice en el sistema, así como su influencia sobre las demás componentes del esquema de gestión.

4.2.4. Acuífero por Autovalores Beniardá-Polop

El sistema de explotación de la Marina Baja ha sido ampliamente estudiado y modelado, teniendo como base un esquema de gestión en AQUATOOL, que con la rutina de SIMGES (Andeu et al., 2007) donde son simulados distintos escenarios de gestión que permiten anticiparse a posibles períodos de escasez, de incremento de demanda o disminución de recursos en el sistema. Esta herramienta ha contribuido al análisis del

sistema de explotación, conociendo sus limitantes y fortalezas, de tal forma que el análisis del mismo propicie una gestión integral de sus recursos, en especial los procedentes de las masas subterráneas de la zona. A continuación se describen brevemente los tipos de acuífero considerados para el análisis de la gestión en el sistema de la Marina Baja, siendo el acuífero de Baniardá-Polop uno de los de mayor interés en su modelación distribuida.

Para la modelación subterránea del sistema de explotación de la Marina Baja, donde es de interés conocer las interacciones aguas superficiales y subterráneas y en específico, del acuífero Baniardá-Polop, se ha considerado el uso de distintos tipos de modelo de acuífero, entre ellos, el de tipo distribuido por Autovalores, en el que se centra el caso de estudio. Para obtener el caudal de salida por manantiales producido en este acuífero, se ha desarrollado una sub-rutina de evaluación de condiciones de contorno especiales, entre ellas las de tipo manantial. La solución numérica del flujo por celdas de este tipo consiste en: (a) determinar las alturas que se darían en estas celdas sin tomar en cuenta el efecto de esta condición y (b) determinar el conjunto de bombeos necesarios a realizar en cada una de estas celdas, de tal forma que produzcan una altura final igual a la establecida para una celda en condición de manantial. Para obtener dicho bombeo, en un cálculo previo a la simulación, se construye una matriz de descensos para las celdas tipo manantial, debido a la aplicación de un bombeo unitario en ellas, como la ecuación [E 4.2].

$$\left[\begin{array}{c} D \\ \\ \\ \end{array} \right] * \left\{ \begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_{kcc} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} h'_1 - h_1 \\ h'_2 - h_2 \\ \dots \\ h'_{kcc} - h_{kcc} \end{array} \right\} \quad [E 4.2]$$

Donde: $[D]$ es la matriz de descensos propuesta en el apartado metodológico, que se construye con la fórmula [E 4.3], $\{b_k\}$ son los bombeos necesarios para producir los descensos que igualen las alturas del vector $\{h'_k - h_k\}$.

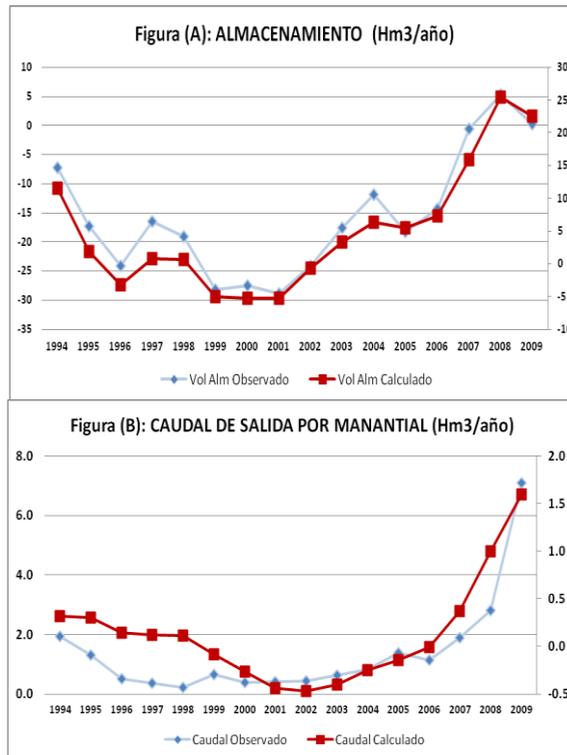
Durante la simulación se obtienen los descensos que deberían producirse en cada celda para llegar a la cota correcta de conexión, de acuerdo a las condiciones definidas para las celdas de tipo manantial. Con estos descensos y la matriz construida a partir de [E 4.2], se resuelve el sistema de ecuaciones de [E 4.3], despejando de [E 4.2] el vector de extracciones (b_k) a aplicar en cada celda de contorno tipo manantial, de tal forma que la altura piezométrica final en ella sea la correcta. Por último, una vez aplicados los bombeos, se obtiene el vector de estado final del acuífero con [E 4.4], que define las alturas piezométricas finales en el dominio del modelo de acuífero después de la corrección de las celdas tipo manantial.

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^N a_{ik} \cdot a_{jk} \cdot \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k} = \sum_{k=1}^N a_{ik} \cdot X_{kj} \quad [E 4.3]$$

$$\{h\} = \{h'\} + \sum_{k=1}^N b_k \{\varphi_k\} \quad [E 4.4]$$

Donde: a_{ik} y a_{jk} son los autovectores originales para la celda “ i,j ” (de tipo manantial) a ser modificadas; α_k es el autovalor para la acción elemental “ k ” (que está incluida en la matriz de descensos [E 4.2] cuando existe más de una celda de este tipo) y $\{\varphi_k\}$ es el vector de intensidad de acciones elementales del bombeo ficticio sobre las celdas de tipo manantial.

Tras la calibración del modelo de acuífero en Autovalores, los resultados obtenidos en cuanto a caudal de salida por manantial (Figura 4.6b) y la evolución del almacenamiento (Figura 4.6a), permiten observar una buena correspondencia en cuanto a magnitud y similares períodos de descarga y variación volumétrica, comparados con los datos calibrados del modelo de ModFlow y los datos medidos en campo.



Figuras 4.6a y 4.6b. Comparativa de resultados de almacenamiento y caudal de salida por manantial en el acuífero por Autovalores de Beniardá-Polop.

Hay que señalar que al encontrarse en distintos sistemas de referencia, los resultados de AQUIVAL 2.0, respecto a los valores observados de almacenamiento y caudal de salida por manantial son comparables visualmente en cuanto a la tendencia de variación anual, ajustándose bastante ambos gráficos de resultados. En promedio, el caudal de salida anual simulado por Autovalores corresponde a 1.85hm^3 , respecto a 1.37hm^3 que se tienen medidos. En cuanto al almacenamiento, se sabe por datos observados, que se tiene un déficit de -15.6hm^3 , los cuales se han evaluado en Autovalores como de -15.25hm^3 , lo cual corrobora una buena correspondencia en cuanto a la simulación de la situación histórica y actual del acuífero. Teniendo como premisa estos resultados, es posible acoplar este modelo de acuífero al esquema de gestión del sistema de la Marina Baja, junto con otros tipos de acuífero, descritos a continuación.

Para complementar el análisis de la gestión del sistema de explotación de la Marina Baja, se incluyen otros modelos de acuífero de mayor sencillez en su construcción, tales como los acuíferos de Castellet, Bernia y Orcheta (de tipo unicelular), con parámetros de control el volumen almacenado y el coeficiente de descarga; los acuíferos Carrascal-Ferrer y Sella (de tipo pluricelular), con parámetros de control como volumen almacenado, coeficiente de descarga y aportación mensual y, finalmente, el acuífero Serrella Aixorta (de tipo tres niveles), con parámetros de control el volumen almacenado, la recarga histórica y el caudal de salida por tres niveles: por flujo en el acuífero profundo, por drenes en función de una cota de conexión y por la evaporación en una tercera capa. Si se comparan los valores medios anuales de recarga en el conjunto de estos acuíferos, esta representa el 42% (15.34hm^3), respecto al 58% (11.19hm^3) del acuífero Beniardá-Polop y por el contrario, los bombeo en estos acuíferos representan el 80% (15.88hm^3) respecto al 20% (3.90hm^3) en el acuífero Beniardá-Polop.

De acuerdo a los resultados de modelación de las masas de agua subterránea y su inclusión en el esquema de gestión del sistema de recursos, se observa la ventaja de las herramientas AQUATOOL, AQUIVAL 2.0 y SIMGES para la simulación de distintos tipos de acuíferos, en función de la necesidad de detalle en la obtención sus parámetros o de los datos con que se cuente para su elaboración e inclusión en el esquema de gestión. Mediante las distintas formulaciones que permiten evaluar el funcionamiento de las masas del sistema y su relación con las demandas y flujos superficiales, se le confiere el carácter de gestión conjunta al sistema de explotación, lo que permite al gestor una mayor certidumbre en la representación del funcionamiento general del sistema y para facilitar el análisis de reglas de gestión en este complejo sistema de explotación ante distintos escenarios de uso y explotación de sus recursos hídricos.

4.2.5. Síntesis y discusión

El uso de distintos tipos de modelo de acuífero para la interpretación de la compleja realidad del funcionamiento de este sistema de explotación, ha acarreado la necesidad de crear nuevas herramientas computacionales con características de eficiencia y sencillez en el proceso de cálculo, mismas que permitan una correcta calibración y análisis del modelo y sus resultados. Se ha trabajado en el uso de condiciones de contorno especiales (tipo manantial y conexión a río) en la formulación por Autovalores para la evaluación del funcionamiento hidráulico de masas subterráneas en conexión con este tipo de cuerpos, considerando un reducido coste computacional en su ejecución para la simulación de grandes horizontes temporales. Los resultados obtenidos del modelo por Autovalores, en específico de la determinación de caudal de salida por celdas de tipo manantial (condición de contorno especial no modelada antes), junto con su acoplamiento con los otros tipos de acuíferos al esquema de gestión, facilitan el análisis conjunto y global de la explotación de aguas superficiales y subterráneas en el sistema de la Marina Baja.

Tesis Doctoral

"Casi todo en la vida empieza por una necesidad de orden personal, a la que luego encontramos motivaciones históricas: Primero hacemos las cosas y después las justificamos".

Juan José Millás.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO: LA CUENCA DEL DUERO

El presente capítulo es referente a tres apartados principales: (i) primero se establece la caracterización, el análisis de datos y balance de recursos en la cuenca de estudio; (ii) posteriormente se presenta la aplicación de la metodología de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto, así como los resultados obtenidos para la cuenca de estudio; (iii) finalmente, se presenta la aplicación de la metodología, bajo el supuesto de impacto de cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca analizada.

5.1. CARACTERIZACIÓN, ANÁLISIS DE DATOS Y BALANCE DE RECURSOS

5.1.1. Caracterización general de la cuenca del Duero

En este apartado se expondrán las características generales que enmarcan la zona de estudio, lo cual es indispensable para entender el funcionamiento natural y antrópico de la cuenca del Duero. Las principales características físicas, climáticas, hidrogeológicas, bióticas y uso del suelo, así como socioeconómicas de la zona se exponen en los subsecuentes apartados. En ellos se enfatiza en aspectos de gestión y manejo de los recursos hídricos en la cuenca, sirviendo como antecedentes del funcionamiento histórico superficial y subterráneo (en régimen natural y alterado) de la cuenca. En el apartado final se realiza una síntesis del balance de recursos de la cuenca, que sirve de punto de partida en el entendimiento del funcionamiento conjunto de la zona.

5.1.1.1. Características físicas

En España, la cuenca hidrográfica del Duero (Figura 5.1) se extiende por las comunidades autónomas de Castilla y León, Galicia, Cantabria, Castilla-La Mancha, Extremadura, La Rioja, Madrid y Asturias. La cuenca, en su porción española, se extiende sobre las provincias de Ávila, Burgos, León, Salamanca, Segovia, Soria, Palencia, Valladolid y Zamora, con una superficie aproximada de 78,859km², que representa un 16% de la superficie de la península española. (CHD, 2014). La Figura 5.1 ha sido extraída del SIA (Sistema de Información del Agua de la Secretaría de Estado y Medioambiente).

La parte española de la cuenca limita al Noroeste con la demarcación del Miño-Sil, por el Norte con la del Cantábrico, al Noreste con la del Ebro, al Sur con la del Tajo y al Oeste la cuenca continua en territorio de Portugal. De acuerdo a la Confederación hidrográfica del Duero, en adelante CHD, la distribución de la población y superficie en las distintas comunidades autonómicas se registra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Distribución de la superficie de Comunidades Autónomas, núcleos urbanos y población en la Cuenca hidrográfica del Duero (Fuente: CHD, 2014).

Comunidad autónoma	Superficie (km ²)	%	Población (hab)	%	Núcleos urbanos	%
Castilla y León	77,482	98.25	2'173,279	98.56	4,729	96.12
Galicia	1,134	1.44	30,498	1.38	169	3.43
Cantabria	98	0.12	1,346	0.06	21	0.43
Castilla-La Mancha	62	0.08	0	0	2	0,02
Extremadura	43	0.05	0	0	0	0
La Rioja	21	0.03	0	0	0	0
Madrid	16	0.02	0	0	0	0
Asturias	3	0.00	0	0	0	0
TOTAL	78,859		2'205,123		4,921	

Desde el punto de vista geográfico, la cuenca del Duero es una depresión llana y elevada, bordeada por sistemas montañosos, donde la totalidad de la cuenca se encuentra por encima de los 600m de altitud (solo un 1.9% está por debajo); el 66% de la cuenca está entre los 600 y 1000m; el 31% entre los 1000 y 2000m y solo el 1.1% por encima de los 2000m. La parte central tiene un relieve de llanuras escalonadas entre los 700 y 1000m. Los páramos superiores están erosionados por los ríos formados desde las vegas del Duero, Pisuerga, Esla, etc., hasta las pequeñas cárcavas y barrancos de arroyos en la zona (Caballero, 2005). La geología de la cuenca del Duero está constituida por unidades geológicas definidas: la depresión del Duero (cubeta de sedimentos terciarios y cuaternarios, lacustres y continentales) y los bordes de la misma (Cordilleras Cantábrica, Ibérica y Central; Montes Galaicos-Leoneses).

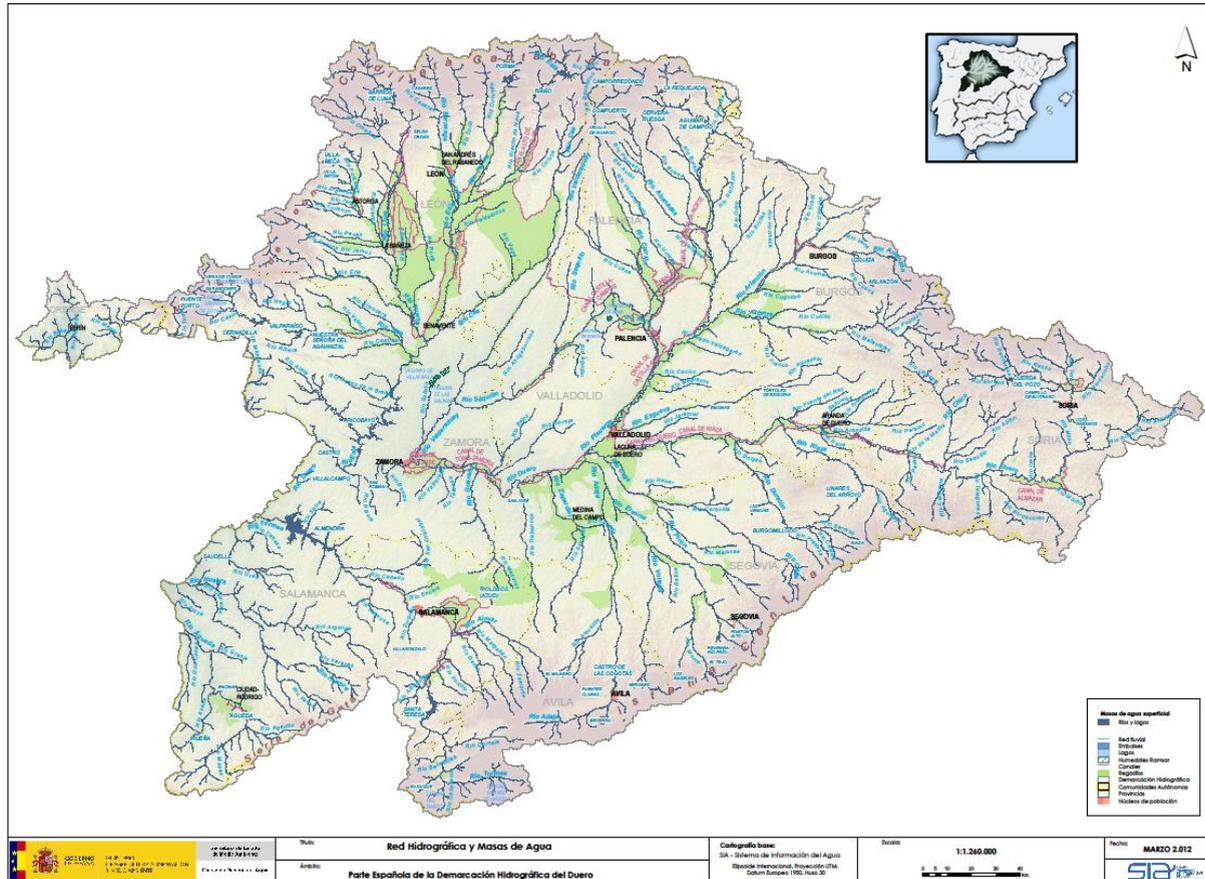


Figura 5.1. Red hidrográfica de la Cuenca del Duero (España). Fuente: CHD (2014).

En la Figura 5.2 se muestra la distribución de los principales sistemas acuíferos dentro de la demarcación hidrográfica del Duero, de la cual se desprende que el 60.42% corresponde a la Cuenca Terciaria del Duero, el 16.69% a los Granitoides hercínicos, el 8.44% al Hercínico Sedimentario, el 7.41% a la Cordillera Ibérica y el 7.40% a la Zona Cantábrica.

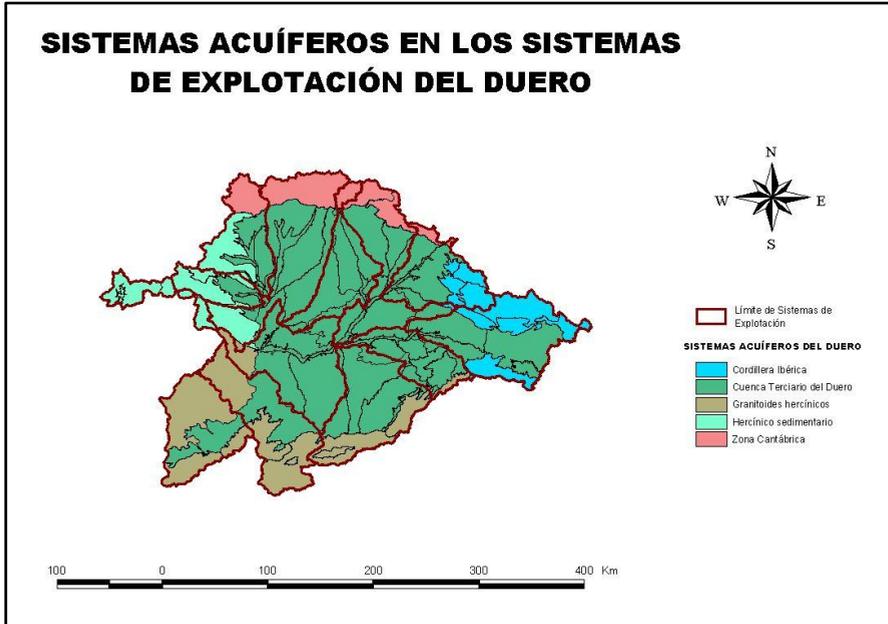


Figura 5.2. Principales sistemas acuíferos en la Cuenca Hidrográfica del Duero (España). Fuente: Elaboración propia.

La unidad hidrogeológica más importante en la cuenca del Duero está representada por el Acuífero Terciario, que se ubica al centro de la zona. Esta unidad está rodeada en el Norte y Este por unidades poco permeables (granitoides) y al Sur y Oeste por unidades permeables pero de escaso potencial, lo que sugiere que el escurrimiento e infiltración en estas zonas es de tipo superficial y sub-superficial principalmente. Por el contrario, en los estratos del acuífero terciario, se presenta una infiltración profunda que condiciona el flujo regional en la cuenca del Duero.

5.1.1.2. Características climáticas

De acuerdo a la CHD (2014), en el territorio se presenta un clima predominantemente mediterráneo continental, a causa del aislamiento orográfico. El área más occidental (región de Los Arribes), el clima es más suave, por influencia del Océano Atlántico y una menor altitud; la franja Norte también se diferencia por corresponderse con un clima atlántico o eurosiberiano. Al tratarse de un clima mediterráneo en

general, implica unas condiciones de sequía estival que afecta al 90% de la superficie de la cuenca.

Las temperaturas medias de la zona presentan unos inviernos largos y fríos (media de 2°C en Enero), especialmente en los páramos leoneses, las montañas del Norte y Noroeste de la cuenca y en la Sierra de Ávila. Los veranos son relativamente cortos y suaves, en particular en la zona septentrional de la cuenca. (CHD, 2014).

Respecto a la distribución de la precipitación en la cuenca, la CHD (2014) marca que anualmente se registran aproximadamente 612mm, con valores mayores en las zonas de montaña (valores superiores a 1800mm); valores de 1000mm en los Sistemas Central e Ibérico; valores bajos (400mm) en el Bajo Duero, Salamanca, Zamora y Valladolid.

El volumen de precipitación media anual en la cuenca del Duero supone cerca de 50,000hm³, de los cuales el 70% se evapora o se aprovecha por la vegetación. El 30% restante fluye por los cauces superficiales y se incorpora a las aguas subterráneas por infiltración. (Caballero, 2005).

5.1.1.3. Características hidrogeológicas

De acuerdo a la CHD (2014), la cuenca hidrográfica del Duero cuenta con una red de drenaje de 83,200km de longitud y de entre ellos, 13,491 se reconocen como masas de agua superficial. La mayoría de las corrientes se originan en las sierras que bordean la cuenca y que llegan al eje principal del Duero. Existe una margen derecha (o septentrional) con dos afluentes principales: del Pisuerga (con las corrientes del Carrión y Arlanza) y del Esla (con corrientes como Tera, Órbigo, Porma y Cea). Respecto a la margen izquierda (o meridional), incluye los ríos de menor caudal, como son: Riaza, Duratón, Cega, Adaja y Eresma, entre otros menores (Zapardiel, Trabancos, Guareña, etc.). Además, existen los sistemas del Tormes, Huebra y Águeda, que descargan directamente en la parte portuguesa del Duero.

Administrativamente, la división hidrográfica del Duero se corresponde con los Sistemas de Explotación, los cuales se muestran en la Tabla 5.2, que abarcan en mayor o menor proporción, el área de la cuenca. Estos sistemas de explotación están relacionados con las masas de agua subterránea del Duero tal como aparece en la Figura 5.3.

Tabla 5.2. Superficie de los sistemas de explotación en la cuenca hidrográfica del Duero (Fuente: CHD, 2010).

No.	Sistema	Superficie (km ²)	No.	Sistema	Superficie (km ²)
1	Águeda	6,205	8	Órbigo	4,987
2	Alto Duero	8,953	9	Pisuerga	7,055
3	Arlanza	5,330	10	Riaza-Duratón	3,972
4	Bajo Duero	7,738	11	Támega-Manzanas	1,912
5	Carrión	4,977	12	Tera	2,425
6	Cega-Eresma-Adaja	7,885	13	Tormes	7,386
7	Esla	10,037	TOTAL:		78,862

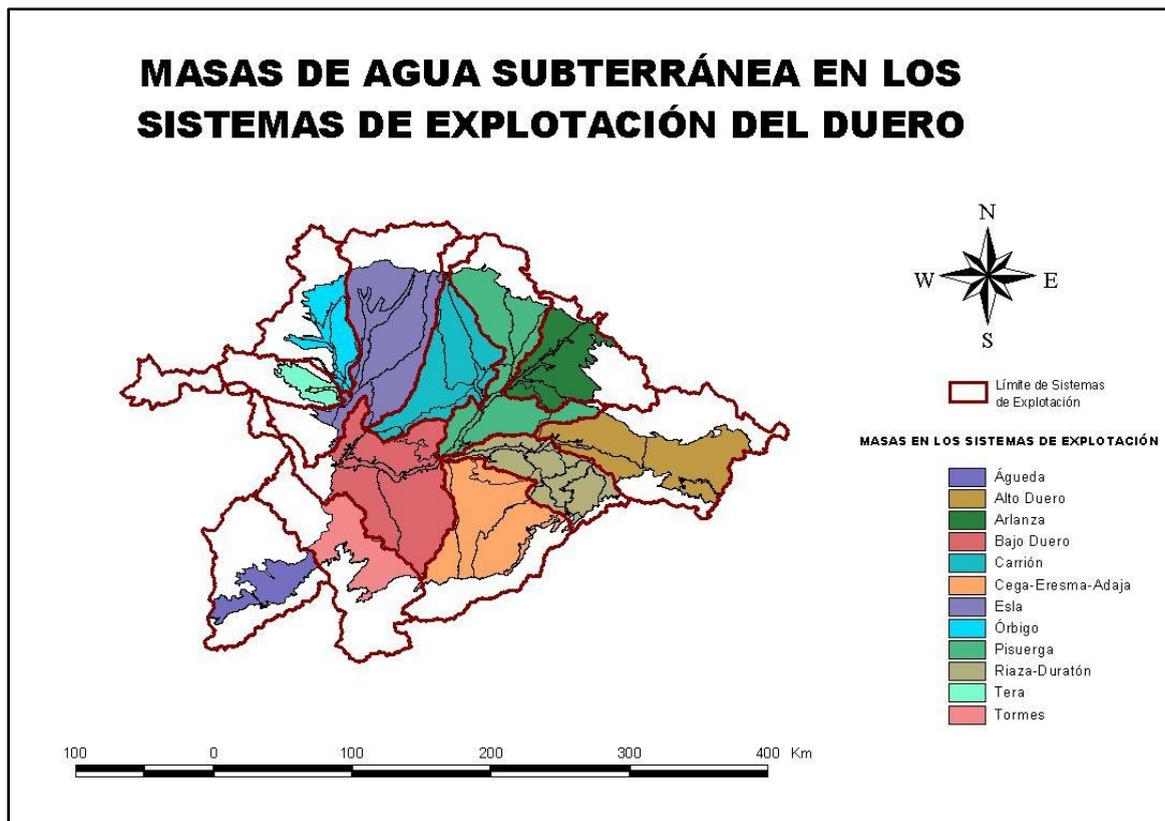


Figura 5.3. Masas de agua subterránea comprendidas dentro de los distintos sistemas de explotación del Duero (España).
Fuente: Elaboración propia.

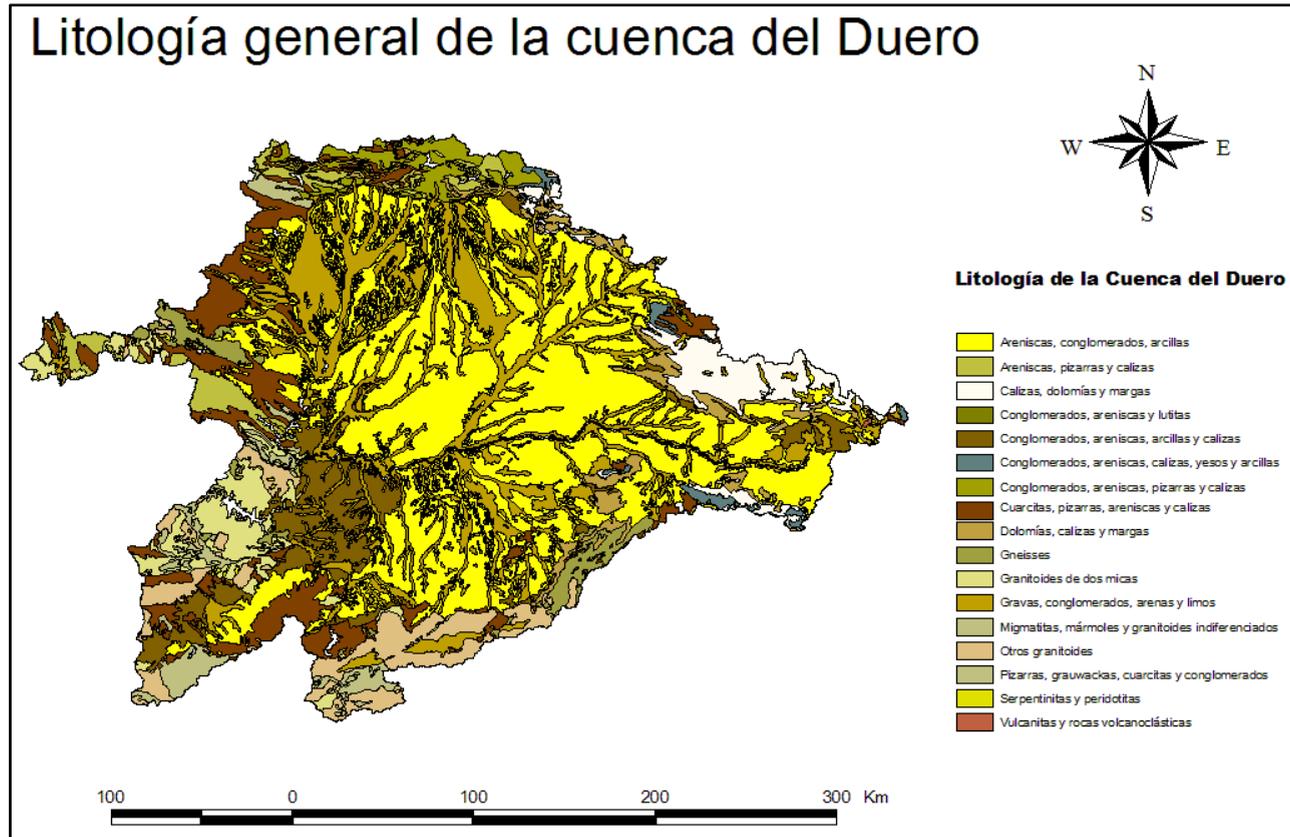


Figura 5.4. Litología general de la cuenca del Duero. Fuente: Elaboración propia.

La litología de la zona está compuesta de manera general por areniscas en un 39%, gravas en un 20%, otros conglomerados en 10% y cuarcitas y pizarras en un 9%. Las areniscas y gravas se encuentran principalmente cercanos al curso de los principales afluentes de la cuenca, coincidiendo con las zonas de mayor permeabilidad de la zona de estudio. En la Figura 5.4 se muestra la distribución espacial de las principales estructuras litológicas de la cuenca.

5.1.1.4. *Características bióticas y uso del suelo*

5.1.1.4.1. *Vegetación de ribera*

Se sabe que los ríos, ramblas, torrentes y zonas húmedas tienen un papel importante como corredores, refugio y albergue para la diversidad biótica de la cuenca. Y en el inventario de las especies animales y vegetales asociadas a los ecosistemas del Duero, existen algunas particularmente relacionadas con el medio hídrico. Los sotos, son la denominación que engloba las formaciones de vegetación de ribera que incluye saucedas, alamedas, choperas, alisedas, fresnedas y olmedas. Estos ocupaban grandes extensiones en las vegas de los cursos medios y bajos de la cuenca, pero actualmente están reducidos a cintas o galerías que siguen el curso de los ríos. Se puede consultar un inventario de las distintas especies animales y vegetales asociadas a los ecosistemas del Duero (CHD, 2010), relacionadas con el medio hídrico, entre ellos, los peces, que tienen especial importancia como indicadores biológicos de la calidad ambiental de ríos y masas de agua.

5.1.1.4.2. *Usos del suelo*

Respecto a los usos de suelo, de acuerdo a la CHD (2014), se estima que 3.5 millones de hectáreas (44% de la cuenca) están cubiertas por vegetación natural; sin embargo, la situación actual es el resultado de la interacción entre las formaciones originales y las diversas incidencias antrópicas de las que ha sido objeto la vegetación. De acuerdo a los datos de CORINE (Proyecto CORINE-Land Cover, base de datos de uso de suelo en Europa, escala 1:100,000), el bosque cubre 1'418,801Ha., el matorral 1'165,903Ha., los pastizales 785,841Ha. y las praderas 107,382Ha. Por otro lado, se tienen 3.7 millones de hectáreas con cultivos de secano y 550,000Ha. de regadío. Además, se tienen aproximadamente 100,000Ha. ocupadas por urbanizaciones (incluidos zonas industriales y vías de comunicación). La distribución espacial de las coberturas y uso del suelo en la cuenca se presentan a continuación en la Figura 5.5.

5.1.1.5. *Características socioeconómicas*

La cuenca del Duero representa actualmente una debilidad socioeconómica en el contexto español, considerando que sólo contribuye con un 4.7% del PIB nacional en un territorio que cubre el 15% de España. El factor conocido es la debilidad demográfica, pues la cuenca sólo reúne el 4.8% de la población española (CHD, 2010).

La población ha experimentado un descenso desde 1960 hasta el 2000. De acuerdo al censo de población del 2001, se contaba con 2'153,471 habitantes, mientras que para 2006 se tenían 2'210,541 habitantes. De esta forma, la densidad de población es de 28.1 hab/km², que se concentra en 8 núcleos urbanos de más de 50,000 habitantes, con el 47% de la población de la cuenca; mientras que 1,749 núcleos urbanos con menos de 1000 habitantes, que cubren el 75% del territorio de la cuenca del Duero, que representa una densidad media de 7,5 hab/km², lo que se considera como "desierto demográfico" (CHD, 2014).

Existen 1,972 municipios (con más del 20% de su territorio dentro de la cuenca), con 4,359 núcleos urbanos habitados, de los que 4,000 cuentan con menos de 500 habitantes y solo 13 núcleos que superan los 20,000 habitantes. Existen también movimientos estacionales de la población hacia los pequeños núcleos urbanos (períodos de vacaciones), para los cuales no están dimensionadas sus infraestructuras de abastecimiento y saneamiento.

Por otro lado, los cálculos realizados para la evolución futura de la población indican un estancamiento del crecimiento, producto del descenso de inmigración y el paulatino envejecimiento de la población. El proceso migratorio en esta cuenca no ha significado un abandono de la actividad agraria, sino una reducción de su productividad en su conjunto, acusado por el éxodo rural.

Al analizar los sectores energético y agropecuario se conoce que en ellos se han registrado los crecimientos más bajos en el período 2000-2006, con un 20% y 6% respectivamente del valor añadido bruto (VAB). En ambos casos se ha perdido empleo (5.6% y 9.1% respectivamente). De acuerdo a CHD (2010), en el sector agropecuario (que impacta directamente en el uso y disponibilidad de agua en la cuenca), se ha tenido una menor productividad por puesto de trabajo, aportando solo el 6.9% del VAB de la cuenca y dando ocupación a poco más del 10% de los trabajadores de la cuenca.

Dada la situación económica de la zona, los trabajadores orientan su actividad hacia sectores más productivos, que se refleja en un progresivo desplazamiento y abandono de las actividades agropecuarias, contribuyendo también la distribución de la población, concentrándose en ciudades y abandonando el medio rural. En este sentido, se espera que para el período 2006-2015, la población disminuya en zonas rurales y aumente en las ciudades más grandes, en el entorno de la Sierra Abulense y Segoviana y en las zonas más próximas a Madrid (CHD, 2010).

5.1.2. Resumen de análisis previos en la zona de estudio

En este apartado se desarrolla una síntesis de estudios previos realizados en la cuenca del Duero, misma que se toma como base para la continuación del presente trabajo. Los estudios usados como antecedente tocan los siguientes puntos:

- i. Recopilación de modelos hidrogeológicos precedentes de la cuenca del Duero.
- ii. Síntesis de extracciones, demandas, niveles piezométricos, escenarios de infiltración y aforos en la zona de estudio.
- iii. Resumen e hipótesis de partida para la continuación del estudio del modelo conjunto de explotación del Duero.

5.1.2.1. Modelo hidrogeológico precedente

Se cuenta con un amplio número de estudios previos en la zona, relacionados con modelos locales de ciertas masas de agua subterránea de interés, así como un modelo general del acuífero del Duero, desarrollado por diferencias finitas en Visual MODFLOW (EPTISA, 2006). Este modelo de flujo interpretativo realiza aproximaciones sucesivas en las que integra factores cada vez más complejos del flujo en la zona.

Debido a que de los acuíferos superficiales se dispone de mejor conocimiento, se logra reproducir el funcionamiento de este modelo de diferencias finitas aceptablemente en los materiales menos profundos y propone un sistema de flujo subterráneo profundo de manera lógica, acorde con la hidrogeología regional de la cuenca sedimentaria detrítica Terciaria. EPTISA (2006), llevó a cabo estudios de delimitación y determinación de parámetros hidrogeológicos en esta cuenca, realizando un resumen de los principales trabajos previos, los cuales han sido encabezados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

El sistema de flujo profundo desarrollado por EPTISA es discutible y modificable, al ser una primera aproximación para la descripción del flujo regional en el acuífero profundo. Dicho modelo es actualmente el punto de partida para la migración hacia un modelo más sencillo en Autovalores que es necesario calibrar acorde con un comportamiento de flujo general asociado al acuífero profundo del Terciario detrítico del Duero. Necesariamente debe utilizarse una simplificación del modelo hidrogeológico detallado, con el objetivo de poder acoplar dicho modelo simplificado a modelos de análisis de la gestión conjunta de recursos hídricos de una cuenca. El modelo simplificado en Autovalores, desarrollado en AQUIVAL 2.0 (2011) se expondrá en el apartado de caso de estudio de la presente tesis. El modelo de flujo subterráneo propuesto para su evaluación por Autovalores está compuesto por dos capas, a diferencia de las 11 capas del modelo MODFLOW. La primera capa se corresponde con las masas subterráneas más someras y de flujos más localizados en el Duero y la segunda capa está relacionada con el acuífero terciario del Duero, que describe los flujos profundos y regionales más importantes de la zona.

5.1.2.2. Demandas y Extracciones

En el trabajo de Jiménez (2011), se analizan las extracciones que afectan el acuífero terciario del Duero, diferenciando entre superficiales y profundas (dependiendo si la profundidad es mayor o menor de 200m). Además, se plantea una posible evolución de las demandas, desde condiciones no alteradas hasta la actualidad.

Para Noviembre de 2009, la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) tiene documentadas 66,729 captaciones para la extracción directa de recursos subterráneos, que no corresponde a volúmenes de extracción medida, sino derechos otorgados. Existe una gran cantidad de información de fuentes indirectas como concesiones de riego, censos agrarios, estimaciones de superficie cultivada, inventarios de superficie regada, datos de fotointerpretación de imágenes de satélite, etc.

En dicho trabajo, se emplearon superficies de cultivo estimadas a las que se les asignó una dotación para calcular el volumen total de agua. Como fuentes indirectas, se utilizaron "Hojas 1T" (Fuente: Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino, MARM), que contienen información estadística agraria desde 1978, donde se registran superficies de cultivo de secano y regadío por municipios. Adicionalmente, la CHD (2010) dispone de información de derechos de agua, que son incluidos en el análisis llevado a cabo por Jiménez (2011).

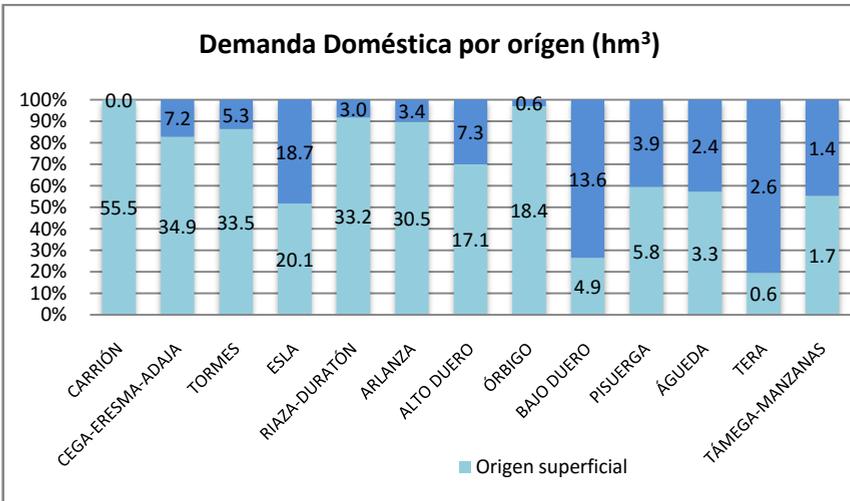
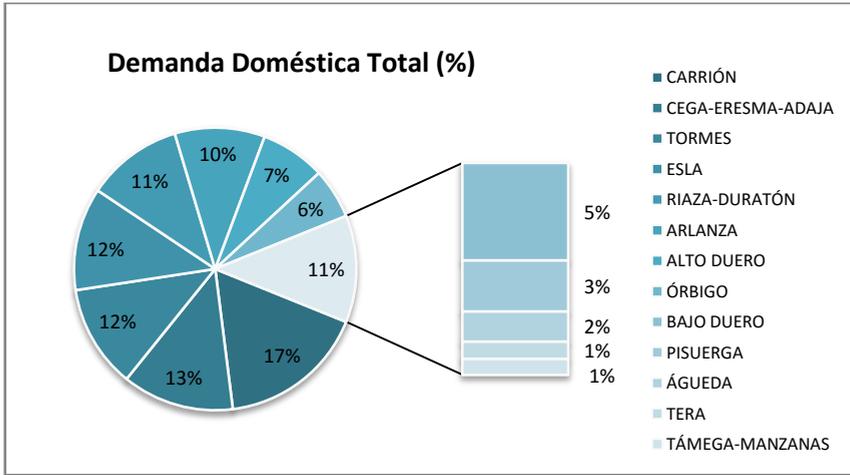
A continuación se expone en detalle la situación actual de las tres principales demandas (doméstica, agropecuaria e industrial), dadas al agua en la cuenca del Duero, de acuerdo a los datos de la CHD (2010):

5.1.2.2.1. Demanda doméstica:

Para su análisis se consideran "unidades de demanda urbana" (UDU), que corresponden con agrupaciones de núcleos de población con el mismo origen de suministro. La población es estimada a escala municipal y las demandas y dotaciones a partir de datos de encuestas de servicios urbanos (ESU) hecha por la CHD a los municipios. Adicionalmente se considera información del sistema ALBERCA y otros datos de la Comisaría de Aguas de la CHD. Con estas fuentes se abarca el 87% de la población total de la demarcación hidrográfica del Duero.

Finalmente, la demanda total para uso doméstico se estima en 329hm³ anuales, con una dotación promedio de 402 litros/día/habitante permanente ó 363 litros/día/habitante equivalente. En la Figura 5.6a se muestran los porcentajes estimados de demanda doméstica total por sistema de explotación del Duero y en la Figura 5.6b la demanda doméstica por origen y sistema de explotación.

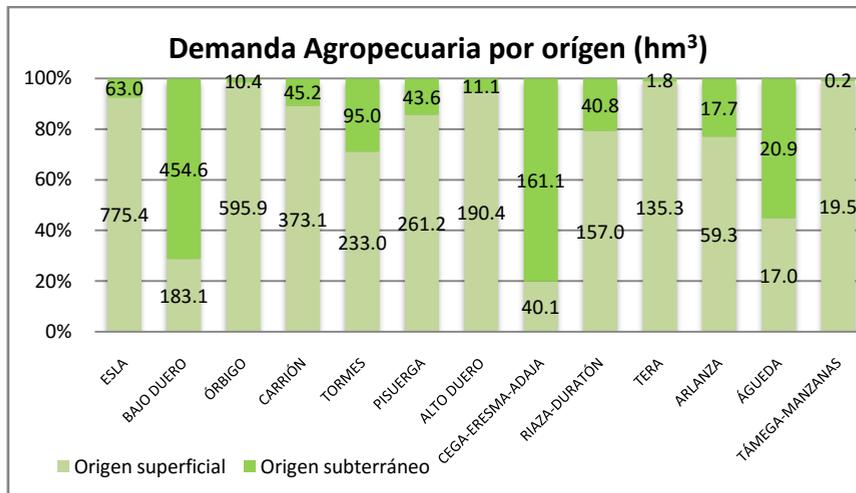
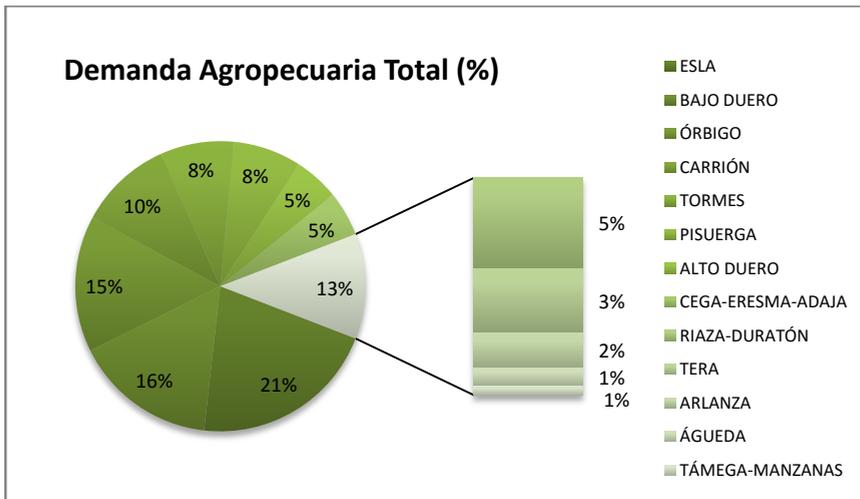
La demanda doméstica tiene una distribución similar a la población, concentrándose en los primeros 6 sistemas de la Figura 5.6b. El volumen superficial demandado (260hm³), representa el 80% del volumen total para demanda doméstica, respecto del 20% subterráneo (69hm³).



Figuras 5.6a y 5.6b. Demandas domésticas actuales en los sistemas de explotación del Duero, total y por origen. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).

5.1.2.2.2. Demanda agropecuaria:

Para las demandas agrícolas se utilizan “unidades de demanda agraria” (UDA), que corresponde a zonas de regadío con características comunes (ubicación, comunidades de regantes, origen del agua y masa de la que la captan). Jiménez (2011) ha calculado la dotación neta (a partir de necesidades de cultivos y su distribución en las comarcas agrarias), posteriormente calcula la eficiencia global (producto de las eficiencias de transporte, distribución y aplicación) y finalmente calcula la demanda bruta (como producto de la dotación neta, la superficie asignada y la eficiencia global).



Figuras 5.7ª y 5.7b. Demandas agropecuarias actuales en los sistemas de explotación del Duero, total y por origen. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).

La dotación neta media para 2004 en la CHD (2010), es del orden de $3,863\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$, que corresponde a una demanda neta total de $2,129\text{hm}^3/\text{año}$. Además, conocida la superficie asignada, la dotación neta y la eficiencia global (calculada como 57% por la CHD), se obtiene el volumen demandado.

Respecto a las demandas ganaderas, Jiménez (2011) las obtiene de las “unidades ganaderas” (UG), en base al Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística (INE) de 1999. Esta demanda se considera del orden de 25hm^3 en toda la cuenca del Duero.

En la Demarcación del Duero, la mayor parte de los recursos tiene origen superficial con un 76% ($3,041\text{hm}^3$) y el 24% restante tiene origen

subterráneo (965hm³), definidos a partir de captaciones y parcelas registrados en el sistema ALBERCA. A continuación, en la Figura 5.7a se muestran los porcentajes estimados de demanda doméstica total por sistema de explotación y en la Figura 5.7b la demanda doméstica por origen y sistema de explotación.

En las figuras anteriores se observa que el volumen más importante (21%) se encuentra en el sistema Esla (838hm³), seguido del 16% en el Bajo Duero (638hm³) y el 15% en el Órbigo (606hm³).

5.1.2.2.3. Demanda industrial:

Para caracterizar esta demanda, Jiménez (2011), forma “unidades de demanda industrial” (UDI), compuestas por agrupaciones de industrias, referentes al inventario de vertidos autorizados de la Comisaría de Aguas de la CHD para 2008. Considerando que el retorno del agua industrial utilizada es del 80%, la demanda de agua total para uso industrial se estima en 46hm³, repartidos de acuerdo a los datos de la Figura 5.8.

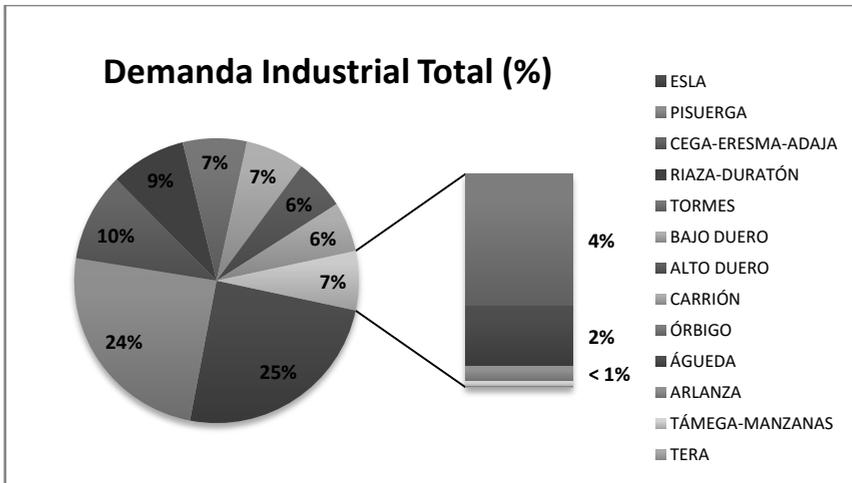
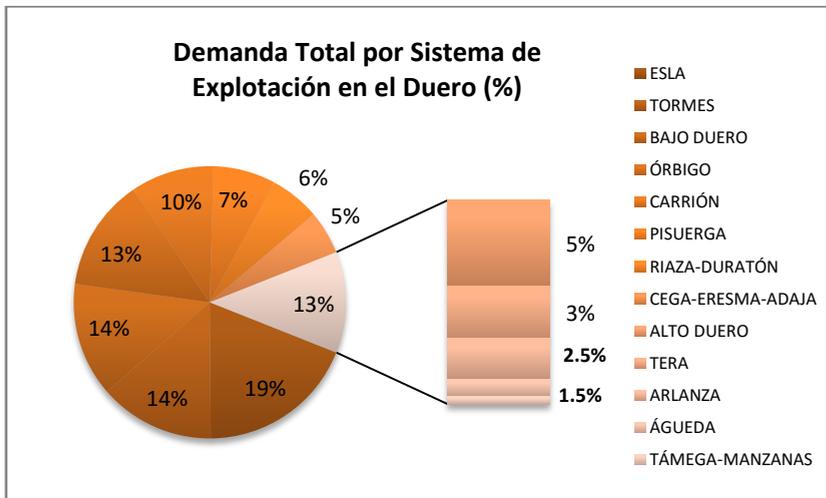
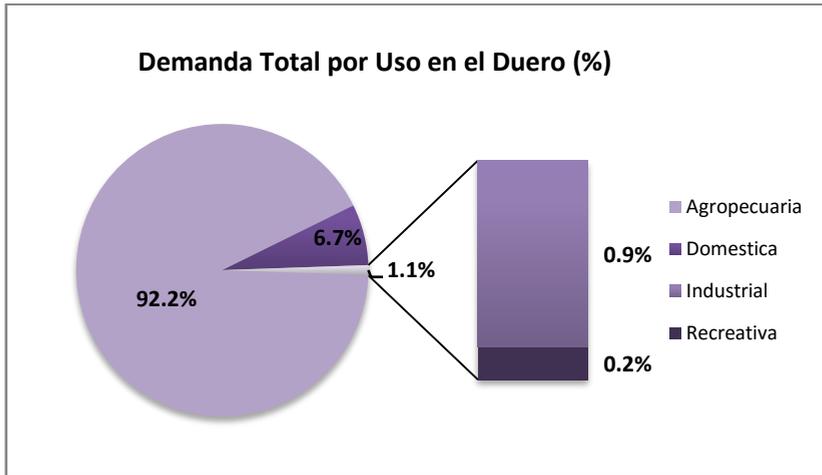


Figura 5.8. Demandas industriales actuales en los sistemas de explotación del Duero. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).

En la figura anterior resaltan los sistemas Esla y Pisuerga como los mayores consumidores (50% del total), con un volumen de 11hm³ cada uno. Además, están los sistemas Cega-Eresma-Adaja (5hm³) y el Rianza-Duratón (4hm³), ambos con un 10 y 9% respectivamente. Para este apartado de demandas no se cuenta con la separación del origen (superficial-subterráneo) de la dotación de agua para uso industrial.

5.1.2.2.4. Resumen de demandas

A continuación se presenta el resumen de demandas por tipo y origen de suministro para cada sistema de explotación de la CHD. La demanda total (por tipo de demanda y sistema de explotación), se muestra en las Figuras 5.9a y 5.9b.



Figuras 5.9ª y 5.9b. Demanda total de agua en la cuenca del Duero por tipo de uso y sistema de explotación. Fuente: CHD (2010) y Jiménez (2011).

En estas figuras se tienen 4,500hm³ de demanda agropecuaria (92%), 330hm³ de demanda doméstica (7%), 46hm³ de demanda industrial (1%) y demanda de tipo recreativa, que se supone del orden de 8hm³ para la zona, alcanzando apenas un 0.2% de la demanda total anual en la CHD (4,884hm³).

Por otro lado, en función del origen y sistema de explotación, las demandas totales se distribuyen de siguiente manera: 78% se satisface por agua superficial (3,818hm³), el 22% con aguas subterráneas (provenientes del Bajo Duero, con 470hm³ y del Cega-Eresma-Adaja, con 174hm³). Los recursos no convencionales representan apenas el 0.001%, por lo que, en proporción, pueden considerarse despreciables.

Finalmente, en función del destino, la extracción subterránea se divide de la siguiente manera: 69hm^3 para abastecimiento doméstico, 20hm^3 para abastecimiento industrial y 965hm^3 para abastecimiento agropecuario. En total, la extracción subterránea en la CHD es del orden de 1054hm^3 anuales.

5.1.2.2.5. *Extracciones en las MAS de interés*

Para la realización del balance de recursos hídricos en la zona de estudios, solo se deben considerar las masas de agua subterránea (MAS) del acuífero Terciario del Duero. En la Tabla 5.3 se muestran las UDA's que son consideradas en el balance de recursos, junto con la extracción que en ellas se realiza.

UDA	Nombre	Extracción (hm^3)
1503	Bombeo MAS 7+9 (Cea-Valderaduey)	56.7
1505	Bombeo MAS 31 (Villafáfila)	14.7
2501	Bombeo MAS 6+10+14 (Detrítico Carrión-Pisuerga)	12.7
2502	Bombeo MAS 16+17 (Arlanza-Arlanzón)	10.1
2506	Bombeo MAS 20+38+39+41	32.9
2507	Bombeo MAS 67 (Profundo Páramos-Tordesillas)	100.5
2508	Bombeo Acuífero Profundo Arlanza	2.2
3501	Bombeo MAS 30 (Aranda del Duero)	3.2
3502	Bombeo MAS 42+49 (Riaza-Allyón)	2.1
3507	Bombeo MAS 37+51 (Almazán-Escalote)	2.1
3508	Bombeo Acuífero Profundo Aranda del Duero	4.1
3509	Bombeo Acuífero Profundo Corcos-Riaza	2.3
4502	Bombeo MAS 45 (Los Arenales)	38.6
4503	Bombeo MAS 45+47 (Arenales-Medina del Campo)	53.5
4504	Bombeo MAS 48 (Tierra del Vino-Medina del Campo)	81.7
4505	Bombeo MAS 46+55+56 (Duratón-Sepúlveda)	3.1
4508	Bombeo Acuífero Profundo Arenales Eresma-Cega	30.2
4509	Bombeo Acuífero Profundo Arenales Adaja-Zapardiel	181.4
4510	Bombeo Acuífero Profundo Arenales Trabancos-Guareña	45.0
4511	Bombeo Acuífero Profundo Arenales	3.4
5501	Bombeo MAS 52 (Acuífero Profundo)	56.7
5502	Bombeo MAS 52 (Alba de Tormes-Peñaranda)	9.4
5503	Bombeo MAS 52 (La Armuña)	25.7
	<i>Extracción dentro de la zona de estudio:</i>	743.8
	<i>Extracción fuera de la zona de estudio:</i>	221.5
	Extracción TOTAL:	965.3

De la tabla anterior se deduce que el 77% de las extracciones se realizan en el acuífero terciario (743hm^3) y de ellos, el 60% son bombeos de tipo profundo (426hm^3).

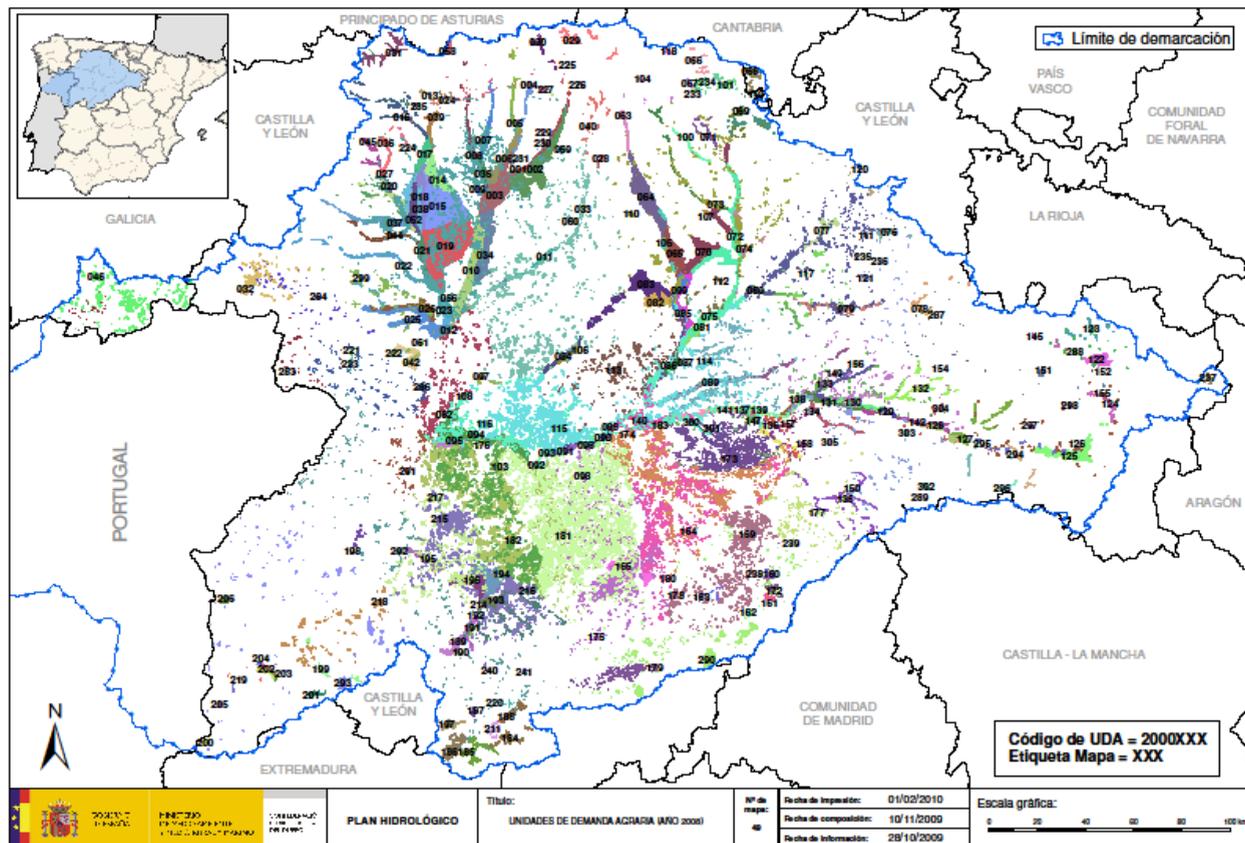


Figura 5.10. Distribución espacial de las extracciones en las MAS del Duero. Fuente: Plan Hidrológico del Duero (2010) del MAGRAMA.

Respecto a la distribución espacial de los bombeos, en las MAS 52, 45, 47, 48, 38 y 67 (zona de Los Arenales, Acuífero Bajo los Páramos y Salamanca), se extrae el 86% del agua subterránea (639hm^3), lo cual a su vez representa el 98% de la extracción profunda, con 417hm^3 .

En la Figura 5.10 se muestra la distribución de las extracciones profundas y someras en la CHD, de acuerdo al mapa extraído del portal MIRAME-DUERO para 2008. En total, Jiménez (2011) estima que se extraen 788hm^3 de recurso subterráneo, de los cuales 425hm^3 provienen de extracciones profundas y 336hm^3 de extracciones someras.

5.1.2.2.6. *Evolución histórica de las extracciones*

En este apartado, Jiménez (2011), toma como base el cálculo de la evolución de superficie regada y volúmenes extraídos para la unidad hidrogeológica Los Arenales, el cual permite determinar la tendencia esperada en la serie de extracciones en el Acuífero Terciario del Duero (ATD). Se considera que la fecha de inicio del bombeo en la serie de extracciones del ATD es a partir de 1973, ascendiendo linealmente hasta 1982, donde se acentúan los bombeos profundos. Tal como se muestra en la Figura 5.11. Este gráfico muestra inflexiones abruptas que no se corresponden con un modo de extracción real, pero se considera coherente al reflejar con él la piezometría posteriormente revisada.

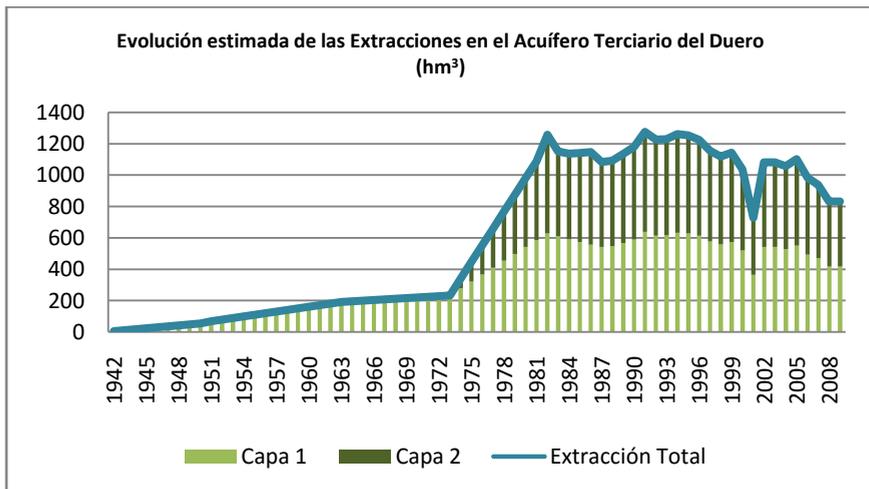


Figura 5.11. Evolución de las extracciones estimadas para el Acuífero Terciario del Duero. Fuente: Jiménez (2011).

Finalmente, mencionar que en el estudio de los bombeos de la zona se debe considerar la diferenciación hecha entre bombeos someros y profundos, lo cual está plasmado en el Plan Hidrológico de Cuenca 2009, en el Inventario de Captaciones Subterráneas ALBERCA, en el Estudio "DGOHCA, 2002" y otros datos de censos agrarios. En todos los casos, los resultados son muy diferentes, poniendo de manifiesto la incertidumbre respecto a la profundidad de las extracciones.

Adicionalmente, el trabajar con mediciones indirectas supone una disparidad en los resultados estimados, posiblemente debido a tener unidades distintas o haber sido obtenidas con promedios distintos o bajo distintas hipótesis. A manera de resumen, en la Tabla 5.4 se muestran los puntos temporales de la evolución histórica de extracciones y la fuente de donde provienen los datos.

Período	Rango de extracción (hm ³)	Fuente documental
2009 - actualidad	834	Extracciones de OPH 2009
1998 – 2008	1120 – 834	Análisis de fotointerpretación
1940 – 1999	0.0 – 1145	Estudio DGOHCA 2002
1971 - 1980	226 - 1089	Crecimiento extracción profunda

5.1.2.3. Niveles piezométricos

En este apartado se recopila una síntesis del estudio llevado a cabo por Jiménez (2011) sobre la variabilidad piezométrica en la CHD. De acuerdo a los trabajos realizados anteriormente en la zona de “Los Arenales”, estos describen un sistema muy complejo, heterogéneo, anisótropo, confinado o semiconfinado según la zona estudiada. Jiménez analiza el acuífero en base a la piezometría, estudiando el estado y evolución de los niveles piezométricos hasta 2010, con el objetivo de la comprensión global del funcionamiento del acuífero.

Los datos disponibles corresponden con una base de datos de piezometría de la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) de la CHD de 2009, con 55,413 registros de piezómetros en la cuenca del Duero. Se trata de una recopilación de datos de diversas fuentes: CHD, IGME, Ministerio de Medioambiente Rural y Marino (MARM) y el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). Se trata de series temporales de nivel, transformadas a nivel piezométrico. Se ha dividido la serie temporal en tres períodos, tal como se muestra en la Figura 5.12.

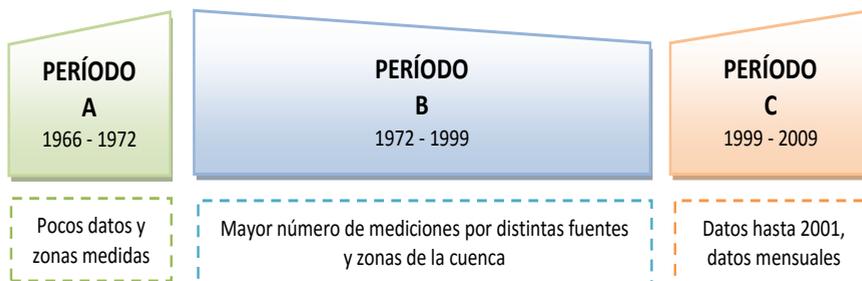


Figura 5.12. Rangos de series temporales de piezómetros en la cuenca del Duero. Fuente: Elaboración propia.

El análisis piezométrico previo se llevó a cabo para las distintas Masas de Agua Subterránea (MAS), salvo en la región de “Los Arenales”, donde se agruparon a manera de “unidad de modelación” (Umod), usada actualmente por la Oficina de Planificación Hidrológica de la CHD. En el

caso de Los Arenales, las MAS analizadas implican a la propia de Los Arenales, Medina del Campo y Tierra del Vino, que están porcentualmente repartidas en las Umod Arenales Esgueva-Cega, Arenales Adaja-Zapardiel y Arenales Guareña-Trabancos.

Se trabajó con grupos de piezómetros según la cota del pozo y su profundidad, dividiendo los piezómetros en superficiales y profundos, según un límite de 200 metros de profundidad. Para el caso de la zona de Los Arenales, se dividió el bloque superficial en dos partes: de 0-100m y 100-200m. En la Tabla 5.5 se muestra un resumen de la tendencia de los niveles piezométricos en las distintas MAS del Duero para el período 1972-1999 y si es el caso, la tendencia para el período 1999-2009.

MAS	Profundidad	Tendencia	Piezómetros principales
	(m)	1972-1999	(código)
Arenales Guareña	< 100	(-) 4-5m	151650002, 131630011, 131640045, 141710002, 141840001
	100 - 200	(-) 5-8m	151950001, 131660005, 141930005
	200 <	(-) 20-40m	151750001, 02.17.063, 141940001
Arenales Adaja-Zapardiel	< 100	(-) 7-15m	161940001, 161660003, 151940003
	100 - 200	(-) 10-20m	151780002, 161770002, 02.17.079, 151670002
	200 <	(-) 30-40m	151730002, 161830002, 02.17.073
Arenales Eresma-Cega	< 100	Estable	161670001, 161630001, 161660003
	100 - 200	(-) 5-25m	161660001, 161660002, 02.08.25
	200 <	(-) 20-30m	02.17.074, 02.08.026
Zona de Los Páramos	< 200	(+ -) 10m	231650001, 161460001, 02.13.011
	200 <	(-) 25-40m	171460017, 02.06.107, 02.08.027, 02.08.024
Villafáfila	< 200	(-) 5-8m	131330003, 02.06.089
	200 <	Estable	02.06.090
Carrión	60-250	Estable	160950001, 02.06.106
Tierra de Campos	< 200	(-) 5-15m	141460001, 141360023, 151060001, 141440003
	200 <	(-) 9-25m	02.06.093, 141320005

Aluviales del Duero: Tordesillas-Zamora	100 <	(-) 10-20m	161560002, 161570001
Aluviales del Duero: Pisuerga-Arlanzón	120 <	Estable	171270001, 181170001
Tordesillas	< 200	(-) 10-30m	141580001, 151560002, 141530002, 02.06.104
	200 <	(-) 20-45m	02.06.096, 141570001, 02.06.07
Ayllón		(-) 20m	191630001, 191630002
Salamanca	< 200	Estable	142050001, 131720002, 131930002, 131860001
	200 <	(-) 10m	02.19.032, 131830002, 02.19.31

Las principales conclusiones del análisis piezométrico hecho por Jiménez (2011), se presentan a continuación:

- i. Dada la heterogeneidad de los materiales y la distribución espacial de las extracciones, la diferenciación inicial de la piezometría en 3 niveles de profundidad (0-85m, 85-250m y >250m), no se correspondía con los valores de nivel piezométrico esperado en muchos casos.
- ii. Existen zonas con nivel piezométrico constante en toda la serie, aquellas zonas alejadas de los bombeos intensos (MAS Salamanca, Villafáfila, Aluviales del Pisuerga, Arlanzón, Carrión y zonas altas de Tierra de Campos, Tierra del Vino, Medina del Campo y Los Arenales).
- iii. La concentración de bombeos es mayor en las MAS Arenales y Medina del Campo, que se corresponde con los mayores descensos del nivel piezométrico.
- iv. En la MAS Tierra del Vino los bombeos son menores y los descensos registrados están influenciados por la afección de bombeos intensos en Los Arenales y Medina del Campo y la influencia del tramo final del Duero.
- v. El resto de extracciones de magnitud considerable se ubican en las MAS Tordesillas y bajo Los Páramos.
- vi. Los descensos bajo Los Páramos están influenciados por los descensos de Los Arenales, generando atracción del flujo de esta zona, desviando el flujo natural que tendría como destino el tramo 7-8 del Duero.
- vii. Existe una estabilización de los descensos en el período 1997-2002, junto con una recuperación en el 2005, sin llegar a ser de la misma magnitud del descenso previo. La estabilización y ascenso son más verificables en zonas de gran magnitud de descenso.

Para complementar el análisis de las relaciones río-acuífero en los tramos 8 y 9 del Duero, es necesario verificar la consistencia y correspondencia de los niveles piezométricos en distintas zonas del acuífero, tanto en la capa 1 como en la 2 del modelo de acuífero por Autovalores. Para tal efecto, ha sido necesario agregar nuevos parámetros de control al archivo de cálculo para su ejecución en el modelo AQUIVAL 2.0, de tal forma que estos sean capaces de representar los “Niveles Medios” del acuífero por zonas y por capas.

En conjunto, fueron agrupadas de 2 a 4 celdas (porciones de masas de agua subterránea) para evaluar estos nuevos datos al modelo, mismos que suman un total de 9 nuevos parámetros de control, con sus respectivos campos de acción ó zonas de influencia, tratando que fuesen representativos de cada una de las masas subterráneas en las que se divide el acuífero del Duero.

Las zonas seleccionadas comprenden a 5 masas de la capa 1 y 4 de la capa 2 (Tabla 5.6). Se presenta el total de celdas usadas para la obtención del nivel piezométrico medio en cada zona representativa, con códigos 100 representativos de la capa 1 y los códigos 200 la capa 2.

Código	Nombre de la masa	No de celdas
101	Medina del Campo Capa 1	4
102	Cauce del río	2
103	Tordesillas	3
104	Los Arenales	4
105	Terciario Detrítico bajo los Páramos Capa 1	4
206	Medina del campo Capa 2	3
207	Tierra de Campos	4
208	Carrión	4
209	Terciario Detrítico bajo los Páramos Capa 2	4

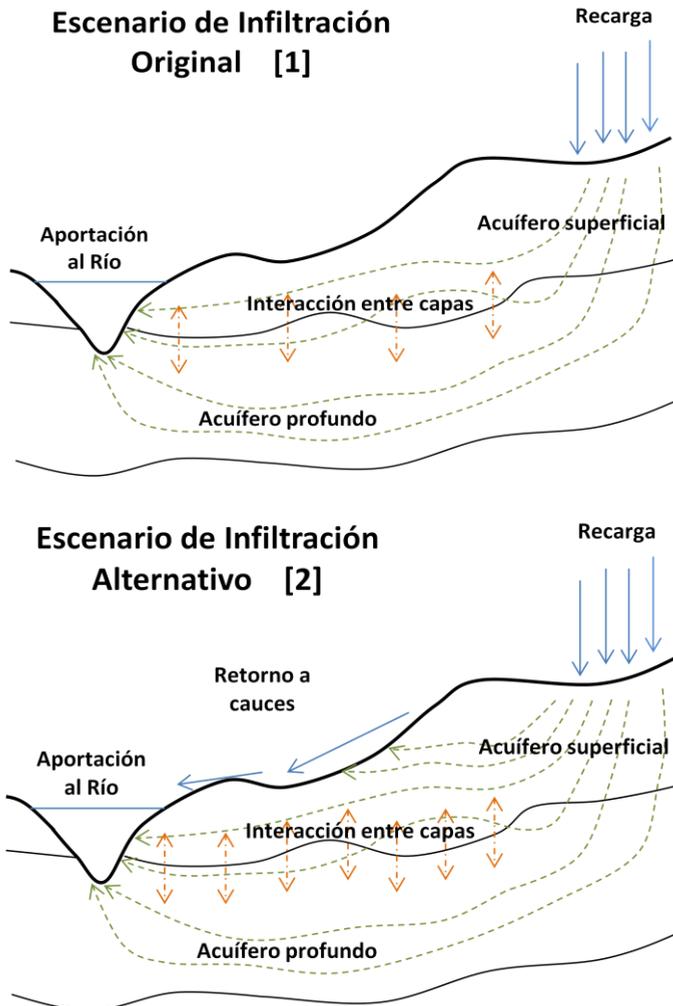
Las zonas seleccionadas, además del interés práctico de evaluación de la descarga registrada por el modelo y su correspondencia con las descargas aforadas en la zona, permiten tener una idea global del comportamiento de la evolución de los niveles piezométricos de las zonas y en ambas capas del acuífero.

Estas consideraciones serán retomadas y ampliadas más adelante en la presentación del capítulo del caso de estudio, desarrollando el apartado de simulación hidrológica subterránea del acuífero del Duero.

5.1.2.4. Escenarios de infiltración

5.1.2.4.1. Hipótesis del flujo subterráneo en el acuífero terciario del Duero

Originalmente, los modelos lluvia-escorrentía que se han utilizado en la cuenca (TEMEZ, SIMPA, etc.), tienen como base un escenario con zonas de infiltración desde las partes altas de la cuenca (Figura 5.13a), considerando principalmente flujos regionales en el acuífero. Un escenario alternativo (Figura 5.13b) plantearía la interacción entre aguas superficiales y subterráneas de manera más local, repercutiendo sobre el volumen de recarga (disminuyéndolo) y sobre el caudal circulante en cauces de río (incrementando la porción de caudal base), producto de las relaciones río-acuífero presentes.



Figuras 5.13a y 5.13b. Escenario original y alternativo de infiltración para el acuífero terciario del Duero. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, para realizar el análisis del funcionamiento del acuífero terciario del Duero, se establecieron distintas hipótesis de circulación del agua subterránea en la zona de estudio. Se ha asumido que el acuífero se encuentra dividido en dos grandes capas:

- i. Capa I: compuesta por masas de agua someras
- ii. Capa II: compuesto por masas de agua profundas

Se asume que en la capa superior existe un flujo local, lo que supone que la recarga de lluvia y retornos superficiales se vean rápidamente reflejados en el caudal aforado en las corrientes superficiales presentes, producto de la influencia en la conexión río-acuífero de las masas de agua subterránea y las corrientes que la cruzan. Por su parte, en la capa inferior (Capa II), se asume la existencia de flujo regional desde las zonas extremas hacia el centro de la cubeta, lo cual se presenta a velocidades mucho menores que en la capa superior.

En una primera asunción (escenario [1]), se consideró que la serie de recarga de lluvia, derivado del procesamiento de datos en SIMPA, se distribuía uniformemente por las zonas externas o más alejadas de la cubeta del acuífero, lo que, de cara al análisis del movimiento del flujo en el acuífero por Autovalores, le confería al modelo unas velocidades de circulación muy altas, mismas que pueden explicar los caudales de salida en los tramos de control 8 y 9 del Río Duero, donde se supuso que se tienen las descargas al río por parte de ambas zonas del acuífero. No obstante, la determinación de los valores de los parámetros de calibración del acuífero no fueron del todo confiables, pues no reprodujeron aceptablemente el histórico de caudales registrados en esa zona.

Sin embargo, estos mismos parámetros de transmisividad y almacenamiento, no explican el abatimiento de niveles histórico registrado en el acuífero, sobre todo, en las zonas más extremas del acuífero, donde se presentan descensos más abruptos que en las zonas centrales. Por este motivo, se hizo una segunda asunción (escenario [2]), donde es supuesto un intercambio de caudal en determinadas masas de agua subterránea (MAS) y las corrientes superficiales, de acuerdo a los supuestos de recarga por MAS deducidos en el apartado de demandas.

5.1.2.4.2. *Variabilidad en la recarga*

Una fuente de incertidumbre en la realización del balance en la cuenca es la obtención de un valor de recarga apropiado y congruente con los volúmenes anuales de la cuenca.

Tal como se mostrará en el apartado de balance de recursos, el valor de la recarga proveniente del modelo SIMPA (1996), de la Tabla 5.7, puede estar sobre-estimada. Por tanto, Jiménez (2011) reajusta la recarga, de acuerdo a consideraciones sobre la distribución de los volúmenes del balance, reduciendo el rango de recarga un 37%, pasando de un máximo de 1129hm^3 a uno de 711hm^3 . La Figura 5.14 muestra las series de recarga para (i) la hipótesis de reducción de recarga en la serie original de SIMPA y (ii) la hipótesis de recarga uniforme en el acuífero,

separando los picos de recarga de la serie original mediante un modelo de acuífero de tipo pluricelular, el cual laminará sólo un máximo de $539\text{hm}^3/\text{año}$, lo que representa un 52% de reducción respecto de la hipótesis de recarga original proveniente del modelo SIMPA.

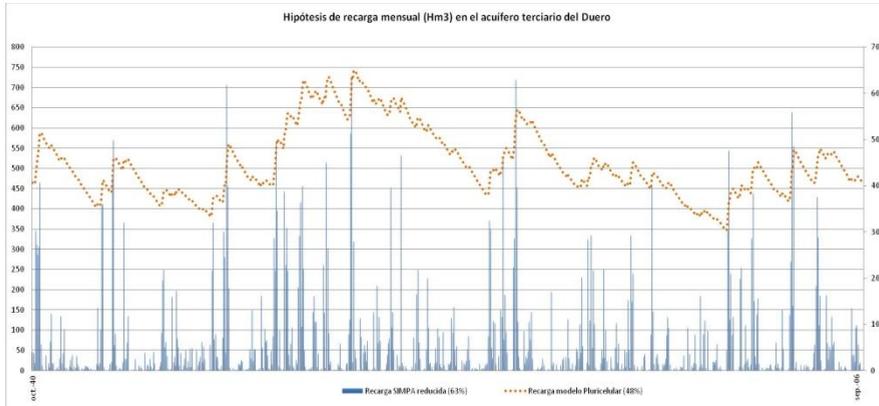


Figura 5.14. Series de recarga mensuales modificadas de SIMPA, asociadas a una hipótesis de recarga. Fuente: Simulación del Modelo SIMPA (2008).

Como se puede notar, distintos valores de recarga se han obtenido, de acuerdo al modelo y metodología seguidos. En particular, la Figura 5.15a muestra la recarga en las MAS de interés para los períodos temporales 1940-2006, 1970-2006 y 1980-2006 (cuando es utilizada la hipótesis de la serie de recarga de SIMPA). Además, la Figura 5.15b muestra la recarga para los mismos períodos temporales, pero con la hipótesis de recarga uniforme.

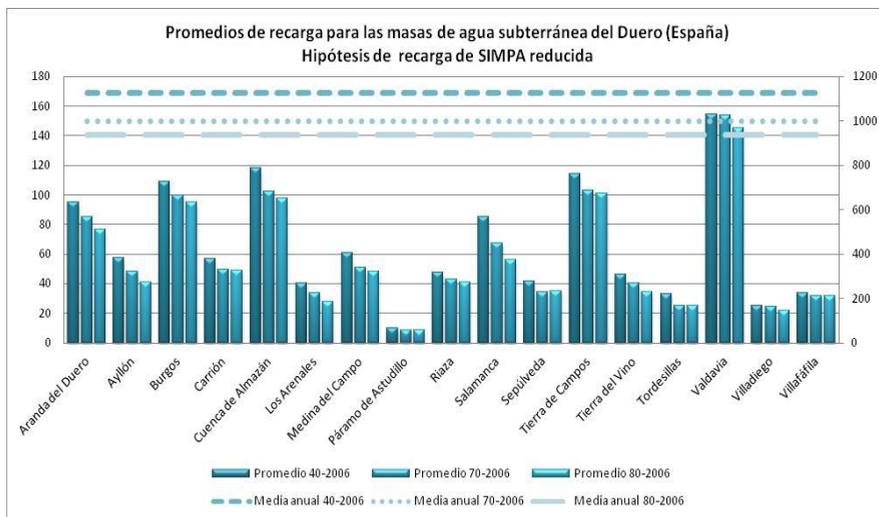


Figura 5.15a. Valores de recarga media anual para las MAS del Duero, según las hipótesis de recarga SIMPA reducida. Fuente: Elaboración propia.

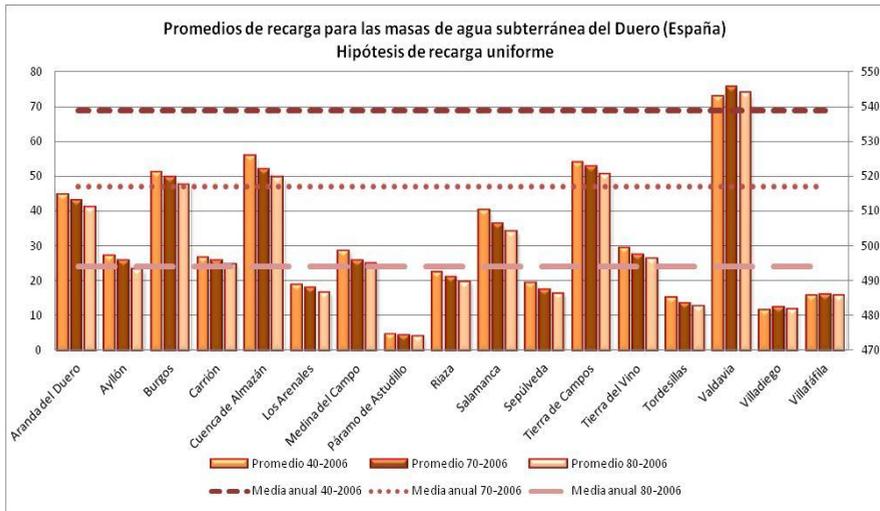


Figura 5.15b. Valores de recarga media anual para las MAS del Duero, según las hipótesis de recarga SIMPA uniforme. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la recarga uniforme (Tabla 5.8) del período 1980-2006 (con una media de recarga de 494hm^3), se propone como período de arranque para las pruebas en el modelo de acuífero por Autovalores del Duero (Figura 4.15b).

5.1.2.5. Aforos en tramos de interés del Río Duero

En este apartado se expone la síntesis del análisis de aforos llevada a cabo por Jiménez (2011), que sirve como base para continuar con el estudio y entendimiento del funcionamiento del flujo en la cuenca del Duero. A continuación se expone el procedimiento llevado a cabo para el análisis y los resultados obtenidos del mismo. Finalmente, se hace énfasis en los piezómetros y zonas de mayor fiabilidad para comparar los resultados de los subsecuentes modelos de flujo utilizados en el establecimiento del funcionamiento del acuífero terciario del Duero. Debido a la complejidad que representa el acuífero terciario del Duero y la dificultad que supone obtener información respecto de las relaciones río-acuífero (en función de la pluviometría y la piezometría), el contrastar los datos con aforos realizados en distintos tramos de río, es de gran interés para cuantificar esta conexión. El procedimiento que fue utilizado para analizar la conexión río-acuífero fue la restitución a régimen natural del hidrograma, valorándose las afecciones en el sistema entre el período de 1960 y 1990.

El análisis por tramos consistió en interpretar el comportamiento de ciertos tramos de río, los cuales estuviesen acotados por dos o más estaciones de aforo, midiendo la diferencia entre los valores de caudal mensual aforado en ambas estaciones del tramo, de tal forma que donde

la diferencia de caudales sea negativa, se entiende que el río se comporta como un tramo perdedor de caudal o en caso contrario, como ganador.

Los caudales aforados aguas abajo de un tramo de estudio dependen de los caudales circulantes en la estación de aforo aguas arriba, del drenaje o infiltración respecto al acuífero, de las aportaciones superficiales de la intercuenca entre ambas estaciones de aforo y de las derivaciones o retornos de caudal provenientes de distintos usos. De esta forma, el balance de masas estará determinado por la siguiente expresión:

$$[Q_{aforoA_{abajo}}] = [Q_{aforoA_{arriba}}] + [Esc_{sup}] \pm [Deriv \text{ ó } Ret] \pm [Dren \text{ ó } Filt_{acu}]$$

Algunas consideraciones sobre la fórmula anterior se escriben a continuación:

- i. Para no tomar en cuenta la escorrentía superficial, se opta por trabajar con datos de los meses de estiaje (Julio, Agosto, Septiembre), suponiendo que en ese período la aportación superficial es muy pequeña, con lo que no es necesario hacer la división entre caudales (base y superficial) del hidrograma.
- ii. Las derivaciones y retornos fueron considerados como un valor aproximado de las asignaciones dadas por la CHD.
- iii. El régimen de caudales en un tramo del río se ha estimado como valor neto de la suma de las derivaciones y la resta de los retornos, mediante la expresión simplificada siguiente:

$$[Q_{aforoA_{abajo}}] - [Q_{aforoA_{arriba}}] = \pm [Deriv \text{ ó } Ret] \pm [Dren \text{ ó } Filt_{acu}]$$

- iv. La identificación de episodios de lluvia esporádica es factible en muchas ocasiones pues genera picos bruscos en la tendencia general del resto de valores de caudal registrados en el gráfico.
- v. Se considera que las relaciones río-acuífero son constantes a lo largo del año, pues el objetivo del trabajo es deducir el comportamiento a gran escala del acuífero.
- vi. Para estimar un valor de descarga total anual del acuífero, se asume que el acuífero es homogéneo e independiente respecto a la época del año en que se evalúe, por lo que la multiplicación de la descarga anual será la multiplicación de la mensual (de estiaje) por 12.
- vii. Debe tomarse en cuenta la construcción de infraestructuras (si es el caso) en cada tramo de análisis de restitución del régimen natural del caudal circulante, pues canales, presas, derivaciones o retornos influyen directamente en el registro de caudales entre estaciones de aforo.
- viii. La situación ideal de análisis serían tramos de cauce cortos, sin afluentes intermedios y delimitados por aforos y que la serie de registro de aforos sea lo más larga posible.

Los tramos utilizados para calibrar el funcionamiento del acuífero modelado en Autovalores (capítulo 5 de la tesis), son los tramos 8 y 9 del cauce del Río Duero, para los cuales se genera una serie de caudales de descarga por la relación río-acuífero existente. En la Figura 5.16 se muestra la ubicación de los tramos 8 y 9 del río Duero, donde se realizan las restituciones y el análisis de aforos más importante del modelo de flujo subterráneo.

Los caudales obtenidos con la herramienta de modelación subterránea AQUIVAL 2.0 pueden ser comparados con los gráficos de evolución (en régimen natural) de los tramos 8 y 9 del bajo Duero. Algunos de los rasgos más característicos de estos tramos son:

5.1.2.5.1. Río Duero, tramo 8

- i. Este tramo de río se ubica entre las estaciones de aforo 2062 (Toro) y 2054 (Villamarciel), en el cual llegan las aguas de los ríos Guareña, Zapardiel y Trabancos. De estos, solo se dispone información del río Guareña, sin embargo, su caudal es inferior en dos órdenes de magnitud respecto al caudal circulante por el Duero y no se considera para el análisis de los caudales en el tramo de río.
- ii. Se tiene una detracción aproximada de 18.7 hm³/mes, producto de las demandas y retornos agrícolas de la zona.
- iii. Las series de verano e invierno respectivamente, se muestran en las Figuras 5.17a y 5.17b, las cuales sirven para detallar la información subsecuente del análisis en este tramo del Duero.

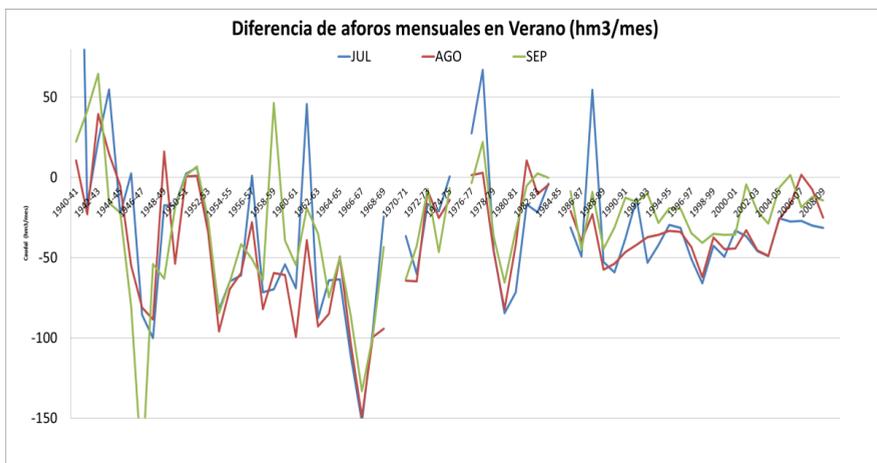


Figura 5.17a. Diferencial de aforos en el Tramo 8 del Río Duero (Toro-Villamarciel), para los meses de verano. Fuente: Jiménez (2011).

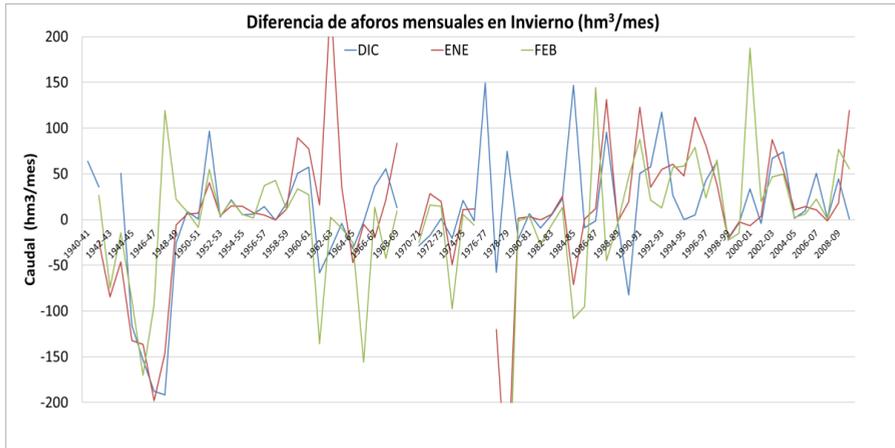


Figura 5.17b. Diferencial de aforos en el Tramo 8 del Río Duero (Toro-Villamarciel), para los meses de invierno. Fuente: Jiménez (2011).

- iv. En época de verano, al menos hasta la entrada en funcionamiento de canales de derivación en 1945 y 1946, el tramo se comportaba como ganador o en equilibrio. Posterior a ese periodo, su comportamiento es como perdedor en gran parte de la serie.
- v. En época de invierno, la tendencia es una oscilación en torno a cero, con valores ligeramente positivos en algunos años.
- vi. Existe una etapa inicial de 10-12 años (hasta 1945), donde el río se puede considerar ganador (entre -20 y $50\text{hm}^3/\text{mes}$).
- vii. Tras la entrada en funcionamiento de los canales de derivación, la tendencia cambia a perdedor (valores de hasta $-70\text{hm}^3/\text{mes}$), hasta 1970 donde ascienden rápidamente.
- viii. De 1970 en adelante, los valores oscilan entre 0 y $-50\text{hm}^3/\text{mes}$.

En este tramo se asume una serie de descarga/recarga media anual tal como se muestra en la Figura 5.18, correspondiente al promedio entre meses de verano e invierno para el Tramo 8 del Duero. Dicha serie espera ser reproducida con el modelo por Autovalores desarrollado en AQUIVAL 2.0 para la zona de estudio. A grandes rasgos, la serie muestra valores cercanos a $200\text{hm}^3/\text{año}$ aportados por el acuífero y alrededor de $400\text{hm}^3/\text{año}$ detraídos del río. Los grandes picos corresponden o bien a periodos húmedos o periodos de gran extracción en la zona.

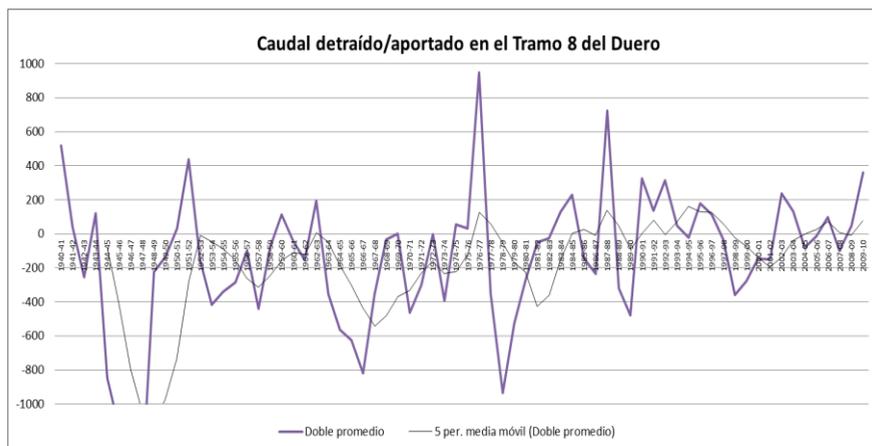
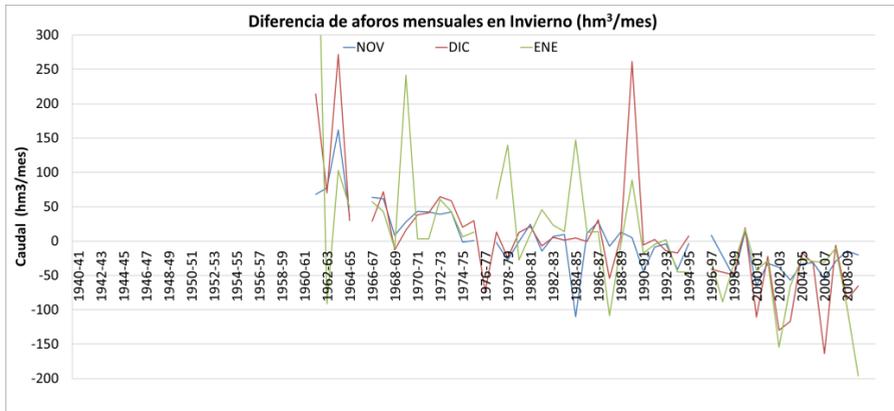
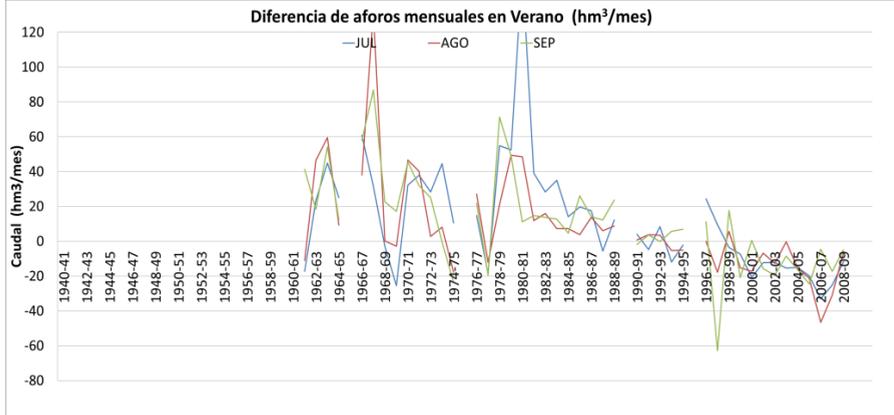


Figura 5.18. Serie de caudal anual aportado/detruido en el Tramo 8 del Río Duero. Fuente: Jiménez (2011).

5.1.2.5.2. Río Duero, tramo 9

- i. El tramo está ubicado entre las estaciones de aforo 2066 (Carrascal) y 2062 (Toro), que se trata del último tramo en contacto con el acuífero terciario.
- ii. En el tramo existen detracciones del orden de $1.3 \text{ hm}^3/\text{mes}$.
- iii. Las series de verano e invierno respectivamente, se muestran en las Figuras 5.19a y 5.19b, usadas en el análisis de este tramo del Duero.
- iv. Las diferencias de caudal oscilan hasta el año 1981, donde se tiene comportamiento ganador del río (40 y $20 \text{ hm}^3/\text{mes}$ de ganancia y en torno a -20 hm^3 de pérdida).
- v. Posteriormente, la tendencia es descendente hasta la actualidad, con rangos entre 20 y 40 hm^3 de ganancia y/o -10 y -30 hm^3 de pérdida.
- vi. A escala anual, se aprecia un descenso de la descarga desde valores medios de 400 y 600 hm^3 hasta los -400 y -500 hm^3 .



Figuras 5.19a y 5.19b. Diferencial de aforos en el Tramo 9 del Río Duero (Carrascal-Toro), para los meses de verano e invierno. Fuente: Jiménez (2011)

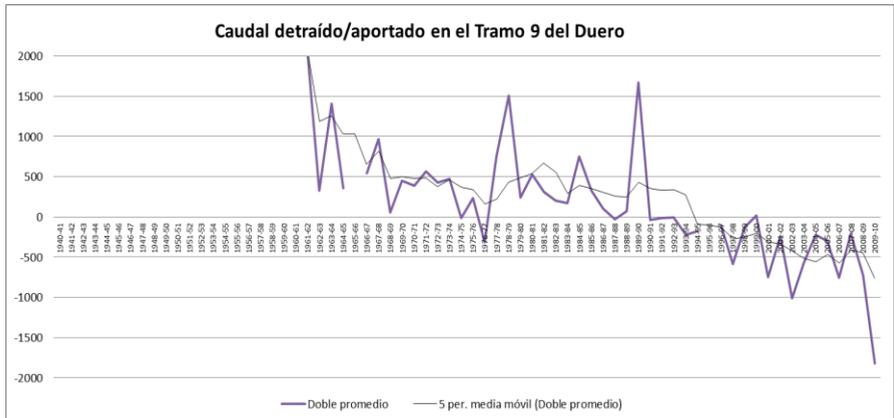


Figura 5.20. Serie de caudal anual aportado/detrado en el Tramo 9 del Río Duero. Fuente: Jiménez (2011).

En este tramo (9) se asume una serie de descarga/recarga media anual tal como se muestra en la Figura 5.20, que se corresponde con el promedio entre meses de verano e invierno para el Tramo 9 del Duero. Dicha serie espera ser reproducida con el modelo por Autovalores desarrollado en AQUIVAL 2.0 para la zona de estudio.

5.1.3. Balance de recursos en el acuífero del Duero

En este apartado se presenta un resumen del balance del acuífero terciario del Duero, lo cual es la base para comprender el funcionamiento del acuífero y su relación con los demás términos del balance. Conocer y estimar cada componente del balance asocia una gran incertidumbre, por lo que nos valemos de hipótesis para asumir ciertos valores del balance y a partir de ahí probar, validar o rechazar las hipótesis, con la ayuda del modelo de flujo subterráneo desarrollado para tal efecto en Autovalores.

Jiménez (2011) propone un balance en régimen natural (Tabla 5.7) para un escenario estacionario en el acuífero terciario del Duero, usando la fórmula de balance siguiente:

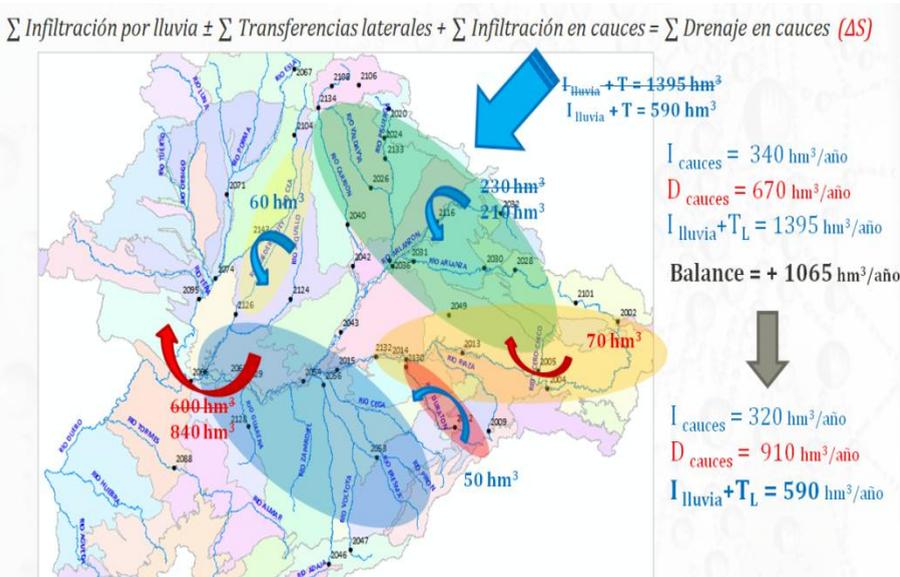
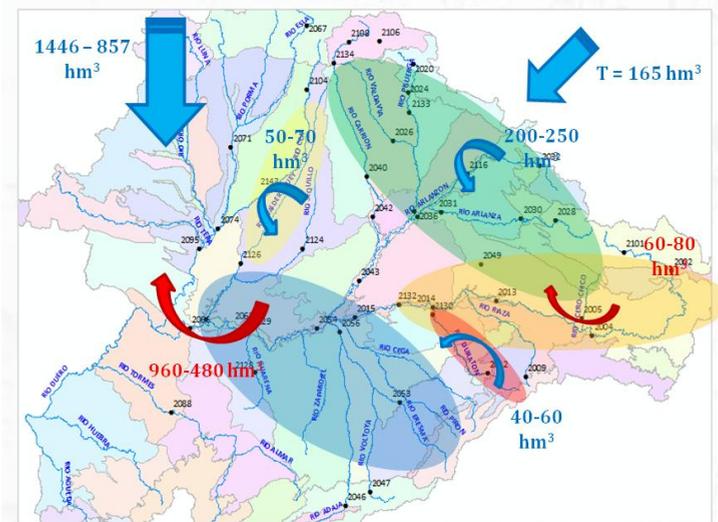
$$\sum \text{infiltración por lluvia} + \sum \text{infiltración en cauces} \pm \sum \text{transferencias laterales} = \sum \text{Drenajes en cauces}$$

Tabla 5.7. Balance general del acuífero terciario del Duero, en hm³.
(Fuente: Jiménez, 2011).

Régimen natural		Escenario estacionario		
		ENTRADAS		
Término del balance	Descripción	Valor máximo	Valor mínimo	Valor considerado
Infiltración en cauces	Incluye varias zonas	740	170	370
Infiltración por lluvia + Transferencias	Valor total	1611	1022	590
TOTAL:				960
		SALIDAS		
Drenaje en cauces	Incluye varios cauces	1260	-90	960
TOTAL:				960

En la tabla anterior, el valor de infiltración por lluvia supone un 50% del registrado en la serie de recarga de SIMPA del Duero, equilibrándose con la infiltración y drenaje dada en cauces, lo que produce un balance total de recursos de 960hm³ anuales.

Las Figura 5.21a y 5.21b resumen los flujos de agua en el acuífero terciario del Duero, que incluye las recargas por lluvia, infiltración en cauces, drenajes y transferencias laterales. De esta forma, de acuerdo a Jiménez (2011), se considera un valor medio anual de infiltración y transferencia lateral de 590hm³.



Figuras 5.21a y 5.21b. Balance inicial del acuífero terciario del Duero y Reajuste de las componentes del balance en el acuífero. Fuente: Jiménez, 2011.

De acuerdo a Jiménez (2011), los valores de las componentes del balance hidrológico en la cuenca del Duero (en régimen natural) posiblemente se correspondan a los mostrados en la Figura 5.21b. Por otro lado, el balance de recursos para el régimen alterado (situación actual) estaría repartido como se muestra en la Figura 5.22.

$$\sum \text{Infiltración lluvia} \pm \sum \text{Infiltración/ Drenaje cauces} \pm \sum \text{Transferencias laterales} - \sum \text{Bombeos} = \Delta \text{ Almacenamiento}$$

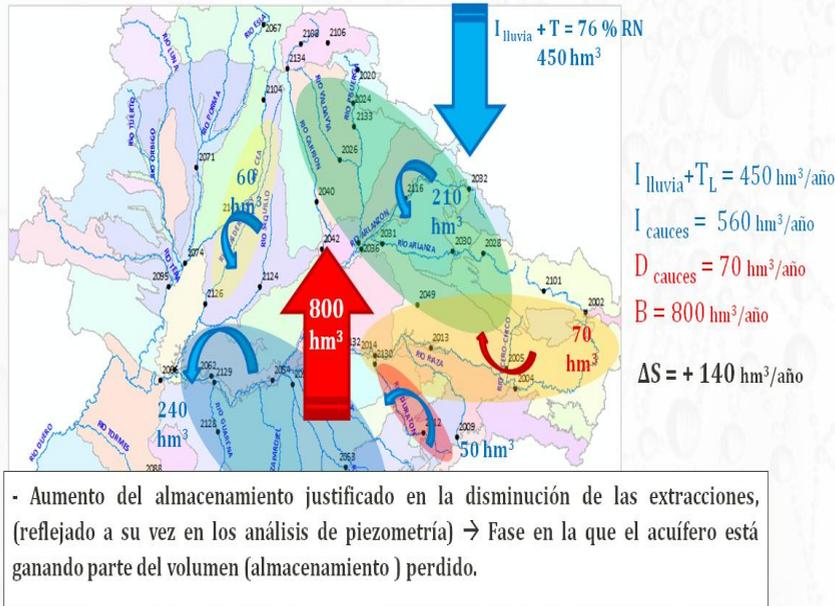


Figura 5.22. Balance del acuífero terciario del Duero para la situación actual (año 2009). Fuente: Jiménez, 2011.

Para el balance del estado actual (año 2009) de recursos en el acuífero terciario del Duero, se deduce que: (i) existe un valor natural de infiltración de lluvia y transferencias laterales del orden de 450 hm^3 ; (ii) el intercambio río-acuífero, comúnmente dado como infiltración en cauces (del orden de 560 hm^3), y como detracción en tramos de río (del orden de 70 hm^3) y (iii) el valor actual de extracciones es del orden de 800 hm^3 .

Específicamente para el año considerado, los volúmenes globales condicionan una variación positiva en el almacenamiento del acuífero, del orden de 140 hm^3 , dada la reducción del volumen de bombeo de dicho año. Sin embargo, si se considerara el volumen promedio de bombeo de la década 1990-2000 (del orden de 1100 hm^3), la variación en el almacenamiento del acuífero es negativa (del orden de -160 hm^3 , directamente relacionado con la disminución de niveles piezométricos en distintas áreas del acuífero.

Finalmente, la Tabla 5.8 resume las posibles recargas al acuífero terciario del Duero, de acuerdo a la hipótesis de asunción de recarga considerada y para un período de tiempo dado. En dicha tabla, la columna de recarga uniforme (del período 1980-2006), es la recarga que finalmente se considera para la modelación del acuífero en Autovalores.

Tabla 5.8. Resumen de los promedios de recarga (hm^3) al acuífero terciario del Duero ($\text{hm}^3/\text{año}$). Fuente: Elaboración propia.

Período	Recarga SIMPA	Recarga modificada	Recarga uniforme
1940 – 2006	1129	711	539
1970 – 2006	1000	630	517
1980 - 2006	936	590	494

5.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL DUERO

5.2.1. Introducción

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la simulación de distintos modelos de flujo subterráneo para el acuífero del Duero (España). En el capítulo de análisis de datos en la zona de estudio fueron presentados los modelos de flujo subterráneo precedentes. Las masas de agua subterráneas (MAS) a modelar se corresponden con distintos sistemas de explotación del Duero (Figura 5.23) y a su vez, estas masas están relacionadas con las sub-cuencas superficiales modeladas en EVALHID (Figura 5.28), a las cuales les fue asignada (semi-distribuidamente) la asunción de recarga subterránea asociada a cada MAS.

A partir de estos datos y asunciones, se desarrollaron dos modelos para la simulación del flujo en las masas subterráneas del Duero: (i) un modelo de acuífero simplificado por Diferencias Finitas en PMWIN-ModFlow y (ii) un modelo simplificado resuelto con el método de Autovalores. Los resultados obtenidos con ambos modelos son comparados (en cuanto a niveles piezométricos y caudales de descarga en zonas de interés); adicionalmente son comentadas algunas consideraciones sobre los modelos utilizados y las adecuaciones implementadas en los mismos, correspondientes a la evaluación conjunta de los recursos hídricos en la cuenca de estudio.

En la Figura 5.24 las sub-cuencas de interés (en tonalidades azules), se considera que tienen una interacción directa con las aguas subterráneas (relación río-acuífero), que debe ser tomada en cuenta y modelada adecuadamente. Cada sub-cuenca aporta en distinta medida a la recarga media anual, de acuerdo al análisis previo realizado por Jiménez (2011) en la zona de estudio.

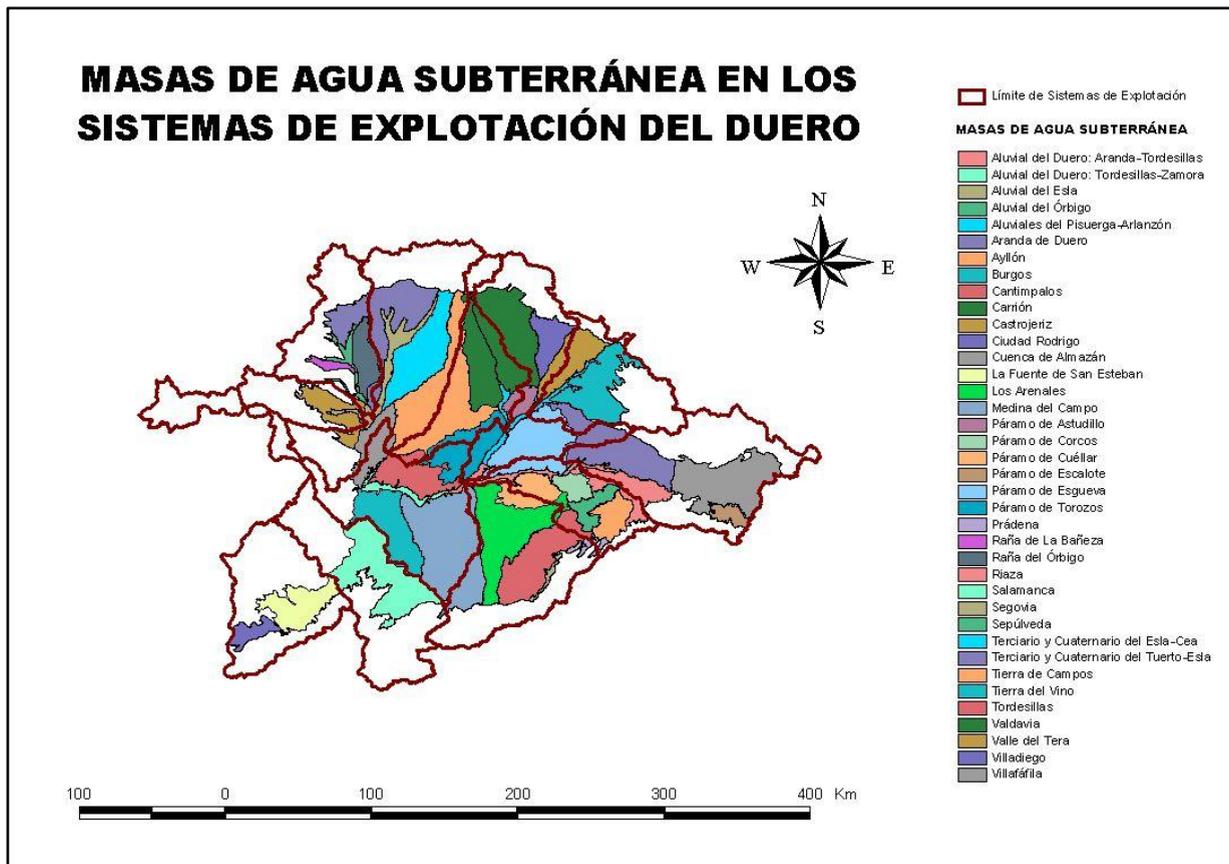


Figura 5.23. Masas de agua subterránea modeladas, asociadas a los sistemas de explotación del Duero (España). Fuente: Elaboración propia.

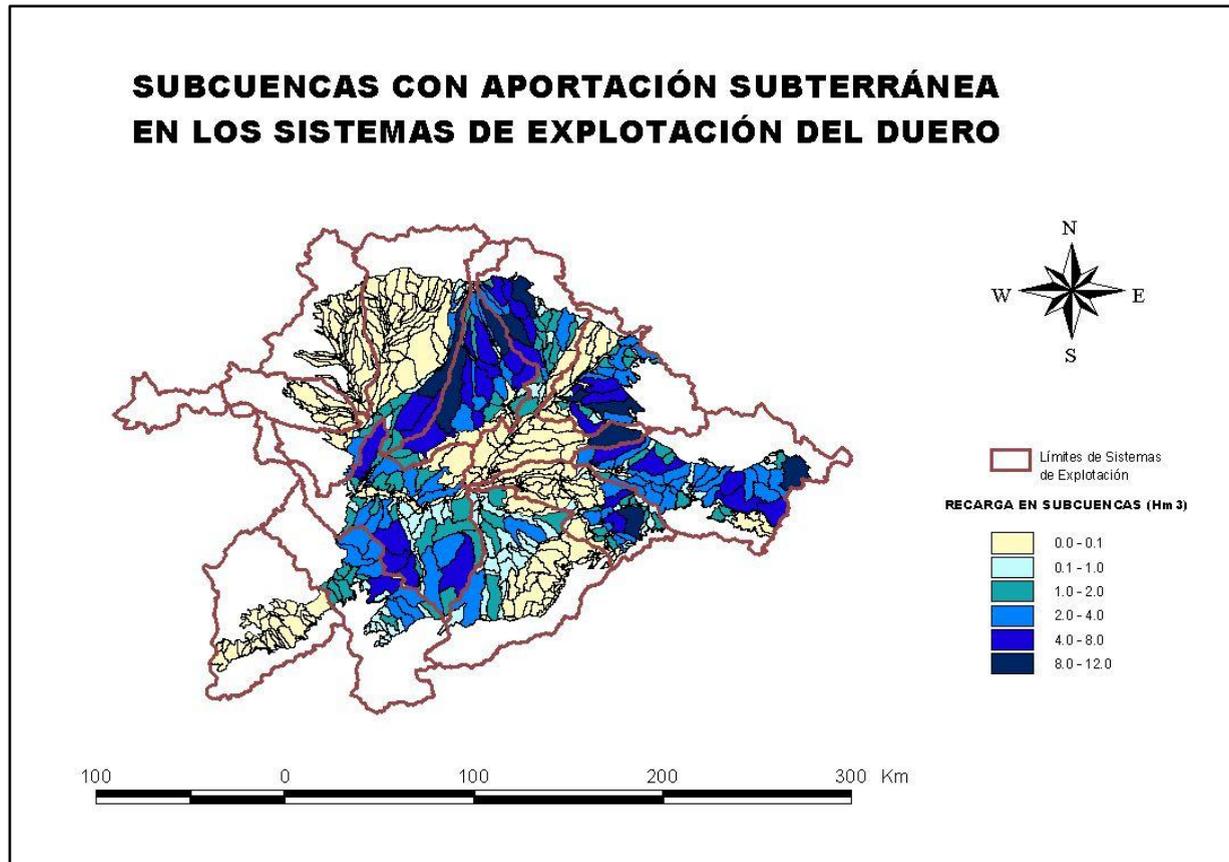


Figura 5.24. Sub-cuencas dentro de los sistemas de explotación que realizan aportación subterránea a los acuíferos del Duero. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Propiedades del modelo simplificado por Autovalores

5.2.2.1. Discretización temporal

Puesto que tratamos con un modelo de flujo subterráneo de tipo interpretativo, el ajuste en el mismo se realiza únicamente en régimen permanente, en un lapso temporal anual. Se considera que el modelo está ajustado a régimen natural cuando las entradas igualan las salidas de agua, sin haber cambio en el almacenamiento del acuífero, obteniendo una piezometría que representará los niveles reales no alterados del acuífero. Por tanto, los conceptos empleados serán valores medios de series de recarga anual por precipitación, descarga media anual por ríos/manantiales, extracciones medias anuales, etc.

Es importante mencionar que la piezometría real del acuífero que se pretende reproducir no es fácilmente obtenible, dado que la misma es el resultado de una serie de factores que condicionan o varían estacionalmente dentro de un año y sobre la distribución temporal y espacial de acciones no naturales sobre el acuífero modelado. Por ello, el ajuste en régimen natural del modelo considerará una piezometría semejante solo a grandes rasgos de los niveles medios observados en pozos y piezómetros de la zona.

5.2.2.2. Discretización espacial

La discretización es de carácter tridimensional, dividiéndose al modelo en filas, columnas y capas. Cada celda del acuífero representa un prisma con características hidrogeológica constantes en todo su volumen. El tamaño de celdas propuesto es de tipo variable, con el propósito de ajustarse de mejor forma a las dimensiones de las masas de agua subterránea a modelar.

Las dimensiones máximas del modelo son 196.2km por 135.5km para la capa superficial 1, con una potencia o espesor medio de 200m; respecto a la capa profunda 2, las dimensiones máximas son de 324.1km por 227.2km, con un espesor medio de 1000m. Por tanto, el modelo simplificado propuesto (Figuras 5.29a y 5.29b) está compuesto por dos capas, con una malla de 17 columnas y 15 filas.

5.2.2.3. Condiciones de borde

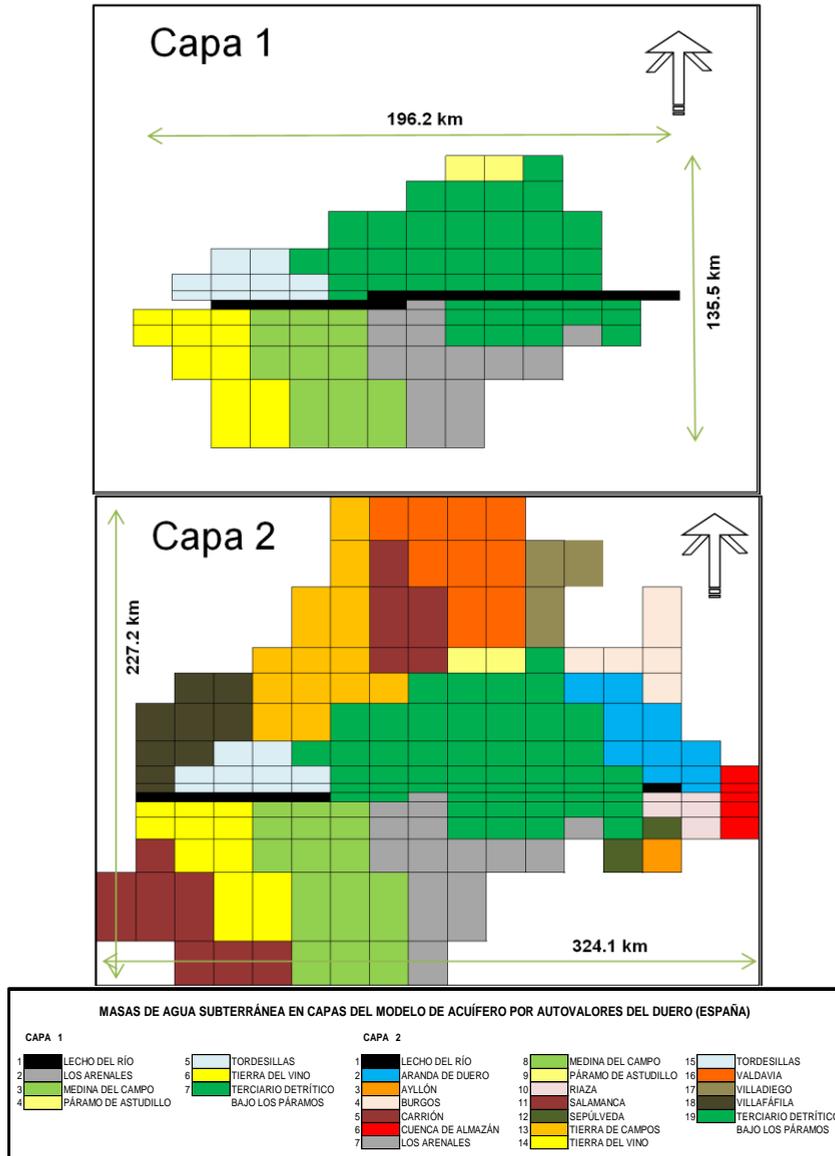
Las condiciones de borde empleadas permiten que el modelo se considere como cerrado en todos los límites del acuífero, por lo que los procesos y mecanismos de funcionamiento del mismo están contenidos en los límites de la zona modelada, además se considera de forma explícita la conexión entre materiales de las distintas celdas y capas del modelo, de manera que se asume la existencia de tres celdas con nivel constante (celdas en color negro de Figuras 5.25a y 5.25b), correspondientes a las zonas de drenaje desde el acuífero hacia el río Duero (parte baja y final del acuífero del Duero, en la zona Oeste).

A su vez, la descarga en estas celdas sirve como punto de comparación entre el diferencial de caudales aforados y restituidos entre los tramos 7-8 y 8-9 del Río Duero, hecha por Jiménez (2011), relacionados con las

Tesis Doctoral

estaciones de aforo 2066-Carrascal, 2062-Toro, 2054-Villamaciel y 2015-Herrera de Duero.

En las Figuras 5.25a y 5.25b se muestra la discretización utilizada en el modelo de Autovalores, con un color de celda distinto por capa, para cada masa de agua subterránea del modelo propuesto, siendo la masa subterránea del Terciario Detrítico bajo los Páramos la de mayor extensión en el modelo, seguida por Media del Campo y Los Arenales.



Figuras 5.25^a y 5.25^b. Capas 1 y 2 del modelo de acuífero por Autovalores del Duero (España)

5.2.2.4. *Parámetros hidrogeológicos*

Puesto que el modelo de flujo propuesto es de tipo interpretativo y dada la escasez o inexistencia de una distribución espacial confiable de los parámetros hidrogeológicos para la mayoría de las formaciones modeladas, se considera ideal en una fase inicial, simplificar los valores de los parámetros, correspondiendo a valores únicos para cada una de las masas del modelo, con el objeto de no incrementar los factores de incertidumbre que pudieran influenciar el resultado. De esta forma, el modelo a simular y calibrar considera unos parámetros hidrogeológicos iniciales (provenientes de valores de literatura y un modelo de acuífero interpretativo ModFlow existente), con valor medio para cada masa subterránea del acuífero, que se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Propiedades hidrogeológicas generales y supuesto de recarga para las masas subterráneas del Duero consideradas en el modelo de acuífero por Autovalores. Fuente: Elaboración propia.

No.	Masa Subterránea	Conductividad Kx,y (m/día)	Almacenamiento (adim)	Área (km ²)	Recarga (hm ³ /año)
1	Aranda del Duero	1.6	0.0006, 0.0012	2292.2	49.13
2	Ayllón	2.0	0.0005	652.3	27.87
3	Burgos	1.5	0.0003	1687.6	56.66
4	Carrión	0.9, 1.0	0.0025	1291.9	29.70
5	Cuenca de Almazán	1.9	0.0005	2379.0	59.47
6	Los Arenales	2.0, 2.5, 3.0	0.0007, 0.0010	2426.2	19.84
7	Medina del Campo	1.1, 2.0, 3.0	0.0010, 0.0025	3627.7	29.86
8	Páramo de Astudillo	1.0	0.0025	396.5	5.02
9	Riaza	1.5, 1.2	0.0006, 0.0007	1063.7	23.58
10	Salamanca	0.9, 3.0	0.0025	2441.1	40.89
11	Sepúlveda	1.6	0.0005	493.1	19.72
12	Tierra de Campos	1.0	0.0025, 0.0050	3338.6	60.30
13	Tierra del Vino	0.9, 1.0, 1.1	0.0025	1549.5	31.53
14	Tordesillas	0.5, 1.0	0.0025	1190.2	15.31
15	Valdavia	1.0	0.0025	2467.2	88.00
16	Villadiego	0.8, 1.0	0.0020	733.8	14.32
17	Villafáfila	1.0	0.0025	1002.6	18.81
TOTAL				29,033.2	590.00

Una mejora de dichos parámetros se realiza mediante la implementación de la metodología GLUE, en función de distintas asunciones. La asunción inicial se centra en asociar la incertidumbre generalizada de la obtención de caudal de descarga del acuífero, respecto de sus parámetros que rigen el flujo subterráneo en el mismo. Dentro de esta asunción, se considera al modelo con un reparto semi-distribuido de la recarga natural por sub-cuenca superficial y por masa subterránea en conexión, de acuerdo a lo registrado en la Tabla 5.9. Este dato proviene de las calibraciones de las sub-cuencas y sub-zonas, presentes en los sistemas de explotación superficial de la cuenca del Duero, en función de la adecuación metodológica propuesta para el tratamiento de los

modelos hidrológicos superficiales (asociación selectiva de cuencas superficiales con recarga a masas subterráneas específicas) .

5.2.2.5. *Acciones sobre el modelo de acuífero*

Para comprobar el correcto funcionamiento del modelo de flujo desarrollado y su subsecuente mejora, se consideran distintas acciones de manera generalizada. Las acciones sobre el modelo (en régimen natural) pueden entenderse como las entradas y salidas de agua en las masas subterráneas.

Respecto a las entradas al acuífero, el aporte de agua proveniente de la recarga se divide de acuerdo al reparto por masas de agua subterránea propuesto y validado por usuarios locales y los modelos lluvia-escurrentía calibrados (Anejo A1), de acuerdo a los datos de la Tabla 5.9. Por su parte, las salidas del acuífero se darían por los materiales permeables de la cuenca, a manera de descarga por ríos, drenes, manantiales o zonas húmedas.

El modelo de acuífero propuesto considera la siguiente simplificación: las salidas del modelo tienen como mecanismo de descarga de las masas subterráneas, producto de (i) las salidas por cauces superficiales, dadas en una relación río-acuífero que debe ser evaluada; (ii) la descarga de caudal por gradiente del flujo regional en el acuífero, considerando los últimos tramos del Río Duero que pasan sobre la cuenca como las zonas de descarga.

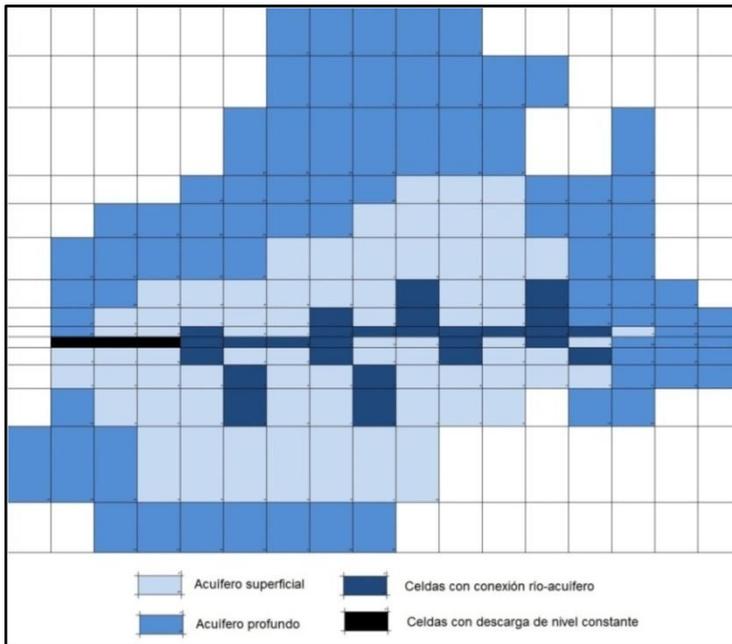


Figura 5.26. Asignación de celdas con conexión río-acuífero y de nivel de descarga constante en el modelo de flujo subterráneo del Duero. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de acuífero propuesto (Figura 5.26), permite simular de manera sencilla el flujo entre una corriente superficial y las masas del acuífero, mediante el uso de parámetros y variables auxiliares para cada celda en conexión con corriente superficial, las cuales son: (i) la conductancia del lecho semi-permeable entre el río y el acuífero, (ii) el nivel de agua en el río, (iii) la cota del fondo del cauce y (iv) el nivel piezométrico simulado para cada paso de tiempo.

En la Figura 5.26 se identifican 27 celdas del modelo de acuífero con conexión río-acuífero, repartidas sobre la primera capa (acuífero somero). Para cada celda con condición de conexión con río se le ha asignado un nivel medio de agua en el río según la cota media del segmento (proporcional a la dimensión de la celda y el tramo físico), mientras que la cota del fondo del cauce se considera a 5m por debajo del nivel de agua del tramo de río.

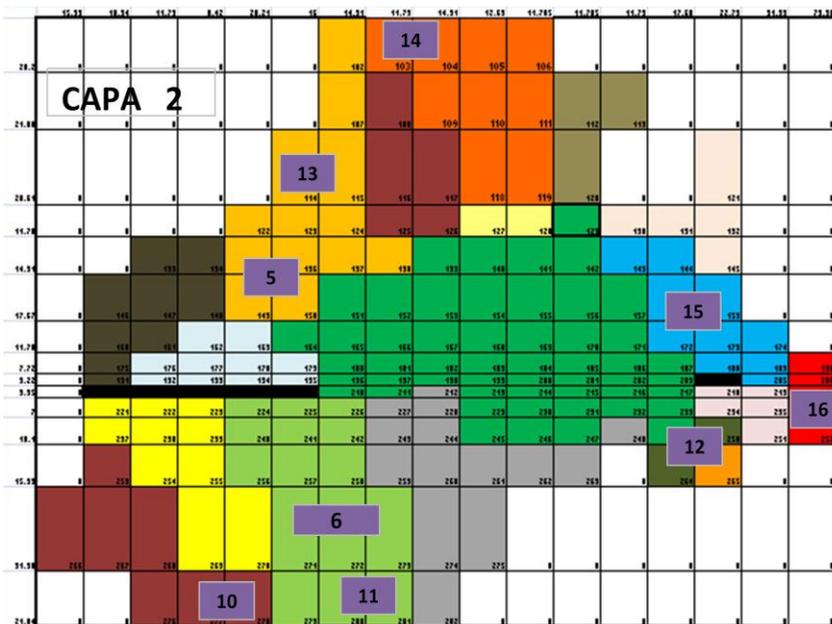
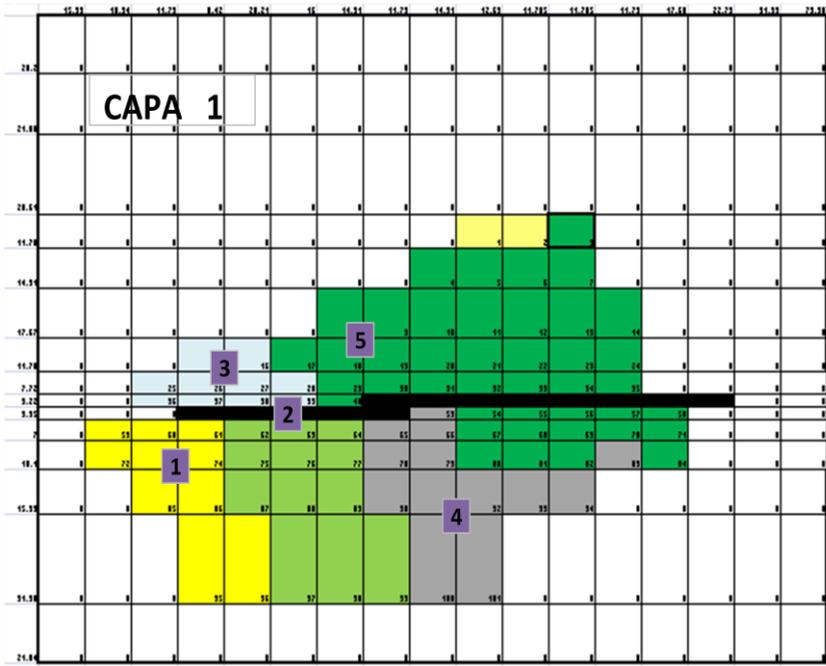
Adicionalmente, han sido ubicadas físicamente las celdas del modelo donde se considera existe la descarga natural, tanto de la parte somera del acuífero, como de la parte profunda (tres celdas en la porción central izquierda de la Figura 5.26).

Respecto al régimen alterado, no se consideran entradas al sistema, puesto que se considera que los retornos de riego (entrada extra de agua al sistema) tienen una circulación local en la parte somera del acuífero modelado, integrándose rápidamente a los escurrimientos superficiales ya cuantificados. Por su parte, como salidas del sistema se considera una evolución histórica de los bombeos y extracciones que se han presentado en el sistema de explotación, los cuales se han cuantificado mes a mes (cuando existen datos medidos) y se han supuesto incrementos lineales de las mismas para los periodos iniciales.

5.2.2.6. Zonas de interés para la calibración de niveles piezométricos

El modelo de acuífero utilizado en el proceso de calibración se considera como un primer esquema de tipo interpretativo, que tiene como objetivo analizar de manera generalizada y conjunta el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca del Duero. Dada su gran extensión, el modelo de flujo subterráneo reproduce de manera aproximada las condiciones de contorno no nulas, presentes en distintas celdas del acuífero, mediante la evaluación de las relaciones río-acuífero que se presentan a lo largo de las simulaciones evaluadas en tramos de río. Tras adoptar criterios de convergencia relajados, se ha establecido una piezometría congruente con los niveles observados para la mayoría de los sectores del modelo, diferenciando resultados para la capa somera y profunda respectivamente del modelo de acuífero simulado.

En las Figuras 5.27a y 5-27b se muestra la ubicación espacial de las zonas de interés usadas en la calibración en Capa 1 y 2 del modelo de acuífero. Dicha piezometría se considera congruente con el modelo de acuífero usado para reproducir el funcionamiento conjunto de la cuenca, teniendo un gradiente en el acuífero desde las zonas más altas y alejadas hacia la parte central y occidente.



Figuras 5.27a y 5.27b. Ubicación de zonas de interés de las Capas 1 (somera) y 2 (profunda), del modelo de acuífero para la obtención de niveles piezométricos promedio

En la Tabla 5.10 se presentan los 16 conjuntos de piezómetros utilizados en el proceso de validación y calibración del modelo de acuífero usado, divididas como: (i) Zona central, (ii) Zona extrema suroeste y (iii) Zona extrema noreste.

Las zonas de interés (asociadas a conjuntos de piezómetros) representan el nivel medio de varias celdas de una misma masa subterránea, los cuales son comparados con un piezómetro de referencia en la zona o con el conjunto de varios piezómetros, esto debido a que los valores piezométricos observados se corresponden unas veces con valores de la capa somera del acuífero y otras veces con valores del de la capa profunda.

Tabla 5.10. Conjuntos de zonas del acuífero usadas en la obtención del nivel piezométrico medio y variación del almacenamiento en las MAS asociadas

C	Zona	Nombre	C	Piezómetros Involucrados
Zona central en las capas I y II del acuífero				
1	101	Medina del Campo	I	Capa I. 161940001-161660003-151940003
2	102	Cauce del Río	I	161560002-161570001
3	103	Tordesillas	I	141580001-151560002-141530002-02.06.104
4	104	Los Arenales	I	S-197 – 161840001
5	105	Terciario bajo los Páramos	I	Capa I. 231650001-161460001-02.13.011
6	206	Medina del Campo	II	Capa II. 151730002-161830002-02.17.073
7	207	Tierra de Campos	II	150970001-150970002-150970003
8	208	Carrión	II	160950001-02.06.106
9	209	Terciario bajo los Páramos	II	Capa II. 171460017-02.06.107-02.08.027-02.08.024
Zonas extremas suroeste				
10	210	Salamanca	II	02.19.030 - 02.19.031 - 02.19.032
11	211	Medina del Campo	II	2.21.001 - 2.21.005
12	212	Sepúlveda	II	02.18.022 - 02.18.031 (23)
Zonas extremas noreste				
13	213	Tierra de Campos	II	151060001 - 02.06.100 - 151170002 - 161310001
14	214	Valdivia	II	
15	215	Aranda del Duero	II	
16	216	Cuenca de Almazán	II	

5.2.3. Calibración por simulación del acuífero bajo condiciones de régimen influenciado por bombeos

5.2.3.1. Tipos de resultados obtenidos en la calibración

Los tipos de resultados que se presentan en este apartado son referentes a: (i) los niveles piezométricos simulados (valor medio anual); (ii) los caudales de descarga para celdas con conexión constante y con río (valores medios anuales); (iii) la variación volumétrica en las masas subterráneas (valor medio mensual) y (iv) la variación media de los parámetros hidrogeológicos utilizados respecto de los valores iniciales supuestos.

Partiendo de la situación de parámetros hidrogeológicos iniciales en el modelo de acuífero igual a los registrados en la Tabla 5.9, pero para el caso del régimen influenciado, donde se toma en cuenta la influencia de los bombeos y extracciones, se han comparado distintos casos de simulaciones.

La Tabla 5.11 presenta los valores inicial, final y medio del nivel piezométrico observado en los piezómetros usados para la calibración del modelo de acuífero, así como el descenso medio anual registrado en cada zona.

Tabla 5.11. Niveles piezométricos observados en las zonas de referencia (msnm) y media de descenso anual

Piezómetro	Período de registro	Nivel inicial	Nivel final	Valor medio	Descenso anual medio (m/año)
1	1970-2001	725.7	719.6	721	0.20
2	1972-2001	694.7	676.7	683	0.62
3	1996-2009	688.0	683.8	685	0.32
4	1971-2005	837.8	834.3	836	0.10
5	1999-2009	880.4	878.3	878	0.21
6	1971-2001	839.1	807.5	819	1.05
10	1985-2009	875.0	872.4	873	0.11
11	1990-2007	896.9	894.3	894	0.15
12	2001-2009	931.6	921.0	926	1.33
13	2001-2009	883.7	883.3	883	0.05
14	1978-2009	1092.7	1076.5	1086	0.52
15	1972-2001	968.4	960.5	965	0.27
16	1972-2009	988.0	980.0	982	0.22

Como resultados por cada zona de calibración se muestran los correspondientes a cuatro situaciones o hipótesis de simulación distintas:

- i. Simulación 1. Bajo el supuesto de un estado inicial de parámetros hidrogeológicos del modelo de acuífero provenientes de rangos medios de valores de literatura, correspondientes a los tipos de materiales permeables y geología de las masas subterráneas.
- ii. Simulación 2. Calibración manual de parámetros hidrogeológicos (dentro de los rangos medios de literatura), por ajuste volumétrico. En esta simulación se ajusta el caudal de salida total del acuífero (media del caudal de descarga anual) igual a la recarga del acuífero.
- iii. Simulación 3. Calibrando automáticamente los parámetros hidrogeológicos del modelo. Esta calibración toma como serie de caudal descarga total a la serie de la Simulación 2 (que se considera ya ha sido ajustada volumétricamente). Esta serie se compara con los múltiples resultados de la simulación de caudal de descarga total provenientes de la evaluación de parámetros aleatorios en el modelo de acuífero, de acuerdo a la aplicación de la Metodología GLUE. En esta simulación se obtienen los mejores conjuntos de parámetros que reproducen el caudal total de descarga observado. A diferencia de la Simulación 2, esta

nueva simulación aporta variabilidad en los parámetros hidrogeológicos de las masas subterráneas del acuífero modelado, con el propósito de introducir también variabilidad en el comportamiento mensual y anual de los niveles piezométricos de las zonas de comparación.

- iv. Simulación 3c. Es similar a la Simulación 3, pero con la particularidad de que esta simulación genera los mejores conjuntos de parámetros que permiten reproducir simultáneamente el caudal de descarga total y los niveles piezométricos de las zonas de interés, de forma muy similar respecto de los valores observados.

5.2.3.2. Resultados sobre niveles piezométricos

Los grupos de Figuras 5.28 y 5.29 representan la comparativa de niveles piezométricos simulados y el valor observado (supuesto inicial) para los conjuntos de zonas de la Tabla 5.10¹, repartidos entre las capas 1 y 2 respectivamente para el modelo de acuífero. Dichas figuras están identificadas con el código del piezómetro de referencia con el que se compara el valor simulado. A continuación se muestran los gráficos de niveles piezométricos simulados:

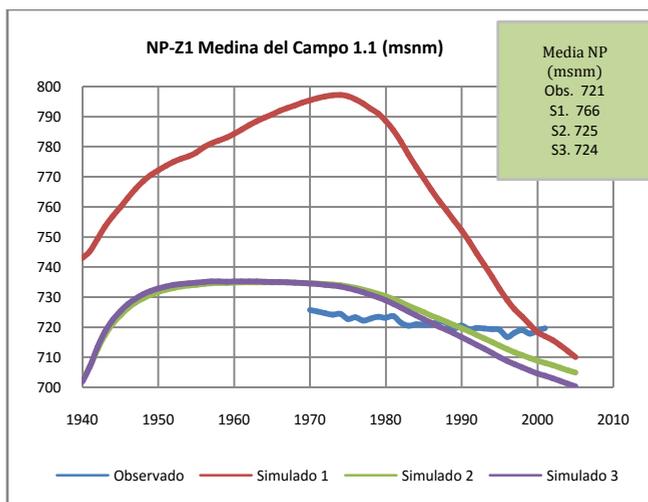
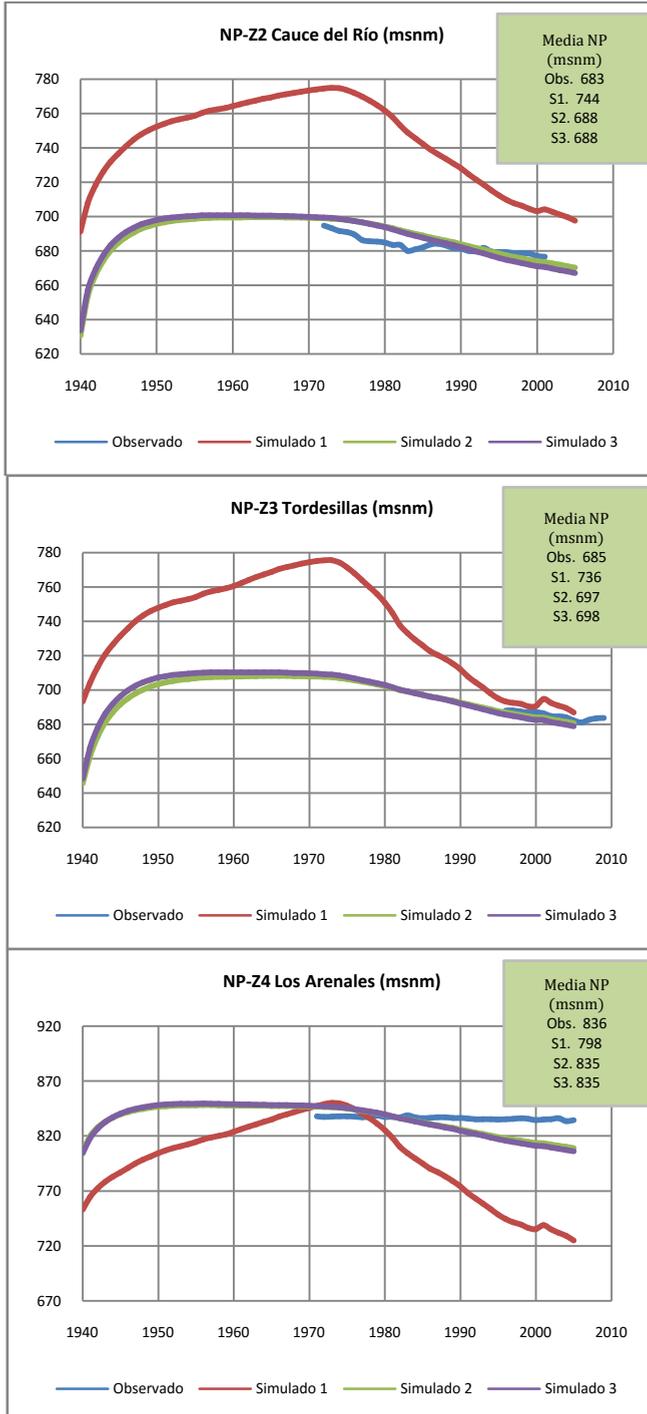


Figura 5.28. (1). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

¹ Los conjuntos 7, 8 y 9 de la Tabla 5.16 fueron excluidos de la comparativa, dado que las series observadas eran de unos pocos años, siempre correspondiendo a fechas recientes, siendo que en su defecto, son requeridas observaciones históricas de los años 70's - 80's, previo al inicio de las explotaciones intensivas de la zona.



Figuras 5.28. (2-4). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

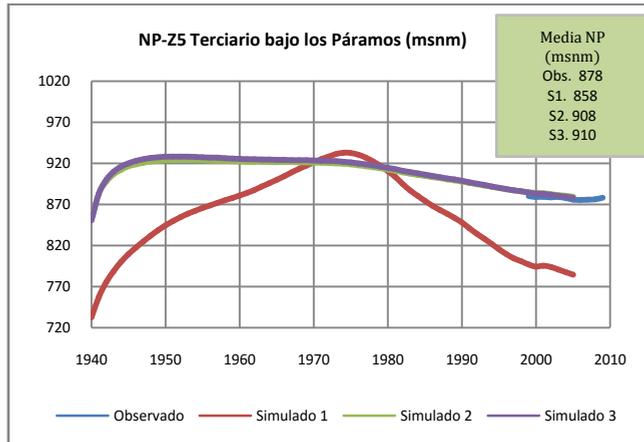
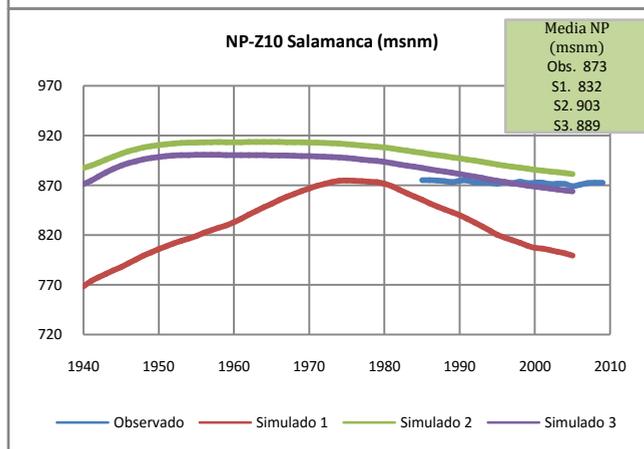
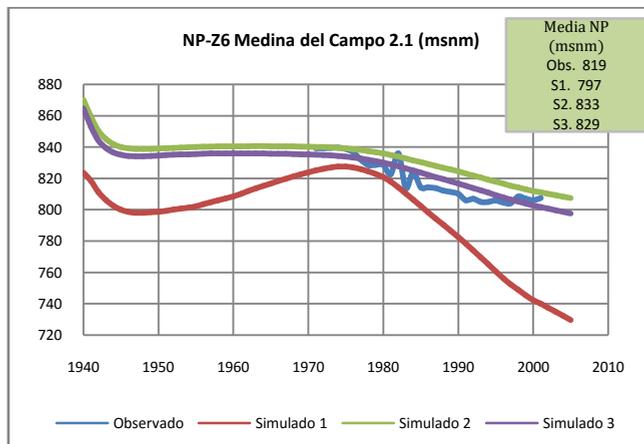
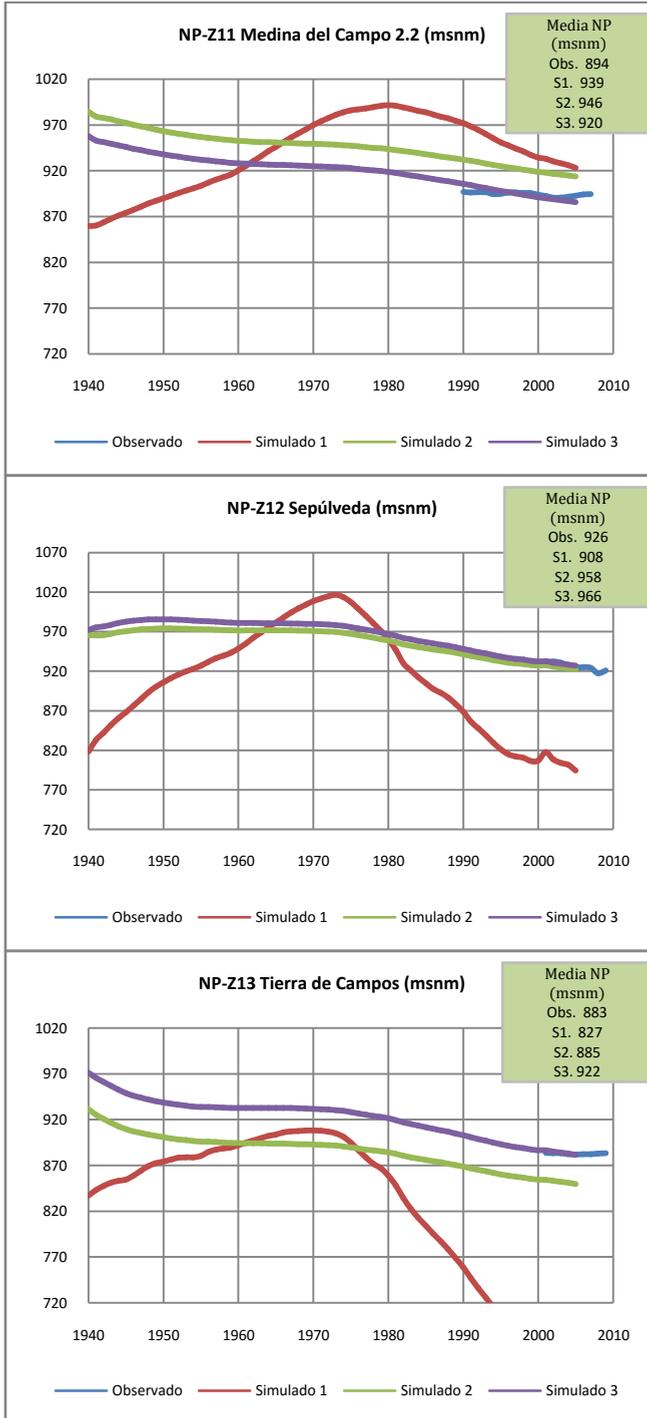


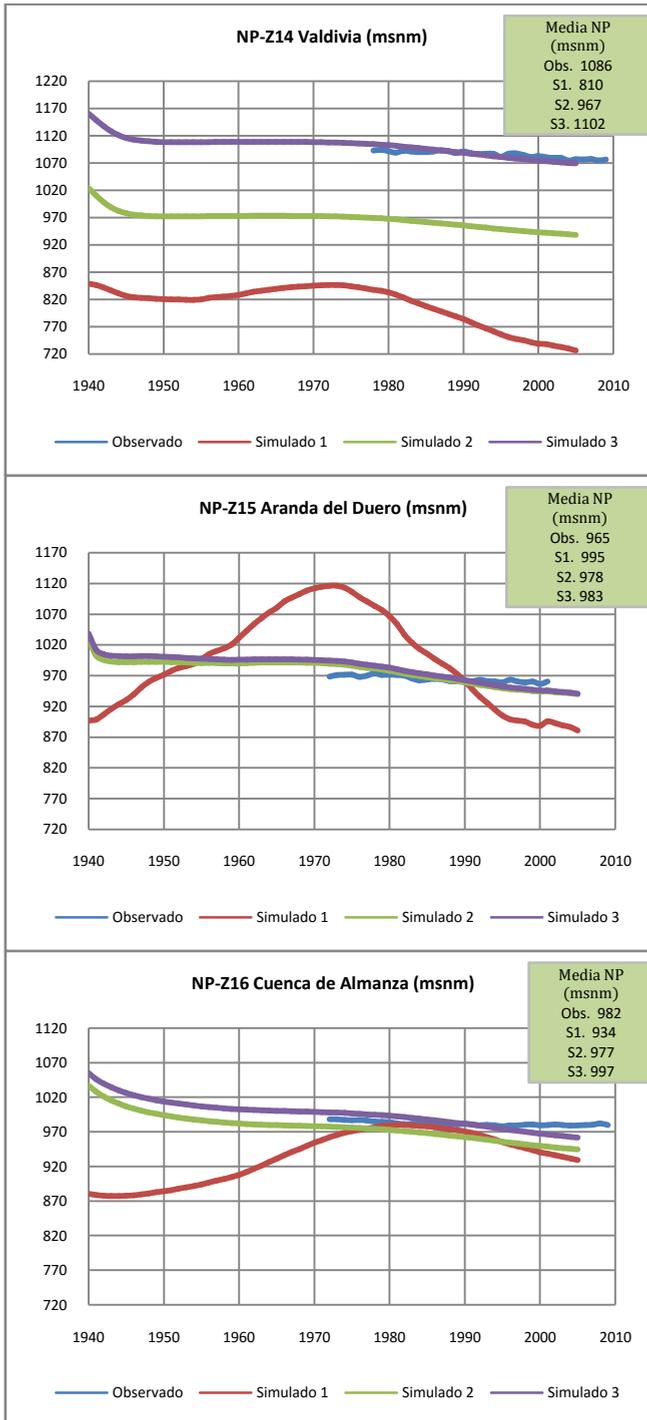
Figura 5.28.(5). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado)



Figuras 5.29. (6-10). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

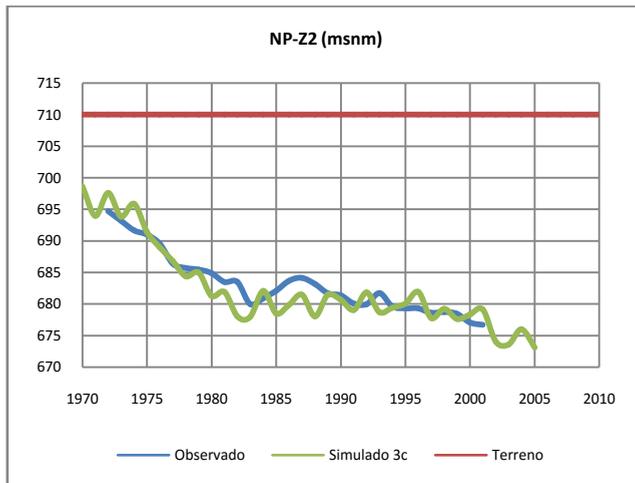
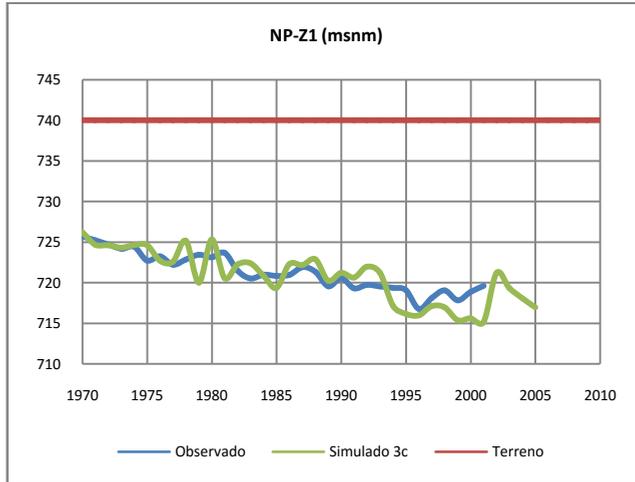


Figuras 5.29. (11-13). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

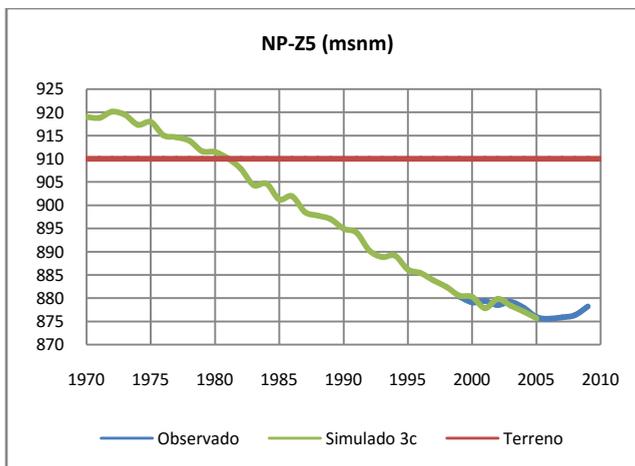
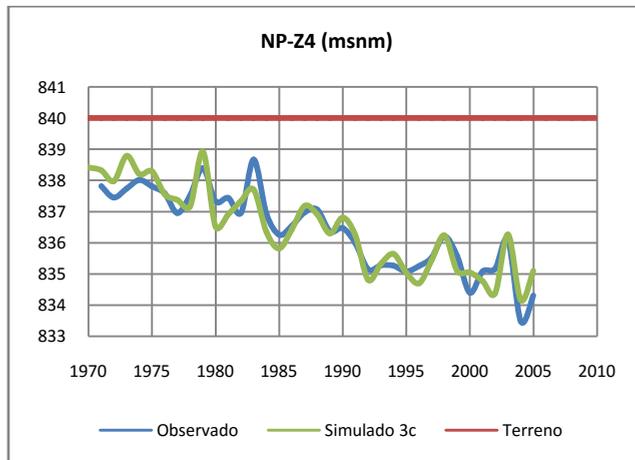
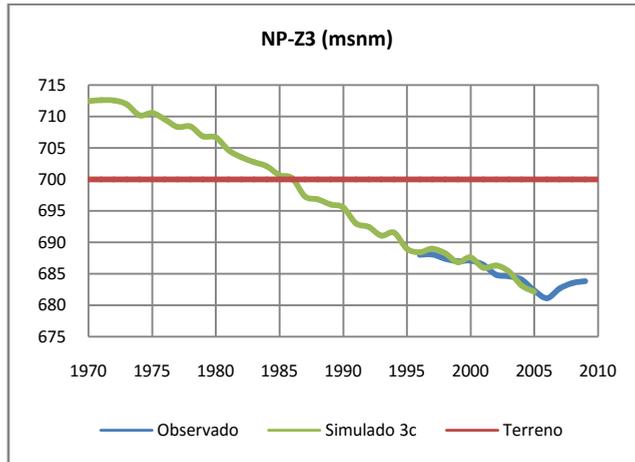


Figuras 5.29. (14-16). Niveles piezométricos simulados y observados de la Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

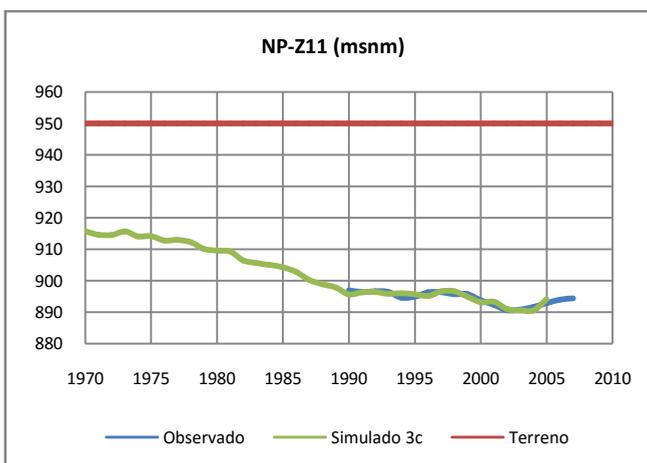
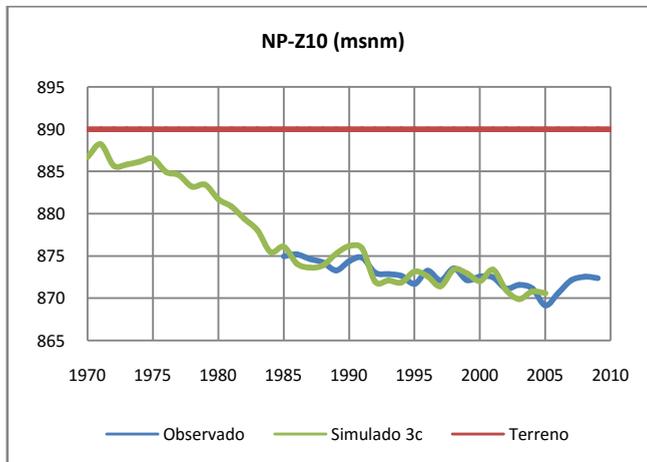
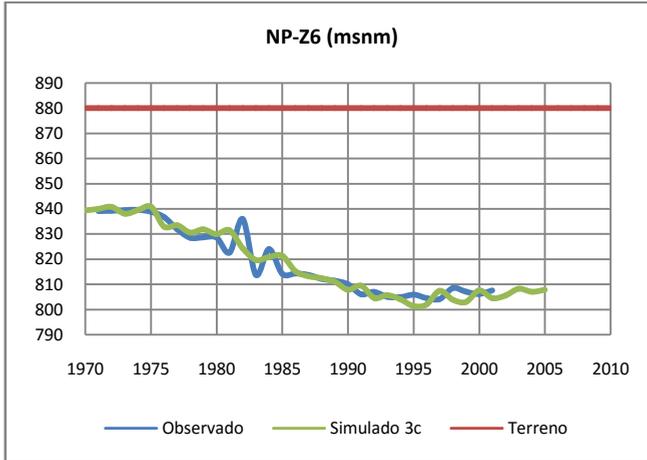
El conjunto de gráficos en las Figuras 5.30 y 5.31 muestran los resultados de niveles piezométricos (para la Capa 1 y 2 respectivamente), obtenidos en la Simulación 3c, junto con los valores observados y el nivel del terreno natural. Estos gráficos representan la calibración visual del modelo de acuífero utilizado, teniendo como período de calibración de 1970 a 2009, dado que los años iniciales se consideran como periodo de calentamiento y ajuste del modelo.



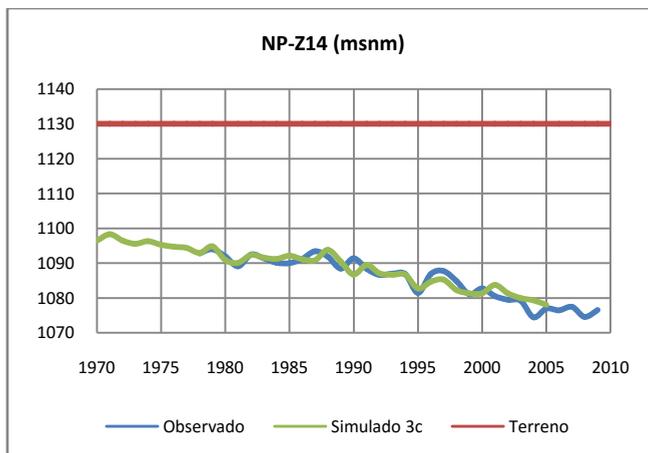
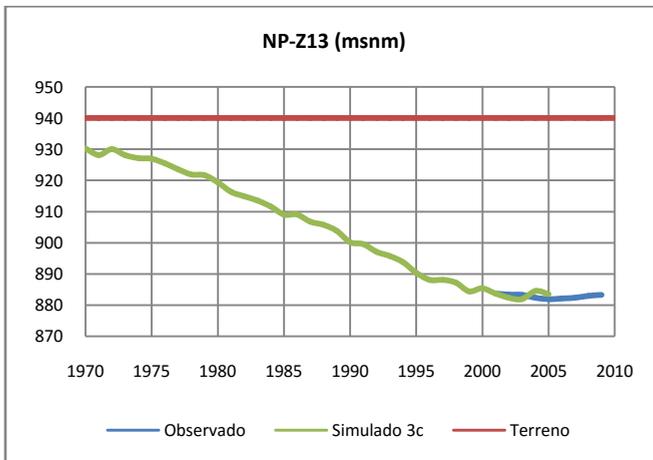
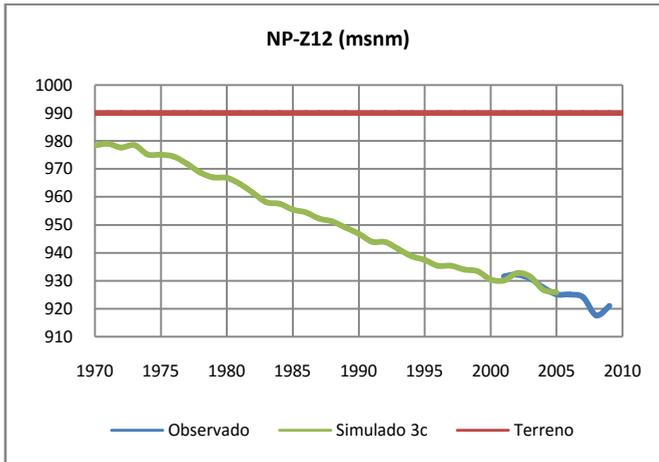
Figuras 5.30. (1-2). Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).



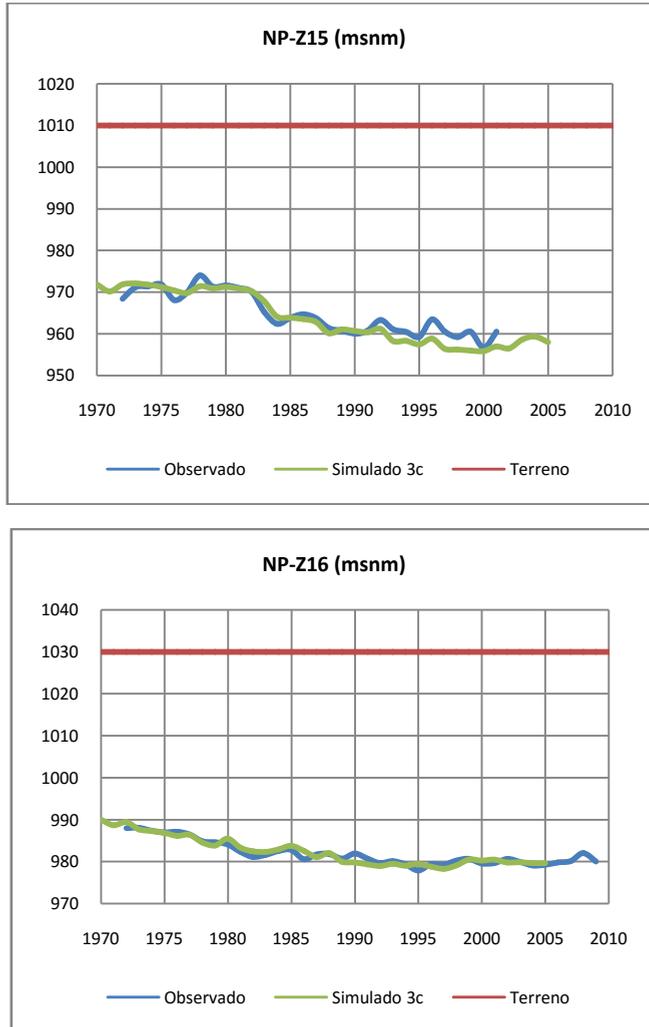
Figuras 5.30. (3-5). Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 1 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).



Figuras 5.31. (6-11). Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).



Figuras 5.31. (12-11). Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto en régimen influenciado).

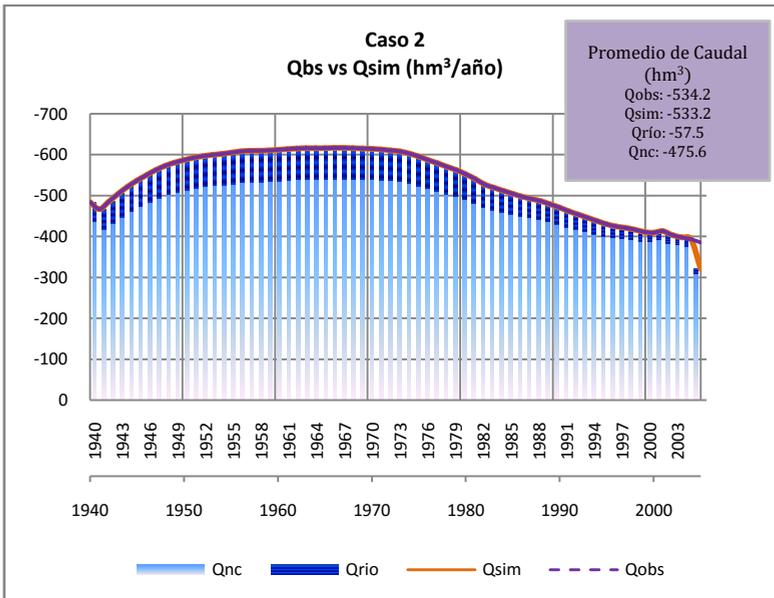
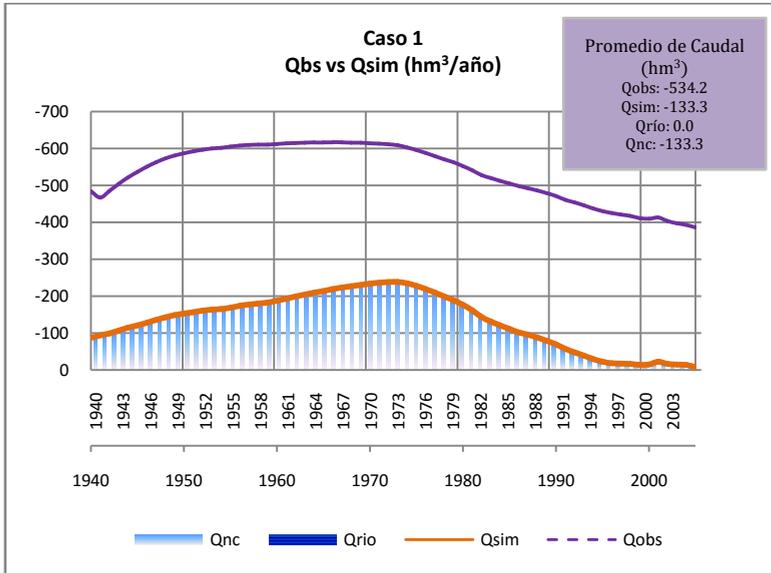


Figuras 5.31. (15-16). Calibración visual de niveles piezométricos en Capa 2 del modelo de acuífero del Duero (conjunto 6-16 en régimen influenciado).

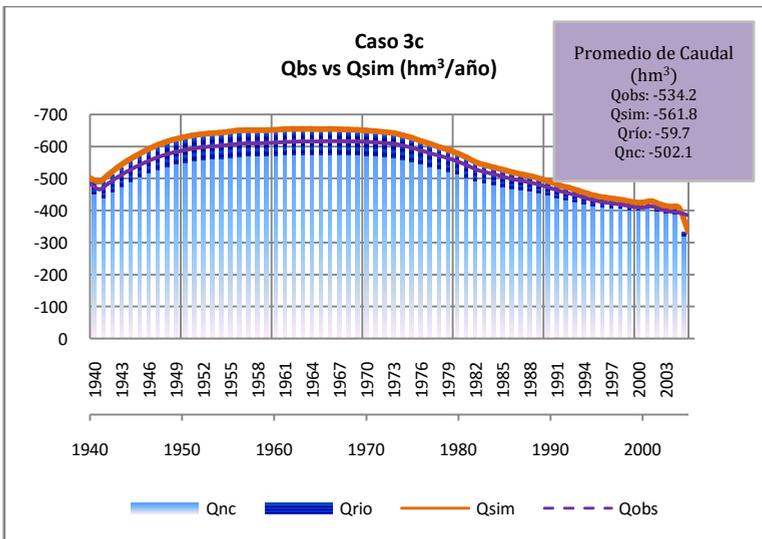
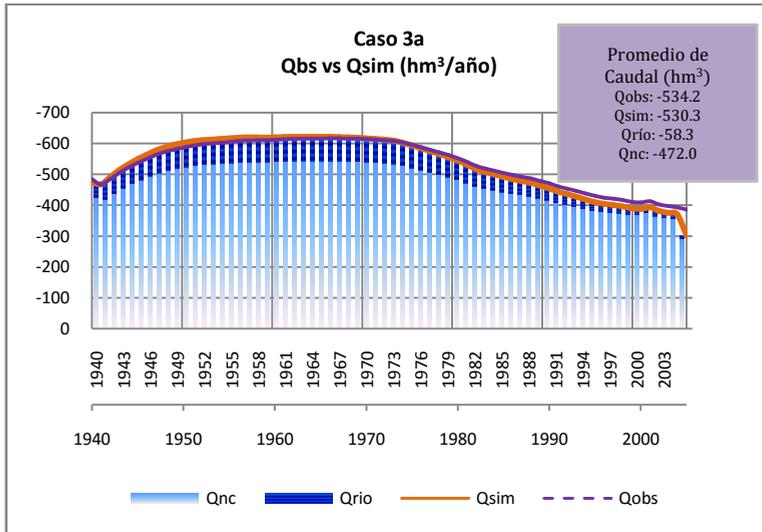
5.2.3.3. Resultados sobre caudales de descarga

Respecto a los caudales de descarga por celdas de nivel constante y de conexión a río, los resultados son los que se muestran en los gráficos de la Figura 5.32a,b,c,d, correspondientes a las respectivas situaciones o hipótesis de simulación. En los gráficos se muestra la media del caudal simulado y caudal observado, que sirven de comparación en la calibración volumétrica, teniendo valores negativos, indicativo de que es un caudal que sale del sistema acuífero.

En el Caso 1, se presentan resultados con simulación nula de descarga por conexión con río ($Q_{\text{río}}$) y un caudal de descarga por celdas de nivel constante (Q_{nc}) inferior al valor supuesto como caudal observado (Q_{obs}).



Figuras 5.32a y 5.32b. Caudales de descarga simulados y observados para las distintas hipótesis de simulación del modelo de acuífero.



Figuras 5.32c y 5.32d. Caudales de descarga simulados y observados para las distintas hipótesis de simulación del modelo de acuífero.

La serie de Q_{obs} se toma como el proveniente de una simulación calibrada previa y su calibración se realiza al igualar el volumen de descarga del modelo (sin considerar conexión con río), respecto del volumen de infiltración. A su vez, la serie Q_{obs} se ha ajustado a los datos observados de diferencia de caudal de entrada y salida entre los últimos tramos del río Duero, que se consideran como la zona de salida o descarga natural de la totalidad del sistema acuífero.

Los Casos 2 y 3 mejoran su calibración (en volumen descargado) y reparten el mismo entre el caudal de descarga por los últimos tramos del

río Duero (Q_{nc}) y por la conexión entre celdas del acuífero y tramos específicos de río (Q_{rio}). Finalmente, el Caso 3c es el resultado de caudal de descarga (en sus dos presentaciones: Q_{rio} y Q_{nc}), producto de la calibración de parámetros hidrogeológicos, con los cuales se obtiene tanto el ajuste volumétrico del caudal de descarga (Q_{sim}), como de los niveles piezométricos en las zonas de interés.

5.2.3.4. Resultados sobre la variación volumétrica en las masas del acuífero

Un último conjunto de resultados interesantes sobre la calibración del modelo de acuífero, bajo régimen influenciado por bombeo, es verificar la variación volumétrica de las masas subterráneas que componen a dicho acuífero.

Distintos resultados derivan del análisis de este apartado, entre los que se encuentran:

- i. La variación volumétrica inter-anual.
- ii. Un valor estimado de la reducción (en tanto por cien) del almacenamiento en las masas del acuífero.
- iii. Las pérdidas de volumen de agua asociadas a distintos valores de descenso en las masas del acuífero.
- iv. El valor relativo del volumen almacenado en las masas.

Los resultados de este apartado se presentan a manera de gráficos y tablas. Primero, la Tabla 5.12 resume las propiedades físicas de las masas subterráneas, útiles para determinar la capacidad de almacenamiento inicial.

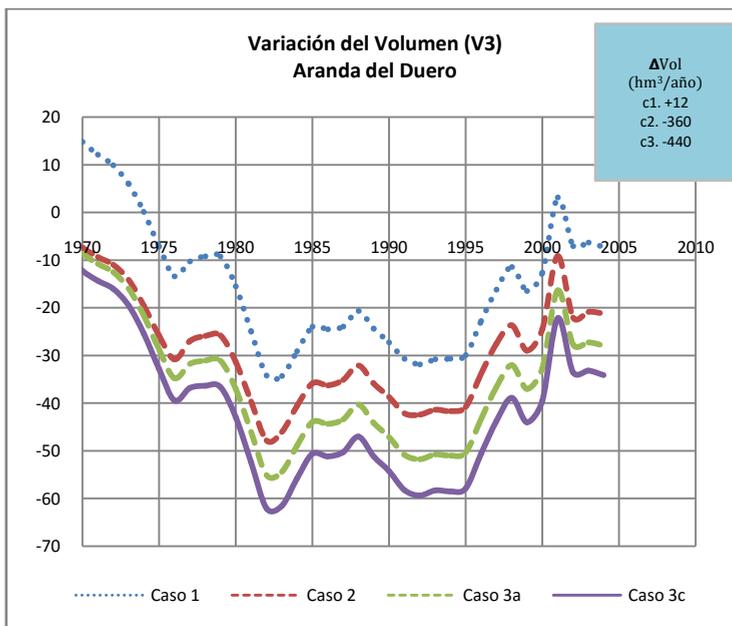
Tabla 5.12. Nombres y propiedades de las masas subterráneas del acuífero del Duero

ID	Nombre Masa Subterránea	Área (m ²)	Esp. Med. (m)	Vol del Recip. (hm ³)	%
V3	ARANDA DE DUERO	2.5E+09	3650	9176387	17.7
V4	AYLLÓN	3.6E+08	100	36345	0.1
V5	BURGOS	1.6E+09	1660	2640209	5.1
V6	CARRIÓN	1.3E+09	1850	2427467	4.7
V6	CUENCA DE ALMAZÁN	2.6E+09	1262	3228903	6.2
V8	LOS ARENALES	5.3E+09	347	1826509	3.5
V9	MEDINA DEL CAMPO	6.9E+09	321	2218858	4.3
V10	PÁRAMO DE ASTUDILLO	5.8E+08	1000	575217	1.1
V11	RIAZA	9.2E+08	898	828210	1.6
V12	SALAMANCA	2.3E+09	97	219896	0.4

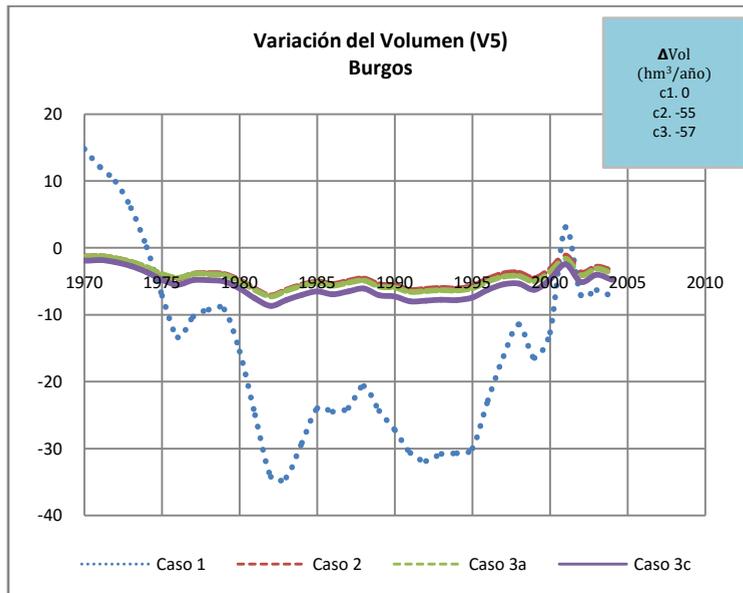
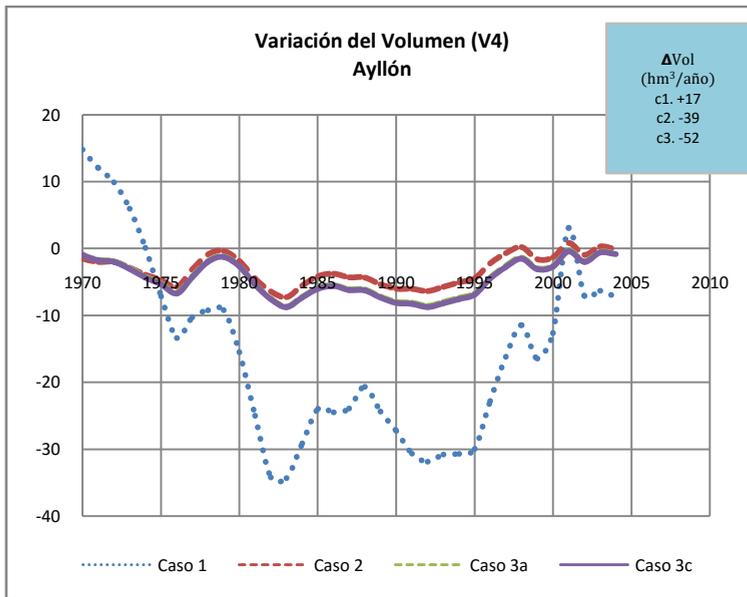
Capítulo 5. Caso de Estudio: La Cuenca del Duero

Tesis Doctoral					
V13	SEPÚLVEDA	5.1E+08	514	263310	0.5
V14	TIERRA DE CAMPOS	3.6E+09	1215	4370458	8.4
V15	TIERRA DEL VINO	3.5E+09	199	703250	1.4
V16	TORDESILLAS	1.9E+09	378	720645	1.4
V17	VALDAVIA	2.6E+09	4235	10867938	21.0
V18	VILLADIEGO	8.5E+08	1813	1546755	3.0
V19	VILLAFÁILA	1.2E+09	231	283589	0.5
V20	TERCIARIO DETRÍTICO BAJO LOS PÁRAMOS	1.2E+10	834	9860584	19.0
Suma Volumen:		5.0E+10	1145	51,794,530	100

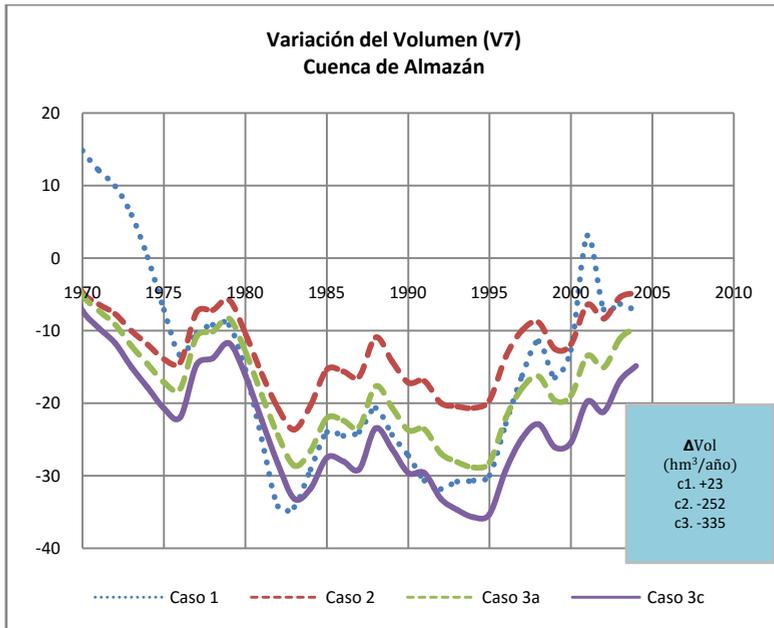
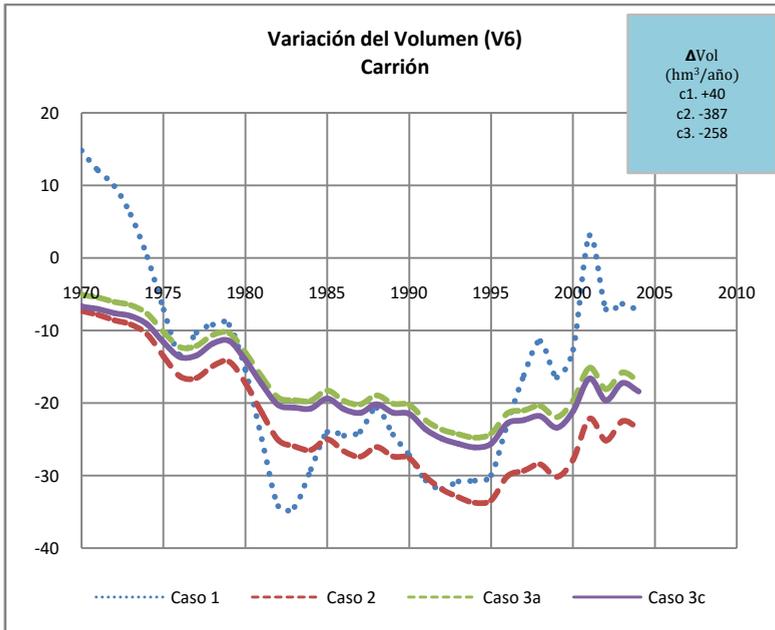
A continuación, se presenta la variación volumétrica inter-anual de cada masa subterránea, de acuerdo al conjunto de Figuras 5.33. En los gráficos se muestra también la media de variación volumétrica (ΔVol) para los casos simulados, en $\text{hm}^3/\text{año}$.



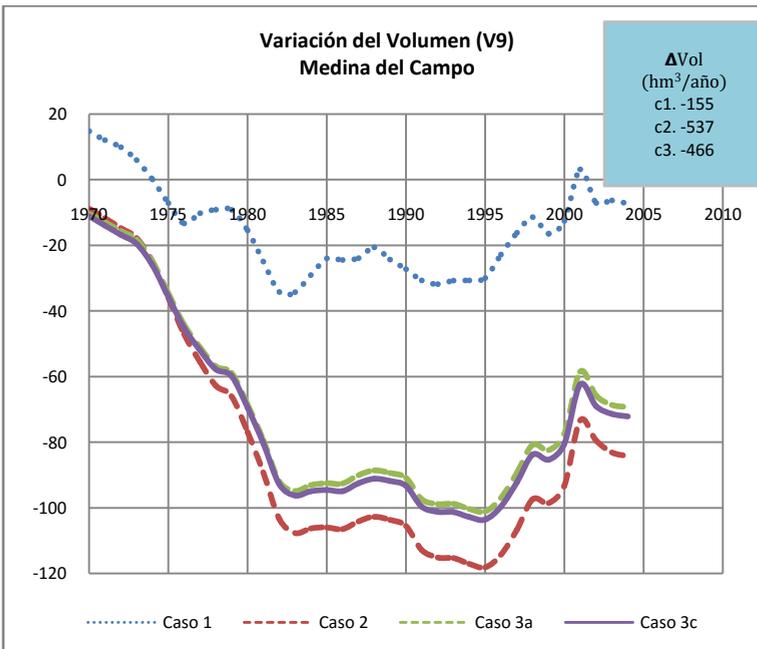
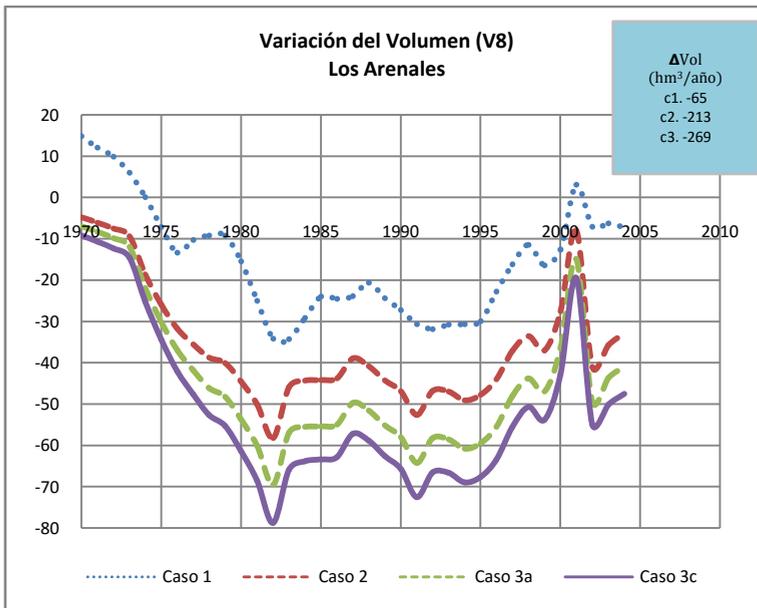
Figuras 5.33 (V3). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



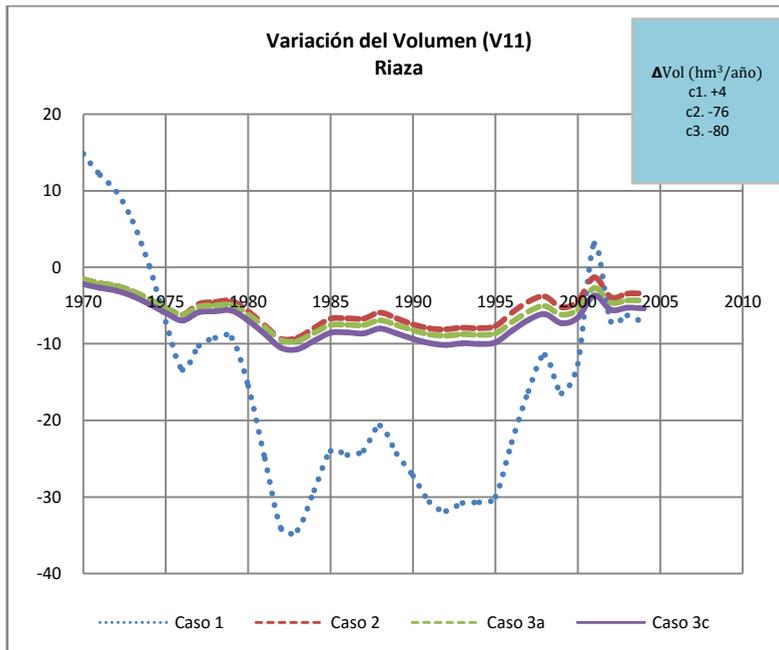
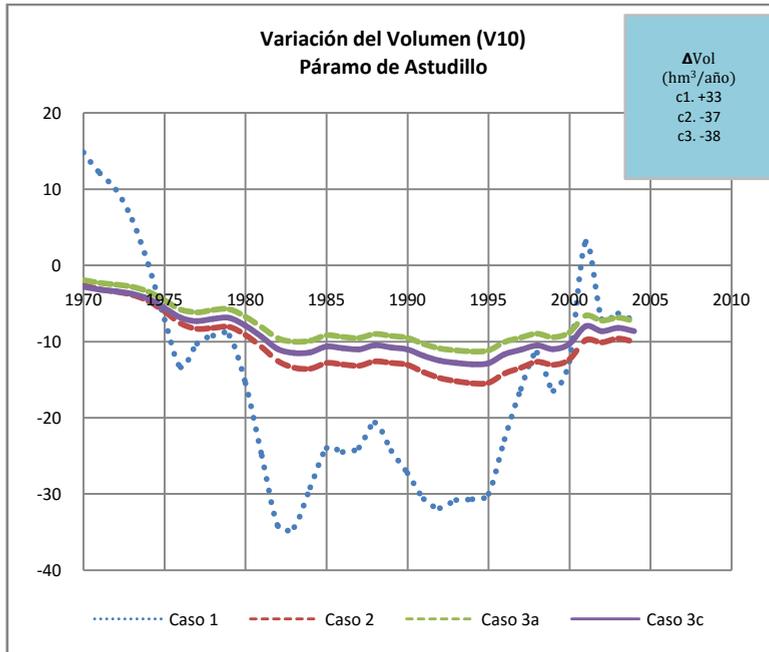
Figuras 5.33 (V4-V5). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



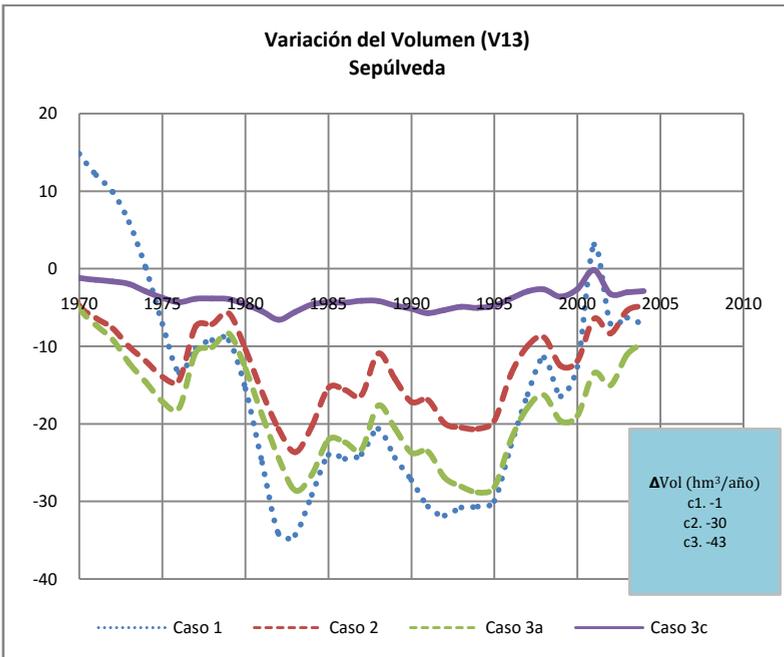
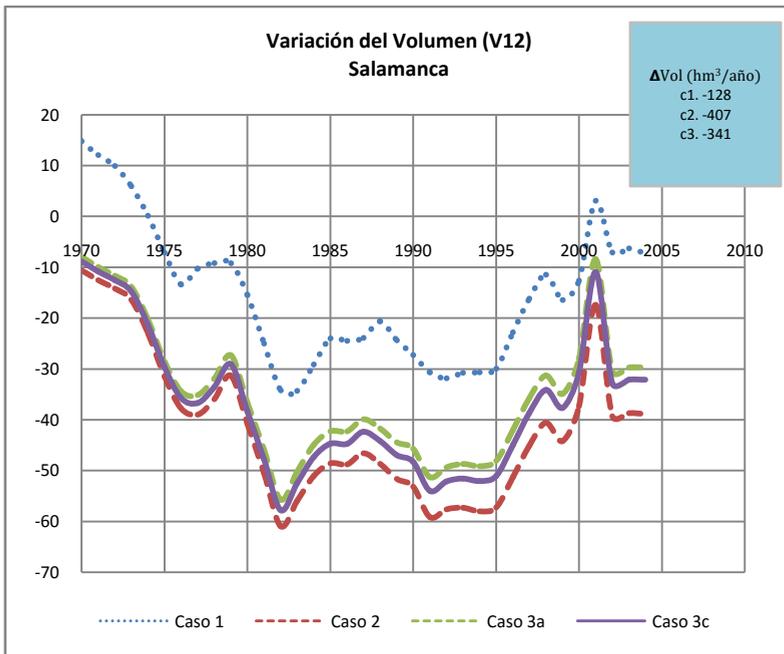
Figuras 5.33 (V6-V7). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



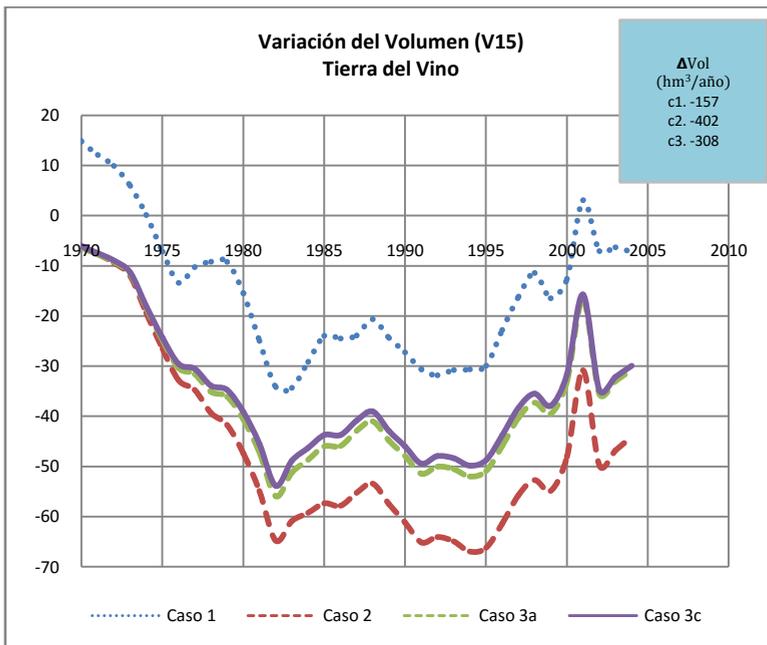
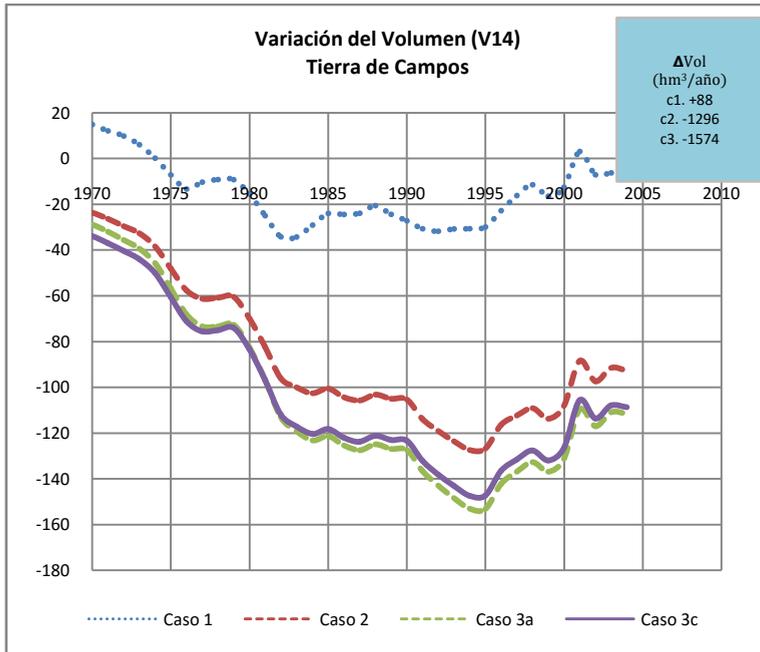
Figuras 5.33 (V8-V9). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



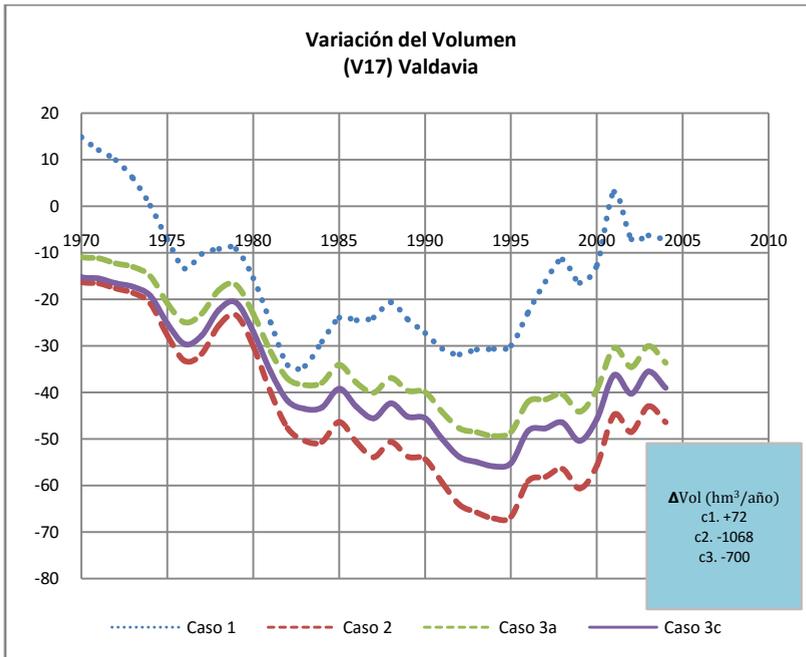
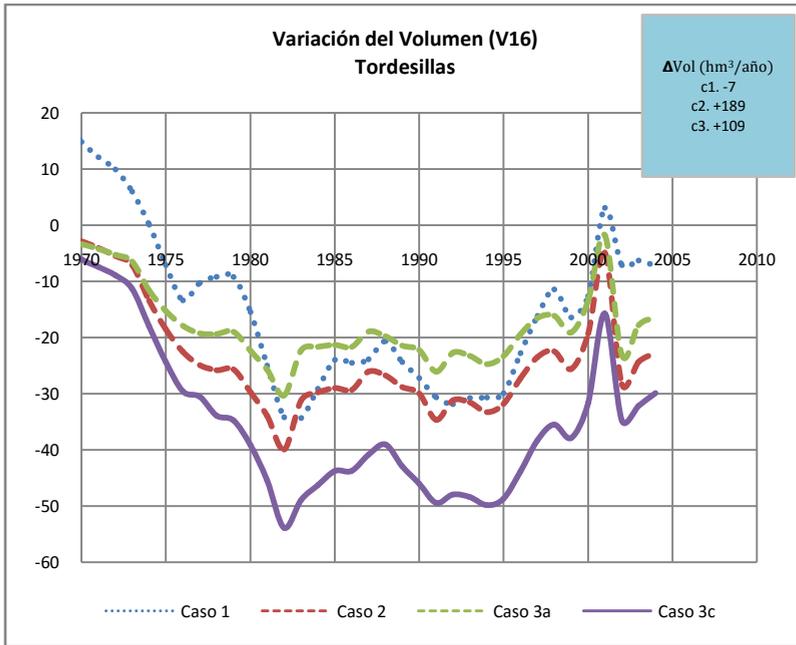
Figuras 5.33 (V10-V11). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



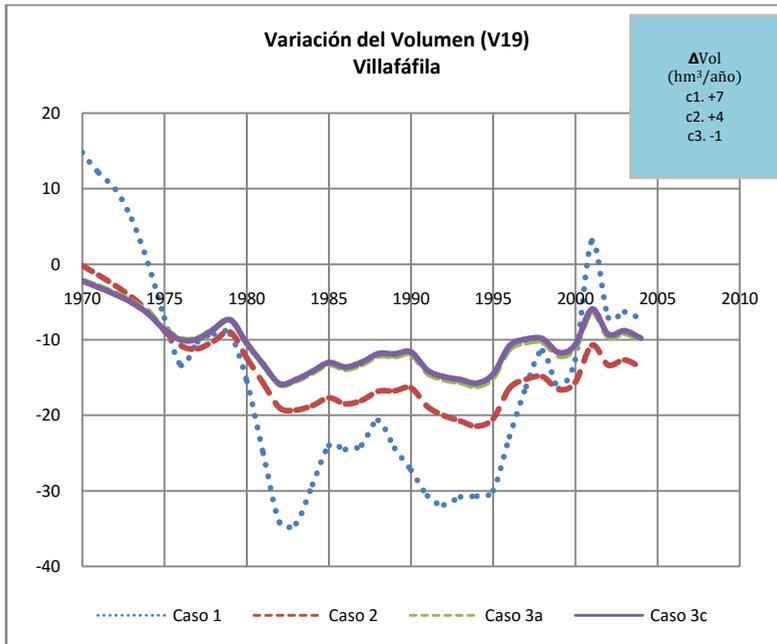
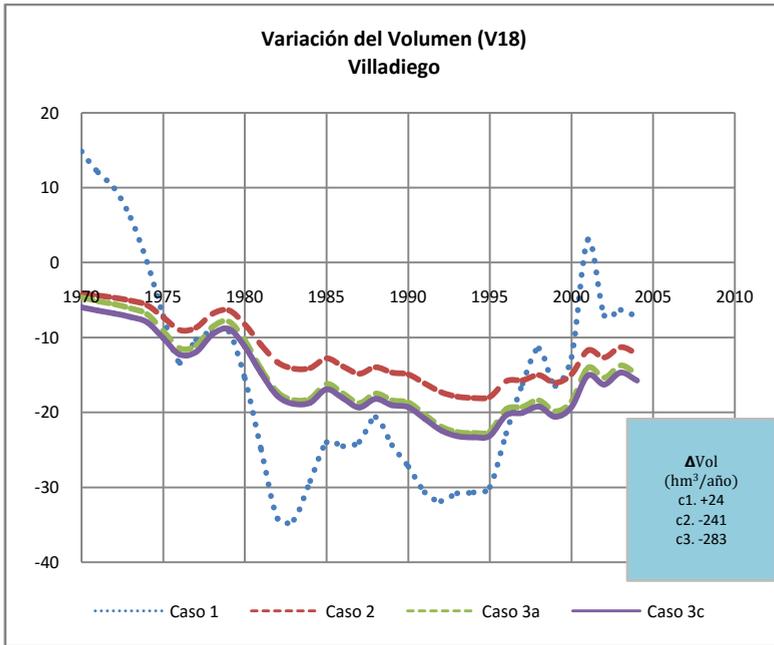
Figuras 5.33 (V12-V13). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



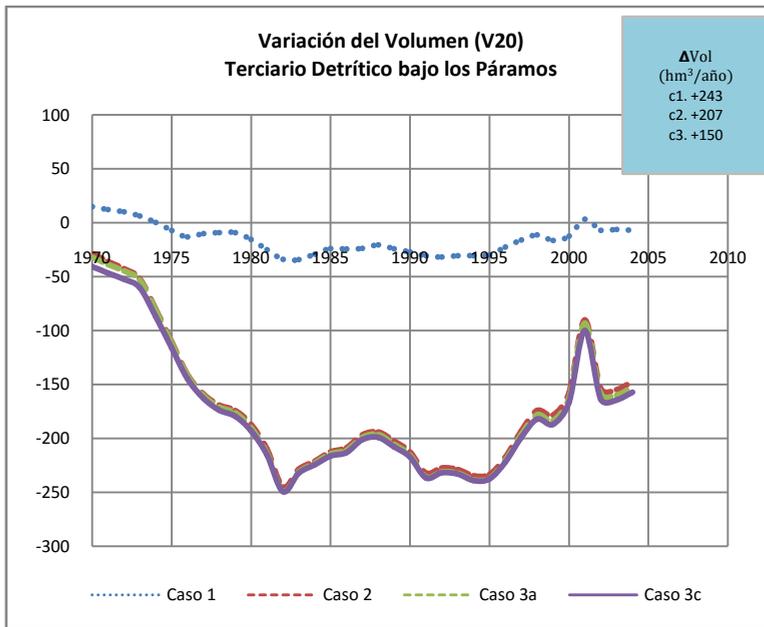
Figuras 5.33 (V14-V15). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



Figuras 5.33 (V16-V17). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



Figuras 5.33 (V8-V9). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.



Figuras 5.33 (V20). Comparación de la variación volumétrica media anual de las masas subterráneas del modelo de acuífero, para los casos simulados.

A continuación, en la Tabla 5.13 se resume el porcentaje de pérdida de volumen almacenado en masas subterráneas del acuífero del Duero, para los periodos 1970-2005 y 1980-2005, siendo mayor la pérdida para el último periodo, que se corresponde con el conocimiento de la zona sobre una explotación más acusada en los últimos años de las masas del acuífero. Los resultados son mostrados también a manera de gráficos en las Figuras 5.34a y 5.34b.

Tabla 5.13. Estimación inicial de la variación (en %) del almacenamiento en las masas del acuífero del Duero

ID Masa	Nombre de Masa	Coef. de Alm. prom	Vol inicial de agua alm (hm ³)	Variación de almacenamiento por periodo (hm ³)		% de pérdida de agua en masas (por periodo)	
				1970-05	1980-05	1970-05	1980-05
V3	Aranda del Duero	0.01236	113460	-2782	-3167	2.5	2.8
V4	Ayllón	0.00504	1830	-300	-335	16.4	18.3
V5	Burgos	0.00279	7359	-373	-422	5.1	5.7
V6	Carrión	0.01314	31904	-1185	-1386	3.7	4.3
V7	Cuenca de Almazán	0.00637	20555	-1517	-1734	7.4	8.4
V8	Los Arenales	0.00858	15676	-3383	-3912	21.6	25.0

Capítulo 5. Caso de Estudio: La Cuenca del Duero

Tesis Doctoral							
V9	Medina del Campo	0.01077	23899	-4813	-5806	20.1	24.3
V10	Páramo de Astudillo	0.01439	8280	-600	-701	7.3	8.5
V11	Riaza	0.00545	4514	-469	-531	10.4	11.8
V12	Salamanca	0.01301	8584	-2455	-2808	28.6	32.7
V13	Sepúlveda	0.00514	1354	-252	-275	18.6	20.3
V14	Tierra de Campos	0.02808	122712	-6836	-8039	5.6	6.6
V15	Tierra del Vino	0.01198	8426	-2334	-2712	27.7	32.2
V16	Tordesillas	0.01375	9910	-1305	-1465	13.2	14.8
V17	Valdavia	0.01421	154461	-2497	-2926	1.6	1.9
V18	Villadiego	0.01735	26837	-1045	-1226	3.9	4.6
V19	Villafáfila	0.01201	3405	-699	-802	20.5	23.6
V20	Terciario detrítico bajo los Páramos	0.01232	121465	-11587	-13341	9.5	11.0
Total:						Pérdida Relativa	
			677,262	-44,435	-51,588	14.5 %	19.3%

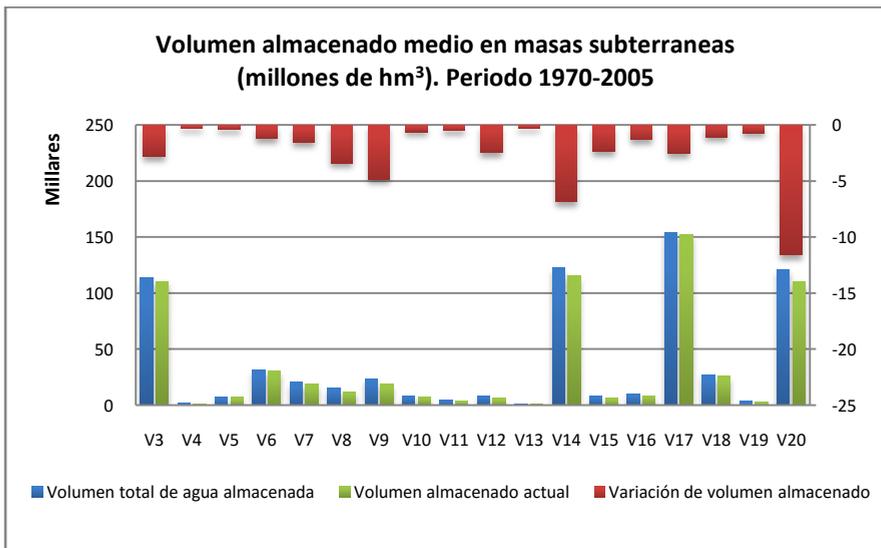


Figura 5.34a. Comparativa de la variación del volumen almacenado medio en masas del acuífero para los periodos 1970-2005 y 1980-2005.

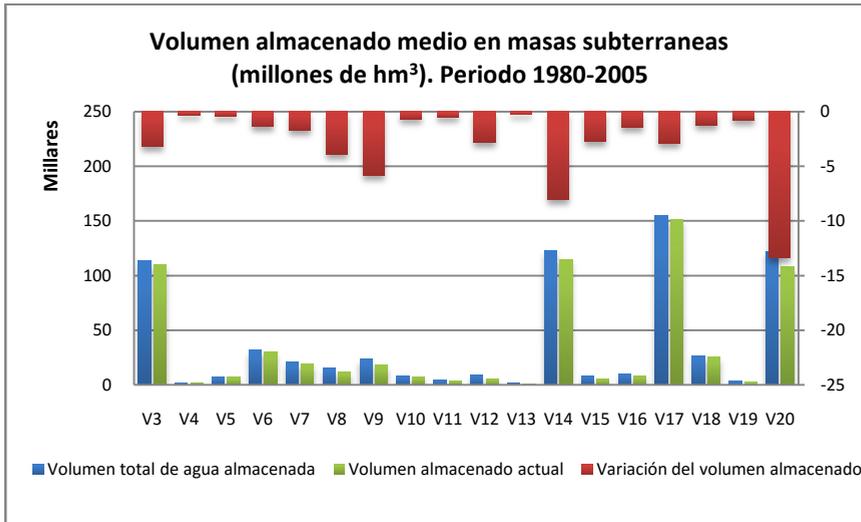


Figura 5.34b. Comparativa de la variación del volumen almacenado medio en masas del acuífero para los períodos 1970-2005 y 1980-2005.

Como resultado del volumen almacenado en masas del acuífero se puede observar que (en promedio) existe una reducción entre el 14.5% y 19.3% del volumen almacenado total, según sea el periodo temporal de análisis. Estas reducción en el volumen almacenado ha sido más o menos acusada en las distintas masas, de acuerdo a lo que se registra en los gráficos de las Figuras 5.34a y 5.34b.

El siguiente resultado, respecto a la pérdida de volumen de agua, asociado a distintos valores de descenso del nivel piezométrico en las masas del acuífero se muestra en la Tabla 5.14. Este resultado es útil para comparar el comportamiento del volumen almacenado en las masas del acuífero, cuando son sometidas a extracciones importantes que reducen su nivel piezométrico, dándonos una idea del volumen extraído en las mismas, asociado a un determinado valor de descenso.

Tabla 5.14. Pérdida de agua para distintos valores de descenso (hm³)

ID	Nombre de Masa	Área masa (m ²)	Pérdida de volumen para un descenso de:			
			0.5m	1.0m	2.0m	5.0m
V3	Aranda del Duero	2.5E+09	16	31	62	155
V4	Ayllón	3.6E+08	1	2	4	9
V5	Burgos	1.6E+09	2	4	9	22
V6	Carrión	1.3E+09	9	17	34	86
V7	Cuenca del Almazán	2.6E+09	8	16	33	81
V8	Los Arenales	5.3E+09	23	45	90	226

Tesis Doctoral

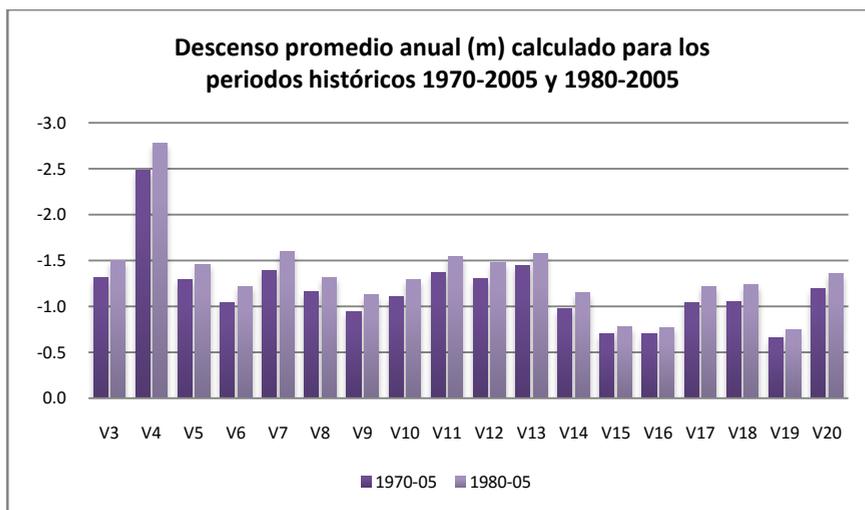
V9	Medina del Campo	6.9E+09	37	75	149	373
V10	Páramo de Astudillo	5.8E+08	4	8	17	41
V11	Riaza	9.2E+08	3	5	10	25
V12	Salamanca	2.3E+09	15	29	59	147
V13	Sepúlveda	5.1E+08	1	3	5	13
V14	Tierra de Campos	3.6E+09	50	101	202	505
V15	Tierra del Vino	3.5E+09	21	42	85	212
V16	Tordesillas	1.9E+09	13	26	53	131
V17	Valdavia	2.6E+09	18	36	73	182
V18	Villadiego	8.5E+08	7	15	30	74
V19	Villafáfila	1.2E+09	7	15	29	74
V20	Terciario detrítico bajo los Páramos	1.2E+10	73	146	291	728
Pérdida de volumen total (hm³):			309	617	1235	3087

A continuación, en la Tabla 5.15 se presenta el valor relativo de volumen almacenado y su cambio, en función de los períodos simulados en las masas de acuífero analizadas. La Figura 5.35 representa el gráfico de de descenso promedio anual (en metros), para dos periodos históricos.

Tabla 5.15. Valor relativo del volumen almacenado y cambio relativo en el almacenamiento (hm³)

ID	Nombre	Año inicio	Año fin	Cambio relativo del almacenamiento (hm ³)		
Masa	Masa	1970	1980	2005	1970-05	1980-05
V3	Aranda De Duero	5893	5593	4388	-1505	-1205
V4	Ayllón	516	482	353	-163	-129
V5	Burgos	789	748	588	-202	-160
V6	Carrión	2999	2891	2359	-640	-532
V7	Cuenca de Almazán	3392	3239	2572	-820	-667
V8	Los Arenales	6899	6542	5063	-1836	-1480
V9	Medina del Campo	10326	9930	7712	-2614	-2218
V10	Páramo de Astudillo	1432	1376	1108	-325	-268
V11	Riaza	988	937	735	-254	-202
V12	Salamanca	3822	3559	2492	-1330	-1068
V13	Sepúlveda	492	459	355	-136	-104
V14	Tierra de Campos	17337	16726	13642	-3695	-3083
V15	Tierra del Vino	4358	4120	3091	-1267	-1029

V16	Tordesillas	2705	2550	1997	-708	-553
V17	Valdavia	6472	6251	5125	-1347	-1126
V18	Villadiego	2670	2578	2106	-564	-472
V19	Villafáfila	1587	1513	1208	-379	-305
V20	Terciario detrítico bajo los Páramos	24984	23767	18705	-6279	-5062
Total (hm³):					-24064	-19663

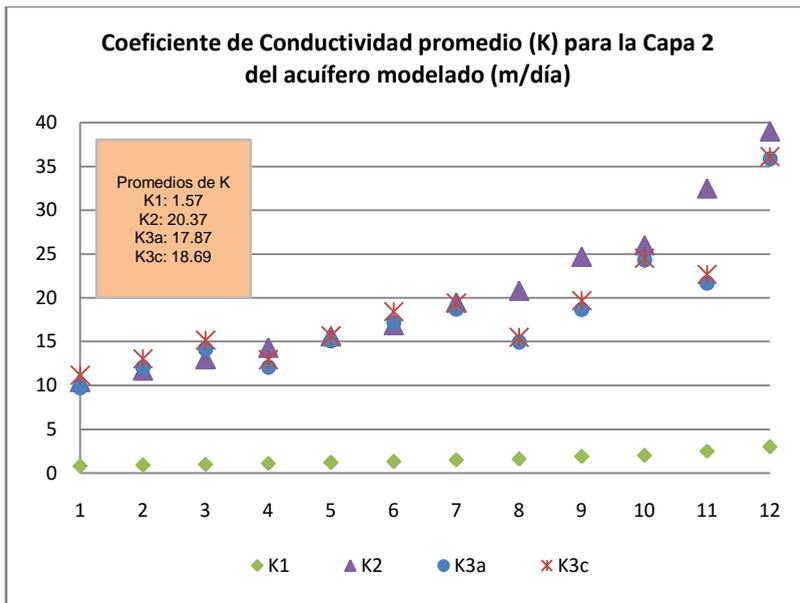
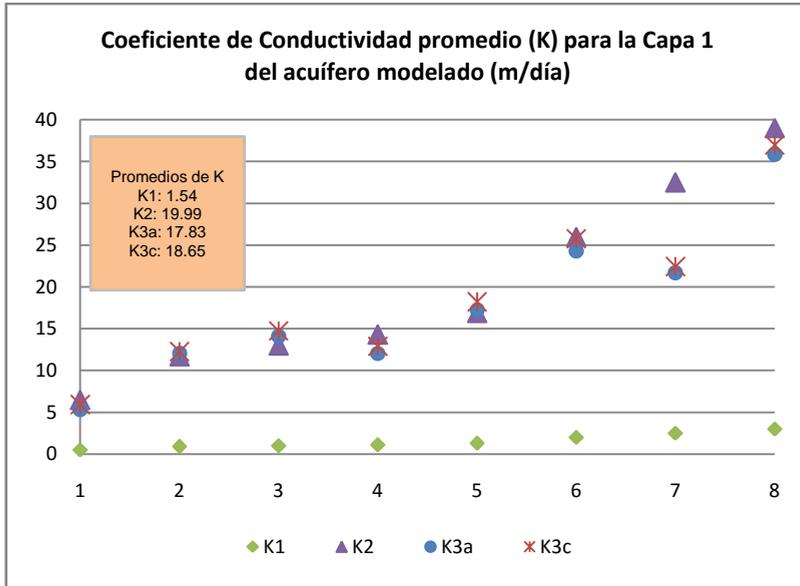


Figuras 5.35. Comparativa del descenso promedio anual en masas del acuífero para los periodos 1970-2005 y 1980-2005.

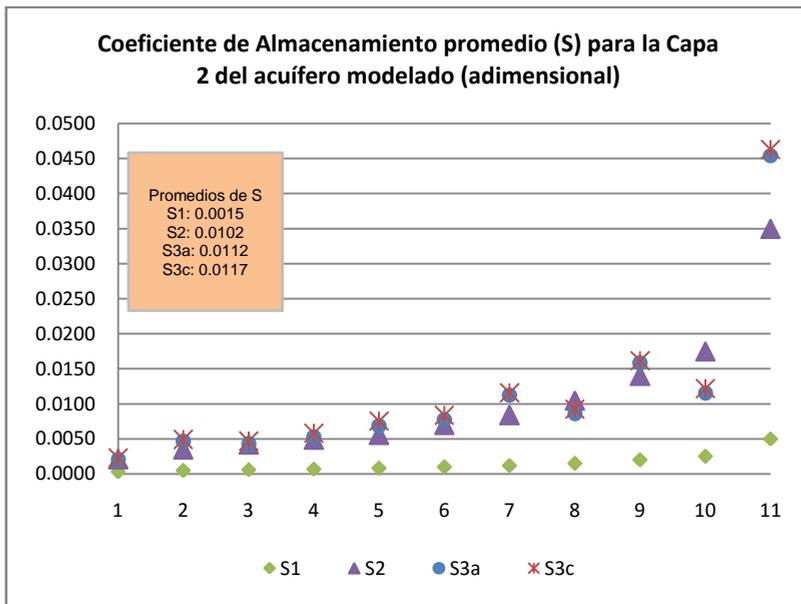
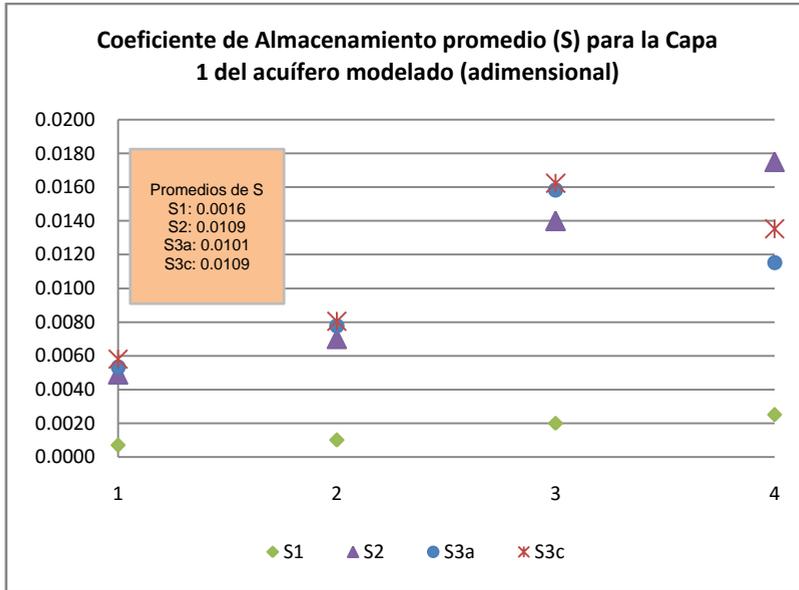
5.2.3.5. Análisis de variación de parámetros hidrogeológicos en las simulaciones realizadas para la calibración del modelo de acuífero

Para conocer la diferencia en parámetros hidrogeológicos introducidos a los distintos casos simulados en el modelo de acuífero, se realizó un resumen y zonificación de los valores promedio de conductividad y almacenamiento.

Los resultados presentados a continuación, referentes a los distintos conjuntos de parámetros hidrogeológicos (coeficientes de conductividad y almacenamiento), para las situaciones de calibración evaluadas, se muestran a manera de gráficos en las Figuras 5.36 y 5.37. A su vez, los valores medios por capa y simulación evaluada se han adjuntado en cada gráfico.



Figuras 5.36a y 5.36b. Comparativa del promedio del Coeficiente de Conductividad en las Capas 1 y 2, para los casos simulados del modelo de acuífero.



Figuras 5.37a y 5.37b. Comparativa del promedio del Coeficiente de Almacenamiento (S) en las Capas 1 y 2, para los casos simulados del modelo de acuífero

5.2.4. Simulación del acuífero calibrado bajo comportamiento a régimen natural

La simulación realizada bajo comportamiento a régimen natural del modelo de acuífero calibrado, implica los siguientes supuestos:

- i. Que el caudal de descarga del acuífero por conexión de celdas de nivel constante será igual al valor de la recarga en régimen natural (infiltración calculada por masa subterránea, proveniente de un modelo lluvia-escorrentía).
- ii. Que existe un caudal de descarga/recarga por conexión de celdas del acuífero en contacto con ríos (condición de conexión río-acuífero), el cual se supone del orden de 10% del total de recarga.
- iii. Que los niveles piezométricos de comparación se desconocen, al no contar registros tan antiguos como se tienen de lluvia y temperatura en la zona y que por tanto, se considerará que los mismos corresponderán a los niveles del período más antiguo con que se cuente.

Los tipos de resultados (Figura 5.38) que se presentan en este apartado son referentes a los caudales de descarga para celdas con conexión constante y con río (valores medios anuales).

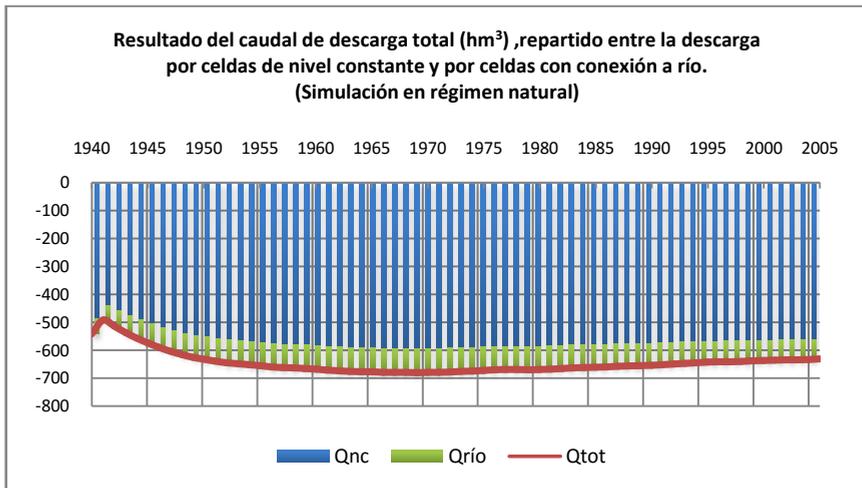


Figura 5.38. Caudales de descarga del modelo de acuífero en régimen natural (caudales por celdas de nivel constante, por conexión con río y total).

Respecto a la media anual del caudal de descarga total (Q_{tot}), éste fue del orden de 645hm^3 , el de descarga por celdas de nivel constante (Q_{nc}) del orden de 567hm^3 y el caudal de descarga por conexión a río ($Q_{\text{río}}$) de 78hm^3 . El caudal de descarga Q_{nc} representa el caudal de salida por los tramos 8 y 9 del río Duero, asociados a las zonas de descarga de nivel constante del modelo de acuífero, previamente analizadas y corroboradas por Jiménez (2011).

5.2.5. Simulación del acuífero en un modelo simplificado en diferencias finitas

5.2.5.1. Propiedades del modelo simplificado

El modelo simplificado elaborado en PMWIN-ModFlow (Figura 5.39) corresponde a un modelo desarrollado para probar y comparar los resultados obtenidos con el módulo AQUIVAL 2.0, en el que se ha verificado el correcto funcionamiento de las adecuaciones realizadas para la evaluación de condiciones de contorno no lineales (dada en la interacción entre masas de agua superficial y subterránea).

Al igual que en el modelo por Autovalores, sobre la Capa 1 se han identificado celdas con conexión a río y celdas de nivel constante, en tonalidades azules. el modelo fue discretizado de la misma forma que el modelo precedente, con dos capas de 15 filas y 17 columnas, de ancho variable y espesor uniforme en cada capa. Las dimensiones máximas del modelo son de 328km por 223km. Las propiedades hidrogeológicas del modelo se asignaron de acuerdo a los valores medios registrados para el Caso 3c de las Figuras 5.36 y 5.37, que fueron usados en el modelo por Autovalores.

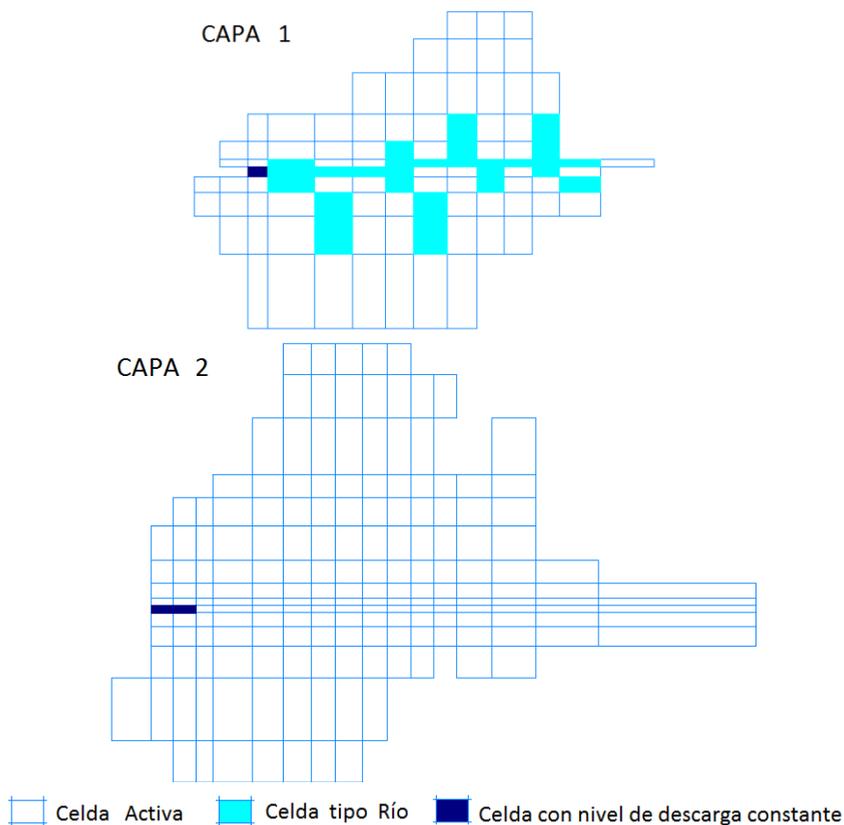


Figura 5.39. Esquemas del modelo en Diferencias Finitas de PM-WIN ModFlow, capas 1 y 2. Fuente: Elaboración propia.

5.2.5.2. *Simulación en régimen natural*

Los resultados de interés producto de la simulación de este modelo en ModFlow son los relativos a la calibración (en volumen) del caudal de descarga en zonas de nivel constante y con conexión a río, para los casos de régimen natural y el régimen influenciado por bombeo, dejando de lado este último dado el trabajo implícito requerido para su calibración.

Para la simulación en régimen estacionario, para las condiciones de funcionamiento natural el resultado de niveles piezométricos en PM-WIN ModFlow es el mostrado en los esquemas de la Figura 5.40, correspondientes a las Capas 1 y 2 respectivamente.

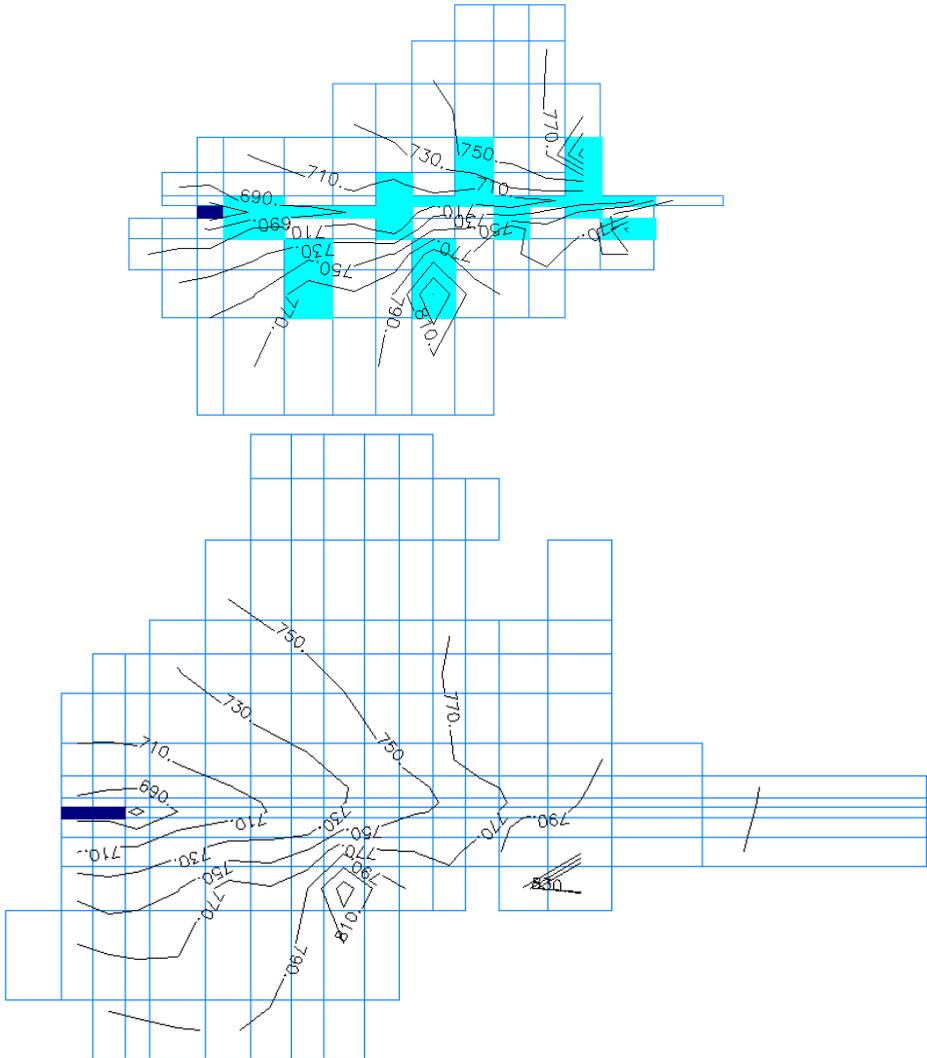


Figura 5.40. Niveles piezométricos en régimen estacionario para las Capas 1 y 2 del modelo PM-WIN ModFlow.

En los esquemas anteriores se observa cómo el flujo de descarga del acuífero es inducido hacia dos zonas principalmente: (i) hacia las celdas que se considera con conexión a río (en color azul claro) y (ii) las celdas con un nivel de descarga constante (en color azul oscuro). Un balance general del dominio del modelo se presenta en la Tabla 5.16, el cual hace referencia a un auto-ajuste del modelo de los términos de entrada y salida, dados los parámetros hidrogeológicos impuesto.

Tabla 5.16. Balance hídrico general del acuífero del Duero en Régimen Natural (hm³)

TÉRMINO DEL FLUJO	ENTRADAS	SALIDAS	DIFERENCIA
Recarga	521.6	0.0	521.6
Nivel Constante	0.0	469.5	-469.5
Filtración en Ríos	29.6	81.7	-52.1
Sumatorio:	551.2	551.2	0.0

En dicho balance, el total de entradas al modelo (551.2hm³) está compuesto por un 94% de recarga y un 6% de filtración en tramos de río, esto según las propiedades de conductancia impuestas a los tramos de río del modelo. A su vez, las salidas corresponden a un 84% de origen de zonas con descarga de nivel constante y un 16% con origen por filtración en ríos. La diferencia entre entradas y salidas debe corresponder a cero, pues el cambio en el almacenamiento del acuífero es nulo, al estar simulando un estado estacionario.

5.2.6. Síntesis y discusión

La metodología propuesta ha sido aplicada en la simulación de un sistema acuífero complejo, donde intervienen variables superficiales y subterráneas en el proceso de calibración conjunta del sistema.

Distintas herramientas y métodos fueron aplicados en el proceso de evaluación del sistema superficial (cuencas, sub-cuencas y sub-sistemas de calibración), así como del sistema acuífero (con sus distintas masas subterráneas), atendiendo a una calibración conjunta, mediante la concepción de reparto selectivo de recarga y del balance de masas.

El entendimiento del funcionamiento conjunto de un sistema complejo es una herramienta necesaria para lograr calibrar un modelo de acuífero integrado en un sistema de evaluación del uso conjunto. En particular, el modelo de acuífero por Autovalores (calibrado en este apartado), ha permitido simular distintas situaciones de funcionamiento del sistema conjunto, logrando obtener resultados niveles piezométricos, volúmenes de descarga y variación del volumen almacenado, asociados a las masas subterráneas del sistema acuífero.

Al tratarse de un modelo de acuífero de tipo interpretativo, es posible lograr simulaciones para distintas situaciones alternas del sistema. Las situaciones de interés por lo general son: (i) simulación en régimen

natural; (ii) simulación en régimen alterado; (iii) simulaciones futuras ante distintos escenarios; (iv) simulación en régimen estacionario; (v) simulación en régimen transitorio. En particular, como resultado de este apartado se han presentado las simulaciones asociadas a los puntos i, ii y iii antes expuestos.

Los resultados de las simulaciones presentadas y la calibración presentada para el modelo de acuífero siguen siendo discutibles, en cuanto a los valores usados para las variables y parámetros que, de entrada, los valores propuestos se da por hecho como los valores reales del sistema natural; entre ellos, los valores medios de recarga en masas subterráneas, los niveles piezométricos iniciales, la evolución de extracciones, etc.

Finalmente, en la Figura 5.41 se muestra una síntesis del estado y las modificaciones más relevantes realizadas a los modelos de flujo subterráneo desarrollado para el entendimiento del funcionamiento del acuífero terciario del Duero.

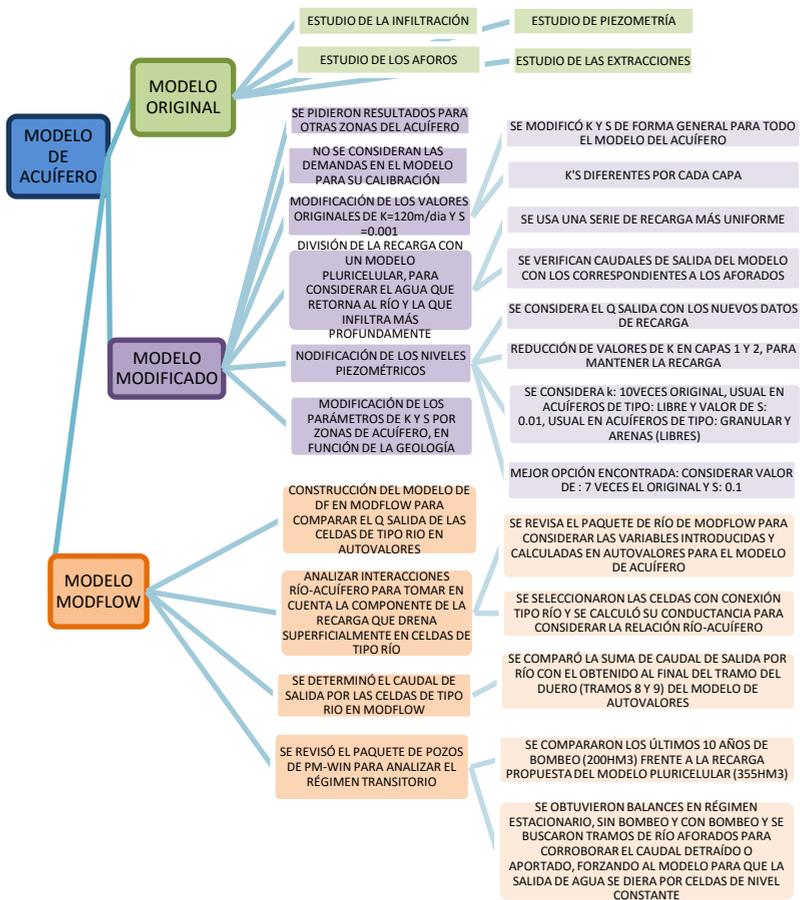


Figura 5.41. Condiciones simuladas en los distintos modelos de flujo subterráneo desarrollados para la evaluación del acuífero del Duero. Fuente: Elaboración propia.

Tesis Doctoral

"No hay que buscar valores absolutos en el mundo relativo de la naturaleza. Dios es simple, todo lo demás es complejo".

Albert Einstein.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA Y SU INTEGRACIÓN EN UN SISTEMA DE USO CONJUNTO

En este apartado se presenta un breve análisis referente a la implementación de la metodología general para la evaluación de acuíferos integrados en sistemas de uso conjunto, así como su implementación en el modelo de acuífero del caso de estudio principal.

6.1. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE INTEGRACIÓN

En el apartado de propuesta metodológica de esta tesis se presenta inicialmente el conjunto de aspectos esenciales para lograr la evaluación conjunta de un sistema de recursos hídricos. Tres aspectos se proponen como los ejes principales sobre los cuales debe girar el estudio del uso conjunto de recursos (un análisis integral del balance de recursos, la estimación de aportaciones y la modelación subterránea). Comúnmente los dos últimos aspectos suelen trabajarse de manera independiente en un estudio a nivel de cuenca hidrológica, lo que conlleva que el primer aspecto sea interpretado desde el respectivo punto de vista del modelador, dando más importancia a los procesos superficiales y/o subterráneos, según sea el caso.

No obstante, el evaluar un sistema de recursos o una cuenca hidrológica de manera conjunta implica dejar de trabajar y considerar los sistemas de manera independiente o no relacionados, sino al contrario, considerarlos como un todo, con un "enfoque de uso conjunto". Por tanto, surge la necesidad de adecuar tanto los modelos superficiales

como subterráneos (ya existentes), para lograr dicha evaluación del uso conjunto. Para lograr esas adecuaciones, se propone (i) primeramente tener una visión o enfoque de uso conjunto en la concepción de la modelación de un sistema superficial y subterráneo inter-conectado, con intercambios de flujo entre sí mismos; (ii) adecuar las herramientas necesarias para separar las aportaciones superficiales y subterráneas, en función del enfoque de uso conjunto; (iii) generar herramientas que permitan evaluar el intercambio de flujo entre sistemas y herramientas que faciliten la calibración conjunta de dichos sistemas.

Una vez implementadas las adecuaciones propuestas y aplicadas las herramientas de simulación y calibración automática de los modelos de acuífero analizados, es posible lograr simular la situación actual de un sistema de explotación considerando un uso conjunto de sus recursos. A su vez, el conjunto de modelos calibrados permite el análisis de situaciones futuras o entender el comportamiento del sistema ante escenarios alternos de funcionamiento.

De igual manera, en el apartado de metodología se presentan dos esquemas representativos del proceso de integración de modelos de acuífero en sistemas con enfoque e uso conjunto; primero un esquema genérico de integración y calibración de modelos superficiales y subterráneos, usados en la evaluación conjunta de recursos, donde los procesos más importantes son los parámetros propuestos para la calibración del acuífero, las hipótesis de recarga subterránea evaluadas y la formulación y estructura del propio modelo.

Finalmente, se propone un esquema del proceso de calibración y simulación conjunta de recursos en un sistema de recursos hídricos, atendiendo a distintas configuraciones de un sistema evaluado, desde un sistema sencillo que no requiere esfuerzo en su calibración conjunta, hasta un sistema complejo que requerirá del uso de herramientas y métodos de ayuda en el proceso de calibración, así como de toma de decisiones sobre los propuestos "ejes transversales de decisión", que se pretende sean una guía para el modelador, referente a detallar en qué aspectos de la modelación conjunta puede incidir para lograr la calibración y simulación conjunta de recursos deseada.

6.2. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL MODELO DE ACUÍFERO DEL CASO DE ESTUDIO PRINCIPAL

El uso de distintos modelos de acuífero para la interpretación de la compleja realidad del funcionamiento del sistema subterráneo del Duero, ha acarreado la necesidad de crear nuevas herramientas computacionales con características de eficiencia y sencillez en el proceso de cálculo, mismas que permitan una correcta calibración y análisis de los modelos propuestos y sus resultados.

En esta tesis se ha trabajado en el uso de condiciones de contorno no lineales (tipo manantial y conexión a río) en la formulación por Autovalores, para la evaluación del funcionamiento hidráulico de masas

subterráneas en conexión con este tipo de cuerpos. La formulación propuesta tiene un reducido coste computacional en su ejecución, cuando se considera la simulación de grandes horizontes temporales. Contar con una herramienta de evaluación de condiciones de contorno no lineales, para casos de acuífero sencillos o complejos permiten realizar un adecuado análisis conjunto de sus respectivas componentes superficial y subterránea, atendiendo a un enfoque de uso conjunto de recursos.

Para lograr la calibración del modelo subterráneo del sistema acuífero del Duero se siguió el esquema propuesto en el apartado metodológico de integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto. En particular, siguiendo la tercer opción del mismo, que plantea (i) un análisis integral del balance de recursos, con enfoque de uso conjunto; (ii) plantear un modelo de acuífero de mayor número de parámetros de calibración (parámetros de control); (iii) evaluar una hipótesis de "recarga selectiva" en masas subterráneas del modelo; (iv) generar y evaluar conjuntos de parámetros hidrogeológicos aleatorios; (v) necesariamente simular el intercambio de flujo entre masas superficiales y subterráneas (grado II ó III de relaciones río-acuífero); y (vi) obtener los parámetros adecuados para una simulación aceptable de las variables comparadas con datos observados.

Finalmente, tras implementar la metodología propuesta sobre el modelo de acuífero del Duero, en conjunto con las herramientas y adecuaciones propuestas a los modelos existentes, se logró la calibración de un sistema acuífero complejo, reproduciendo de manera aceptable el comportamiento medio de las variables de caudal de descarga del sistema, los niveles piezométricos observados y los cambios en el volumen almacenado de las masas subterráneas del sistema. El resultado es un modelo de acuífero calibrado bajo efecto de bombeos, donde se reproduce (de manera suficientemente aceptable) el estado histórico y actual del sistema. Bajo este modelo calibrado ha sido posible evaluar escenarios alternos de funcionamiento del modelo, entre ellos, bajo efecto del cambio climático regionalizado, tópico de gran interés en la península ibérica en general, dadas sus predicciones de incremento de temperatura y reducción de lluvia, que impactan directamente sobre el funcionamiento del sistema en su conjunto.

6.3. APLICABILIDAD Y EXTRAPOLACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA

La calibración y simulación conjunta de recursos hídricos en un sistema de explotación, de acuerdo a lo expuesto en el apartado metodológico, parte del análisis integral del balance de recursos hídricos, bajo el enfoque de uso conjunto de recursos mediante el uso de modelos de acuífero acoplados a modelos de gestión (Figura 3.4). Para lograr tal calibración y simulación, se proponen "*ejes transversales de decisión, ETD*", que pueden traducirse como las pautas a seguir por el técnico modelador, en el proceso de simulación conjunta de un sistema de

explotación. Los ETD marcan, de manera simplificada, las múltiples alternativas que puede seguir el técnico modelador que se enfrente a la necesidad de elaborar un modelo de simulación de la gestión de recursos hídricos bajo enfoque de uso conjunto.

Una de las primeras limitantes en las decisiones a tomar en cada uno de los ETD, son referentes al "*nivel de conocimiento*" del sistema analizado y por evaluar, así como la "*disponibilidad de datos*" necesarios para el uso de modelos hidrológicos (superficiales y/o subterráneos) de mayor o menor detalle en sus resultados. No obstante, existen otros ETD que marcan cambios en el desarrollo del modelo subterráneo a desarrollar, tales como: la consideración de la hipótesis de recarga, los parámetros hidrogeológicos iniciales y su calibración automática, el detalle en la simulación de condiciones de contorno especiales y la integración de los parámetros de los modelos (superficiales y subterráneos), dentro de un modelo de simulación conjunta de alternativas de gestión de los recursos hídricos de un sistema de explotación.

La metodología genérica propuesta para la evaluación de acuíferos acoplados a sistemas de uso conjunto, parte de proponer 3 aspectos de importancia básica para la evaluación conjunta de un sistema de recursos hídricos, los cuales se desarrollan a continuación, atendiendo a distintos niveles de conocimiento en el desarrollo de modelos de acuífero acoplables a sistemas de uso conjunto:

- i. Como primer nivel de conocimiento, **establecer el balance de recursos en la cuenca analizada**, es decir, conocer a groso modo los volúmenes manejados en la cuenca de análisis: entradas, salidas, almacenamientos, flujos internos del sistema, etc.
 - o Un segundo nivel de análisis y conocimiento de la cuenca evaluada es referente a la existencia de interacciones entre los sistemas superficial y subterráneo, es decir, presencia de conexión río-acuífero, descargas por manantiales, conexión a acuíferos por masas de agua superficial (ríos, lagos, presas, humedales, etc.).
 - o El tercer nivel de análisis en este apartado de conocimiento de la cuenca evaluada será el uso de herramientas informáticas para la representación espacial de distintas propiedades superficiales de las cuencas y sub-cuencas del sistema analizado (uso y tipo del suelo, cobertura vegetal, etc.), que junto con el conocimiento y experticia de actores locales, permitan identificar y delimitar las correspondientes sub-zonas superficiales de una cuenca con mayores aptitudes para la recarga profunda al sistema acuífero.

- ii. También con primer nivel de conocimiento, **contar con modelos hidrológicos apropiados que permitan el cálculo de las**

aportaciones superficiales en régimen natural del sistema analizado.

- En segundo nivel de conocimiento, si ya se dispone de modelos hidrológicos previamente calibrados, compararlos con los obtenidos al usar un nuevo modelo, de mayor número de parámetros y/o detalle en sus resultados.
 - Cuando no es posible el uso de un modelo hidrológico más complejo, considerar validar el modelo previo bajo distintos supuestos de análisis, con objeto de conocer las limitaciones del mismo y si es posible, migrar sus parámetros a un modelo simplificado que reproduzca de manera generalizada el comportamiento del sistema superficial.
 - Es posible utilizar la migración de la información hidrológica entre cuencas vecinas, mediante el uso de coeficientes de similitud, que relaciones variables hidrológicas como el escurrimiento medio, los valores medios de precipitación y temperatura de cuencas vecinas monitoreadas y su asignación por migración hidrológica.
 - En tercer nivel de conocimiento, se propone manipular, con experticia, los parámetros de un modelo hidrológico superficial de funcionamiento por tanques conceptuales, poniendo énfasis en la calibración de los parámetros que reproducen las variables superficiales, no así en las subterráneas, pues las mismas pueden ser delegadas a un modelo de flujo subterráneo de mayor detalle y de tiempo de simulación distinto al del modelo superficial.
 - En cuarto nivel de conocimiento del sistema, se podrán usar herramientas de calibración automática, como el caso de algoritmos de optimización lineal, con objeto de calibrar los modelos superficiales atendiendo a valores proporcionales de distintas funciones objetivo, las cuales estarán asociadas al forzamiento de la recarga selectiva desde sub-cuencas con aportación subterránea, previamente designadas en el primer apartado del análisis del funcionamiento del sistema.
- iii. Finalmente, también con primer nivel de conocimiento, será necesario **contar con un modelo hidrogeológico de simulación del flujo subterráneo**, así como del intercambio de flujo entre sistemas superficial y subterráneo, de acuerdo a las condiciones de interacción presentes.
- En segundo nivel de conocimiento del sistema, se propone generar un modelo simplificado del sistema acuífero a evaluar, en herramientas de modelación tipo

- PMWin-ModFlow, de entorno amigable para el técnico desarrollador del modelo subterráneo.
- El modelo subterráneo a desarrollar podrá ser alimentado en sus datos en función de la información básica recabada del subsuelo en la zona: litología, formaciones geológicas principales, tipos de suelo, etc., para los cuales puede ser asignado inicialmente un valor específico de los parámetros hidrogeológicos principales de un modelo de flujo subterráneo (conductividades, almacenamientos).
 - Esta primera aproximación de los parámetros puede ser justificada si se cuenta con estudios previos en alguna zona del acuífero que se pretende modelar o en su defecto, provenir de modelos hidrogeológicos de menor dimensión que el acuífero a simular, los cuales pueden estar previamente elaborados y calibrados.
 - En tercer nivel de conocimiento del sistema se tendrá también disponibilidad de modelos subterráneos previamente calibrados, con detalle suficiente y/o en exceso, dados los objetivos de simulación del uso conjunto en un sistema de análisis de gestión (p.e., modelos de diferencias finitas en ModFlow), de los cuales se requerirá extraer la información simplificada y necesaria para elaborar un nuevo modelo subterráneo que sea acoplable a un modelo de gestión de recursos (p.e., modelos por Autovalores desarrollados en AQUIVAL 2.0).
 - Como cuarto nivel de conocimiento, se podrán usar herramientas de calibración automática que asignen y evalúen parámetros en el modelo de acuífero, con objeto de reproducir los valores observados de caudales de descarga en zonas con interacción superficial y subterránea (conexión río-acuífero, manantiales, descarga a un nivel constante, etc.), niveles piezométricos de distintas zonas de interés, volúmenes almacenados y/o variación del almacenamiento en masas subterráneas, etc.

Para llevar a cabo la calibración, en régimen natural, de los parámetros hidrogeológicos de un modelo de acuífero se proponen las etapas siguientes:

- a. Realizar una primera "*calibración de tipo volumétrica*" en régimen natural, mediante la comparación de caudales simulados y observados en las zonas de salida natural de caudal del acuífero.
- b. Refinar la primera calibración mediante una "*calibración de tipo piezométrica*", de igual forma, en régimen natural, bajo el

supuesto de conocimiento de los niveles piezométricos originales del sistema.

- c. Realizar una última "*calibración de tipo integradora*", para la cual se ajustan las variables inherentes al dimensionamiento del acuífero y que están directamente asociadas a los propios parámetros hidrogeológicos del modelo (espesores, niveles piezométricos iniciales, dimensiones de las celdas usadas, etc.).

Respecto a la calibración en régimen alterado, es común partir del conocimiento de la respuesta del sistema ante las acciones externas y mediante el "*enfoque de modelación de tipo caja negra*", se espera ajustar los valores de los parámetros hidrogeológicos del modelo desarrollado, para que simulen los valores observados de niveles piezométricos, principalmente. Bajo este enfoque, habrá que tener cuidado en no perder de vista los valores de los parámetros hidrogeológicos obtenidos, los cuales deberán estar dentro del rango de variabilidad de acuerdo a los distintos tipos de litología y formaciones geológicas físicas presentes en el acuífero real, fuera de estos rangos, la modelación empieza a perder sentido físico, pues los valores de los parámetros obtenidos en este supuesto no sería posible encontrarlos de manera natural en un sistema hidrológico subterráneo.

A continuación, en la Figura 6.1 se muestra, a manera de resumen, un gráfico integrador que compara el uso de herramientas de simulación conjunta respecto del conocimiento del sistema analizado y la disponibilidad de datos, con lo que se propone el establecimiento de "*categorías de calibración de acuíferos*" bajo enfoque de acoplamiento del uso conjunto de recursos hídricos de un sistema integral:

- i. La "*Categoría I*" abarca el conocimiento básico del sistema a evaluar y de las interacciones entre sistemas, las cuales pueden ser modeladas con herramientas de simulación sencillas. La disponibilidad de datos es limitada y se centra en corroborar datos de modelos más complejos, sin que necesariamente se pueda lograr nuevo conocimiento del sistema evaluado.
- ii. La "*Categoría II*" supone la manipulación y extracción de información desde fuentes alternas (modelos pre-existentes), a partir de las cuales se puede lograr una mejora en la simulación de los procesos superficiales y subterráneos asociados a los modelos desarrollados en "*Categoría I*" de calibración. La disponibilidad de datos es suficientemente robusta como para generar nuevo conocimiento sobre el sistema conjunto analizado.
- iii. La "*Categoría III*" de calibración implica un conocimiento exhaustivo del sistema y su funcionamiento, así como de una disponibilidad de datos no limitada, por lo que es posible lograr una buena simulación conjunta de recursos en sistemas hidrológicos evaluados.

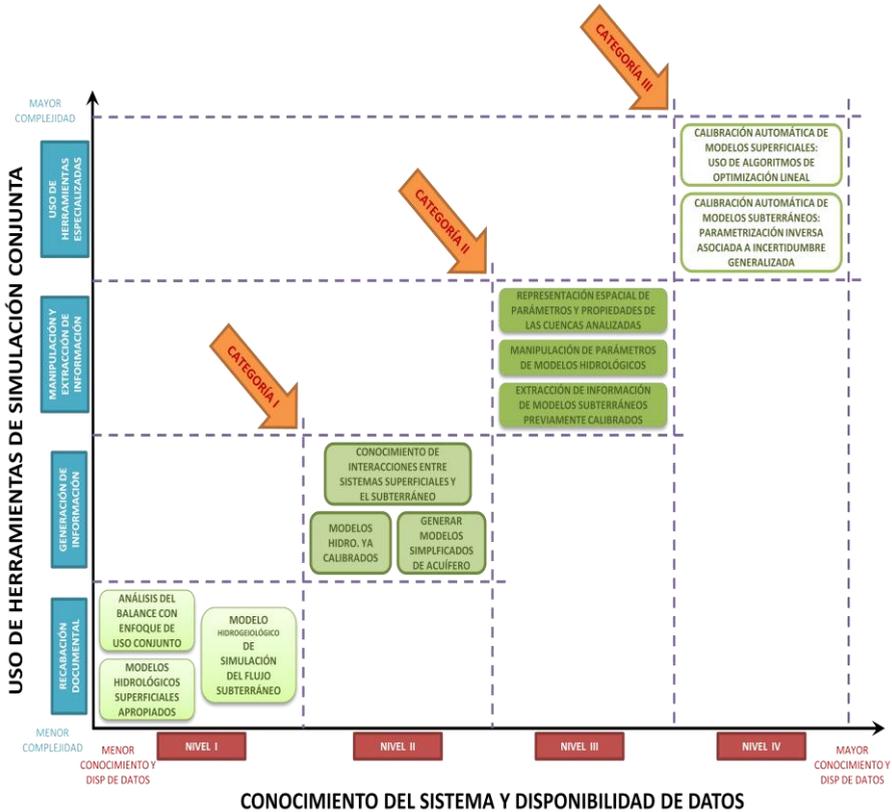


Figura 6.1. Niveles de conocimiento de un sistema de recursos hídricos sujeto a evaluación conjunta y sus herramientas de simulación asociadas. Fuente: Elaboración propia.

6.3.1. Limitantes del uso de la metodología ante disponibilidad y escasez de datos

La propuesta de la presente tesis pretende ser una base metodológica estructurada para llevar a cabo la correcta simulación y calibración conjunta de un sistema de recursos hídricos donde las interacciones naturales presentes entre los sistemas superficiales y subterráneo son evaluados bajo el enfoque de uso conjunto y mediante el desarrollo de modelos de flujo subterráneo capaces de simular eficientemente las relaciones río-acuífero, las descargas por manantial, por niveles de conexión constantes, etc.

En general, una limitante a la simulación conjunta de recursos hídricos suele ser la no correspondencia de los periodos de registro de las variables observadas que deben ser comparadas con las simuladas, para lo que se puede recurrir a las opciones siguientes:

- i. Recortar el periodo de simulación y calibración, para ajustar datos observados y simulados

- ii. Ante escasez de datos observados (comúnmente presente en registros piezométricos y/o de escurrimiento, en régimen natural y/o alterado), se propone hacer simulaciones para las cuales, los valores históricos puntuales caigan sobre la tendencia de los valores simulados

Respecto a la disponibilidad de datos, se propone manejar 4 niveles de disponibilidad, en base al conocimiento de los sistemas superficial y subterráneo, así como de los años de registro de los mismos:

- i. Conocimiento básico una cuenca y acuífero:
 - a. De tipo climáticas, como precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.
 - b. De tipo espacial y territorial, como los parámetros hidrogeológicos, litología, tipos y usos del suelo, cobertura vegetal, etc.
- ii. Conocimiento básico de variables volumétricas:
 - a. Escurrimientos superficiales.
 - b. Valores de recarga subterránea.
 - c. Flujos subterráneos de descarga por conexión entre sistemas superficial y subterráneo (conexión río-acuífero, manantial, etc.).
- iii. Conocimiento del comportamiento piezométrico:
 - a. Campañas de monitoreo de niveles piezométricos en zonas puntuales.
 - b. Registro de pozos y niveles estáticos/dinámicos.
 - c. Niveles piezométricos promedio, provenientes de estudios hidrogeológicos específicos/modelos de acuífero precedentes.
- iv. Conocimiento de la alteración antrópica del sistema:
 - a. Extracciones/Bombeos.
 - b. Recargas artificiales.
 - c. Retornos de riego.
 - d. Trasvases.
 - e. Embalses.
 - f. Otros.

6.3.2. Consideraciones sobre la incertidumbre asociada a la aplicabilidad de la propuesta metodológica

En general, la incertidumbre asociada a la propuesta metodológica está correlacionada con las distintas fuentes de la misma.

- i. Por un lado, está "*la incertidumbre de los datos de entrada*", pues al no conocer con total seguridad que los valores observados sean realmente los valores asociados a las variables medidas en el histórico de registro, se desconoce su incertidumbre asociada, puesto que las mismas se consideran válidas, dado que son las propias dependencias estatales las que ponen a disposición de usuarios externos dicha información, previo tratamiento y depuración de los mismos.
- ii. También existe "*la incertidumbre asociada a los modelos hidrológicos usados*", lo cual tiene que ver con que los mismos sean los más idóneos para representar y simular las variables de interés, dados los datos disponibles; no obstante será interesante el discutir la idoneidad de los modelos escogidos para la simulación del uso conjunto, dada la estructura propia de los mismos (por ejemplo, la conceptualización por tanques de los modelos superficiales, la linealización de las condiciones de contorno en modelos subterráneos, etc.).
- iii. Además, existe "*la incertidumbre sobre la propia propuesta metodológica*", esto concerniente al grado de simulación escogido, las decisiones hechas por el técnico modelador sobre un eje transversal de decisión y las respectivas asunciones para realizar una u otra decisión en el proceso de calibración y simulación propuesto como metodología.
- iv. Respecto a "*la incertidumbre asociada a los datos de salida*", la misma está enmascarada por la estructura propia de los modelos usados, los datos de entrada y la metodología misma, por lo que su evaluación puede considerarse como la integración de las incertidumbres anteriormente expuestas.

"Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar".

Nelson Mandela.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En este apartado se expone lo siguiente: (i) las aportaciones originales derivadas de la presente tesis; (ii) las conclusiones generales y particulares de la investigación realizada y (iii) se proponen las líneas futuras de investigación, con el fin de mejorar en la evaluación del uso conjunto en sistemas de explotación de recursos hídricos complejos.

7.1. RESUMEN

En esta tesis se propuso una metodología genérica para la inclusión de modelos de acuífero que evalúan eficientemente las relaciones río-acuífero en diferentes casos de estudio, de menor y mayor complejidad, dentro del marco de evaluación del uso conjunto de recursos hídricos. La metodología propuesta hace énfasis en el uso de las herramientas y métodos particulares necesarios para lograr la evaluación conjunta de un sistema de recursos hídricos. Las adecuaciones a herramientas existentes y la implementación de otras más, permitió la evaluación superficial y subterránea del agua que interactúa conjuntamente de manera natural dentro de un sistema hidrológico. Las herramientas y métodos particulares que fueron empleados en esta tesis atendieron a los siguientes aspectos:

- i. La obtención conjunta de aportaciones superficiales y subterráneas, mediante la adecuación de herramientas de simulación superficial de recursos (modelos lluvia-escorrentía), bajo el enfoque de uso conjunto.
- ii. La evaluación eficiente del intercambio de flujo dado entre masas superficiales y subterráneas de un mismo sistema hidrológico, mediante la implementación de una herramienta de

- evaluación de relaciones río-acuífero dentro de un modelo de acuífero por Autovalores.
- iii. La evaluación automática de parámetros hidrogeológicos para la calibración de un modelo de acuífero por Autovalores con simulación de relaciones río-acuífero y enfoque de uso conjunto, mediante la estimación inversa de parámetros, logrado con la adecuación de una metodología de estimación de incertidumbre generalizada.
 - iv. La evaluación del impacto del cambio climático regionalizado sobre el cambio en la recarga media en las masas subterráneas de un sistema acuífero complejo, mediante la estimación y aplicación de las anomalías climáticas (de precipitación y temperatura medias) sobre las correspondientes series históricas y la re-evaluación de las aportaciones superficiales y subterráneas.

La metodología se ha implementado en dos casos de estudio: parcialmente en una cuenca sencilla (modelación del Acuífero Beniardá-Polop, Alicante, España) y para una cuenca compleja con interacción intensiva del uso conjunto (Cuenca hidrográfica del Río Duero y su sistema acuífero homónimo subyacente, España). Los resultados de implementar la metodología y sus herramientas y métodos particulares sobre el caso de estudio complejo han sido satisfactorios, al lograr validar la propuesta metodológica y las adecuaciones sobre herramientas y métodos pre-existentes. En particular, las soluciones numéricas aproximadas propuestas para la evaluación de relaciones río-acuífero (en ambos casos de estudio) han demostrado ser una propuesta potente y un aporte más eficiente para la evaluación de la interacción natural de un sistema de uso conjunto.

7.2. APORTACIONES ORIGINALES DE LA TESIS

Como aportaciones originales de la investigación realizada en esta tesis destacan las siguientes:

- Desarrollar e integrar una metodología genérica para la evaluación de modelos de acuífero usados en sistemas de recursos hídricos complejos, con enfoque de uso conjunto.
- Adecuar los parámetros de los modelos hidrológicos superficiales para lograr la infiltración selectiva entre masas superficiales y subterráneas de un mismo sistema, evaluado con enfoque de uso conjunto.
- Diseñar la formulación de una rutina para obtener las soluciones numéricas aproximadas en la evaluación de condiciones de contorno no lineales, presentes en las relaciones río-acuífero evaluadas por modelos de acuífero en Autovalores integrados en sistemas de uso conjunto.
- Desarrollar una rutina para la estimación inversa de parámetros hidrogeológicos de modelos de acuífero por Autovalores,

mediante la adaptación y aplicación de la metodología de estimación de incertidumbre generalizada.

7.3. CONCLUSIONES

Primero son presentadas las conclusiones particulares, que hacen referencia a los resultados obtenidos en los ejemplos de evaluación de condiciones de contorno no lineales y. Por su parte, las conclusiones generales son referentes a la implementación de la metodología propuesta: sobre el planteamiento del trabajo realizado en su conjunto, sobre la aplicabilidad, implantación y reproducción de las metodologías propuesta (de manera generalizada), para otros sistemas de explotación de uso conjunto y/o acuíferos con marcada interacción entre las aguas superficiales y subterráneas, fuera del ámbito de estudio.

7.3.1. Conclusiones particulares

7.3.1.1. *Sobre los casos de acuífero con interacción sintética y real de relaciones río-acuífero y manantial*

Como conclusiones particulares referentes a la evaluación de los casos sintéticos de acuífero, siguiendo la metodología de Autovalores, se remarca la integración de una herramienta para evaluar eficientemente condiciones de contorno no lineales, tipo relación río-acuífero y/o manantial, en términos de la metodología de Autovalores. Su aplicación se realiza para el caso de celdas de acuífero con la condición de conexión (perfecta o imperfecta), mediante el uso de factores correctores del descenso en las celdas evaluadas.

El proceso iterativo planteado para la corrección de los niveles y caudales de descarga en la matriz de descensos $[D_{ij}]$ no supone un coste computacional significativo, dado que el proceso recalcula y almacena la corrección para distintos estados y configuraciones de conexión/desconexión de las celdas estudiadas y el acuífero. El coste computacional obtenido en las simulaciones es bajo, tal como quedó demostrado en el análisis de resultados, específicamente en el apartado de tiempos de ejecución del modelo de Autovalores, cuando los mismos son comparados con los resultados de un modelo similar por diferencias finitas.

El tiempo de ejecución de esta herramienta se ve mejorado en simulaciones con períodos temporales largos, pues la formulación propuesta requiere realizar una sola vez el cálculo del vector de estado (L_t^*) y su correspondiente corrección cuando exista conexión o desconexión de las celdas con el tipo de condición de contorno evaluada. Lo anterior mejora el tiempo de cálculo para subsecuentes pasos de tiempo evaluados, pues en ellos solo se requiere asignar de manera directa el valor de las acciones elementales consideradas en el modelo evaluado, evitando la resolución de ecuaciones en derivadas parciales que requiere la formulación de MODFLOW.

La evaluación de las condiciones de contorno no lineales, en los casos sintéticos evaluados, se ha logrado mediante la formulación en términos

de Autovalores, de una corrección (de tipo lineal) de las alturas piezométricas, lo que permite la evaluación del intercambio de flujo en la conexión río-acuífero y/o manantial presente en modelos de acuífero integrados a sistemas de uso conjunto con interacción intensiva del agua superficial y subterránea.

Se observó que los resultados del cálculo del caudal de descarga por celdas tipo manantial son mejores cuanto mayor es el detalle de la discretización en esas zonas (respecto al caso sintético para 1 celda tipo manantial y para el caso sintético con la misma celda del caso anterior, pero discretizada en 3 celdas de dimensión equivalente). De igual forma, se mejora la eficiencia en el tiempo de cálculo requerido para períodos de simulación largos.

Tras la verificación del funcionamiento de la herramienta, implementada en casos sintéticos de acuífero, se procedió a aplicar la misma en un caso real, donde se requirió simular la descarga por zonas de manantial de un sistema acuífero con intercambio de flujo entre sus masas y conectados física e hidráulicamente con zonas descarga por manantial.

Sobre la aplicación de la formulación lineal de Autovalores para la evaluación de condiciones de contorno tipo río/manantial, en un caso real (acuífero Beniardá-Polop en Alicante, España), los resultados de caudal de descarga y almacenamiento en los acuíferos fueron bastante apegados los valores observados, con lo que nuevamente se corrobora el buen desempeño de la herramienta desarrollada. Los valores medios de las variables antes señaladas fueron calculados con una estimación de 15% y 2% superior respectivamente en el modelo por Autovalores, respecto de los valores medios observados.

Los parámetros del modelo de acuífero desarrollado y calibrado fue usado en el análisis de gestión conjunta del Sistema de explotación de la Marina Baja, junto con otro tipo de modelos de acuífero más simples para representar la totalidad de los sistemas acuíferos de la zona, teniendo a su vez buenos resultados de simulación y análisis de alternativas de gestión.

7.3.1.2. *Sobre los modelos de lluvia-escorrentía de los sistemas de explotación del Duero*

Los modelos lluvia-escorrentía desarrollados para los sistemas de explotación del Duero siguen la parametrización necesaria en modelos tipo HBV, el cual permite dividir los distintos tipos de flujo que generan la escorrentía total y a partir del cual es descontado el flujo base en las sub-cuencas que tienen interacción con masas subterráneas, con el propósito de no duplicar recursos hídricos en el proceso de simulación conjunta.

La mayoría de los parámetros de los modelos fueron obtenidos mediante promedios de valores registrados de manera espacial en mapas, por ejemplo, el mapa de Uso de Suelo y Vegetación de cada sistema permitió obtener el valor de la Evapotranspiración potencial (ETP), dato necesario para la modelación de la Evapotranspiración Real (ET) mes a mes presente en cada sistema analizado. En el caso del mapa de

Litología, este permitió obtener los parámetros referentes a los coeficientes de percolación y de descarga de los distintos tanques conceptuales que maneja HBV para la separación de flujos.

Los resultados de simulación de dos sistemas de explotación de la Cuenca del Duero (caso de estudio general) se presentan en el Anejo 1: Estimación conjunta de aportaciones. Otros modelos (para distintos sistemas de explotación pertenecientes a la CH-Duero) fueron desarrollados de igual forma, con el propósito de mejorar la obtención de infiltraciones para el modelo de acuífero desarrollado y calibrado en Autovalores para el Acuífero Terciario del Duero. Como resultados, también se cuenta con memorias de trabajo, que pueden ser retomadas para trabajos posteriores en alguna de las líneas de investigación generadas en esta tesis.

Los resultados de caudal (medio anual y mensual) presentes en el Anejo 1 para los Sistemas de Explotación Pisuerga y Arlanza muestran un ajuste variable en la calibración automática de la función objetivo que minimiza el error de la diferencia entre el valor simulado y el valor observado. La calibración automática se realizó con el Algoritmo de Optimización SCE-UA adaptado en Visual Basic para su ejecución en hojas de cálculo Excel. Como ejemplo, para el caso de la subzona de calibración SbZ-3 del Sistema Arlanza, se obtuvo un valor de la F_{obj} de -0.8047; para el caso de la subzona SbZ-1 del Sistema Pisuerga, el valor de la F_{obj} fue de -0.9175.

La adaptación propuesta a los modelos hidrológicos superficiales, para la evaluación de la recarga selectiva de masas superficiales a masas subterráneas (mediante la manipulación de parámetros de descarga de los modelos superficiales empleados), evita la duplicidad de recursos en la evaluación conjunta de recursos hídricos en la cuenca analizada. La duplicidad de recursos puede provenir al considerar que el modelo lluvia-escorrentía genera valores de infiltración que posteriormente vuelven a los cauces (por flujo local en los acuíferos) y a su vez, que en las relaciones río-acuífero siempre se presenta un intercambio de flujo constante entre masas superficiales y subterráneas, las cuales son simuladas a detalle en un modelo de acuífero y no en un modelo lluvia-escorrentía. Por tanto, al descontar el agua infiltrada en las masas superficiales que debe modelarse en masas subterráneas y por tanto, considerarlo sólo en un modelo de acuífero, se evita duplicar volúmenes de agua disponibles en el sistema en su conjunto.

Esta adaptación puede extrapolarse para otros casos de estudio, donde se lleve a cabo uso intensivo de recursos hídricos de manera conjunta y/o en sistemas complejos con uso conjunto de recursos hídricos.

Finalmente, comentar que los mismos parámetros de los modelos calibrados han sido usados en la evaluación del impacto del cambio climático regionalizado para las masas subterráneas del modelo de acuífero analizado.

7.3.1.3. *Sobre la aplicabilidad de la solución numérica aproximada para la evaluación de condiciones de contorno no lineales*

Actualmente el desarrollo de investigación en hidrología se ha centrado en el desarrollo de técnicas numéricas eficientes para ejecutar modelos de tipo distribuido, basándose en la simplificación de modelos numéricos complejos, a modelos más simples y robustos. Para el caso de las aguas subterráneas, la inclusión de modelos de acuífero simplificados, que representen lo más adecuadamente posible los parámetros y el flujo subterráneo, en el contexto de la modelación conjunta de sistemas de recursos hídricos, su ejecución se logra de manera más eficiente que el modelo numérico original, lo que representa un aporte y mejora en la investigación hidrológica.

El estudio inicial de comprobación del buen funcionamiento de las soluciones numéricas aproximadas en los casos sintéticos, dan la pauta para la implementación de dichas soluciones en modelos de acuífero de mayor complejidad (los acuíferos Beniardá-Polop y del Duero en España).

Mediante la validación de las soluciones numéricas aproximadas, se posibilita la inclusión de modelos de acuífero complejos en esquemas de simulación de la gestión conjunta de recursos hídricos, permitiendo evaluar de manera eficiente la interacción entre aguas superficiales y subterráneas ante distintas alternativas de gestión dentro del entorno de toma de decisión AQUATOOL.

Las principales limitaciones de las soluciones aproximadas se centran en la imposibilidad de representar detalladamente los niveles piezométricos en zonas cercanas a pozos de extracción, cuando no se cuenta con un mallado suficientemente detallado de la zona. En el caso de que se utilizase un mallado más detallado, esto ralentizaría la primera ejecución del modelo subterráneo, donde son calculados los autovectores y matrices de Autovalores. Una vez realizada la primera ejecución, la estructura propia de la técnica de Autovalores aplicada a la simulación de flujo subterráneo, permite que únicamente conociendo y aplicando distintos vectores de acciones exteriores, se conozca la respuesta del acuífero ante estas nuevas acciones. Esta propiedad del modelo por Autovalores otorga una gran ventaja sobre otro tipo de modelos (p.e. de diferencias finitas en ModFlow), que requieren volver a leer datos, ejecutar rutinas desde cero y converger en una solución, proceso que es repetido para cada variación sobre las acciones exteriores que afectan al modelo.

Por tanto, esta ventaja referente a la estructura del modelo de acuífero por Autovalores, le permite su inclusión en esquemas de gestión, realizando múltiples simulaciones de escenarios de gestión, que se requiere sean lo más rápidos y precisos posibles, pero tomando en cuenta la interacción entre aguas superficiales y subterráneas en amplios períodos temporales.

7.3.1.4. *Sobre la estimación de parámetros hidrogeológicos asociada a incertidumbre generalizada*

Se utilizó la metodología GLUE para obtener el conjunto de parámetros, asociado a un intervalo de confianza, el cual satisface las condiciones de aceptabilidad de eficiencia en la estimación del caudal de descarga por celdas con conexión río-acuífero en el modelo de flujo subterráneo de tipo lineal, por Autovalores del acuífero del Duero (España). Se observó en los resultados la mejora en la estimación paramétrica de campos de conductividad y almacenamiento, tras la aplicación de la metodología de estimación de incertidumbre (GLUE), ganando en el conocimiento del modelo y del acuífero estudiado.

En este estudio, la metodología GLUE fue empleada para encontrar el conjunto de parámetros y su incertidumbre asociada, respecto a la simulación del flujo subterráneo en la zona de estudio. Algunos de los puntos principales del apartado son:

- i. Los resultados indican que con solo pocos parámetros el modelo se vuelve sensible, teniendo gran impacto en el cálculo del flujo de descarga.
- ii. Ha quedado de manifiesto el fenómeno de “equifinalidad”, con el que se obtienen, para similares valores de eficiencia de Nash, distintos conjuntos de parámetros.
- iii. Se concluye que la incertidumbre asociada al cálculo del caudal de descarga (hecha en las múltiples realizaciones), está mayormente relacionada con la estructura del modelo de flujo, más no tanto a la función de distribución asociada “a priori” para la definición de la distribución de parámetros aleatorios.
- iv. Este tipo de incertidumbre puede tener su origen en la simplificación realizada de la estructura del modelo, al pasar del modelo de diferencias finitas de ModFlow al modelo por Autovalores en AQUIVAL 2.0.
- v. Resalta la necesidad de llevar a cabo posteriores estudios, referentes al muestreo de datos de campo (parámetros) para las distintas zonas del modelo de estudio, los cuales reduzcan la incertidumbre asociada a los mismos, así como trabajar en un mayor detalle de la estructura del modelo de flujo usado.
- vi. Será de gran importancia el identificar las posibles causas de variabilidad en los datos observados, fuente de comparación con los valores simulados.

Ante tal caso, futuros estudios, con mayor certidumbre en el conjunto de parámetros (provenientes de datos de campo), ayudará a mejorar la eficiencia en el cálculo de la descarga del modelo. También será necesaria la identificación de posibles causas de variabilidad en el flujo de descarga, posiblemente por variaciones temporales en la explotación de los recursos hídricos en el acuífero estudiado, así como de la influencia de períodos húmedos y secos y su relación con la recarga asociada.

7.3.1.5. *Sobre el impacto del cambio climático regionalizado en masas subterráneas del Duero*

La metodología seguida para la estimación del impacto regionalizado del cambio climático se basó en determinar los tipos de modelos climáticos de circulación global, así como la técnica de bajada de escala para el modelo de circulación regional a usar en la estimación de las anomalías climáticas en temperatura (T_p) y precipitación (P_p).

Los resultados de las anomalías climáticas regionalizadas para la Cuenca del Duero muestran un posible incremento de la Temperatura media anual de entre 1.2°C y 5.2°C; respecto de la Precipitación media anual, los resultados muestran una reducción en promedio de entre 28.5% y 46.1%, pero en los mismos se tiene mucha incertidumbre sobre las proyecciones realizadas, que es de donde se extrajeron los porcentajes de variación que fueron aplicados a los sistemas de explotación de la zona de análisis.

Una vez obtenidas las anomalías mensuales, estas fueron aplicadas a las series históricas de T_p y P_p y las nuevas series fueron introducidas en los modelos hidrológicos superficiales ya calibrados de los distintos sistemas de explotación de la Cuenca del Duero.

Los resultados de aportaciones superficiales para dos subzonas de calibración de distintos Sistemas de Explotación de la zona de estudio mostraron que sus aportaciones a largo plazo pueden reducirse entre un 12.9% y un 34.3%.

Tras la simulación de los modelos lluvia-escurrentía, se obtuvieron nuevos valores de recarga en las sub-zonas superficiales con interacción con las masas subterráneas específicas del acuífero del Duero. Los resultados muestran una reducción de hasta el 29% en la recarga media anual, para el escenario de concentración de CO_2 , menos favorable (RCP 8.5), de acuerdo a la ventana temporal 2081-2100. De esta manera, ha sido posible obtener el impacto directo sobre la recarga que debe asignarse a las masas del modelo de acuífero simulado en Autovalores, en función de los escenarios climáticos analizados.

7.3.2. Conclusiones generales

El análisis y gestión conjunta de recursos hídricos en sistemas complejos atiende a muy variadas complicaciones en su proceso de desarrollo. En este trabajo se ha llevado a cabo el desarrollo e implementación de una metodología que da las pautas para la evaluación de recursos hídricos en modelos de acuífero integrados en sistemas de uso conjunto. Cada apartado propuesto por la metodología se apoya o hace uso de herramientas y métodos variados, según son las necesidades de simulación y disponibilidad de datos. Una vez establecida la metodología genérica de integración, el siguiente paso realizado fue evaluar métodos y herramientas sobre casos particulares, con el propósito de validar algunos de estos métodos y herramientas o de conocer la eficiencia del funcionamiento de los mismos.

En unas herramientas se propusieron adecuaciones, de acuerdo a las necesidades de modelación con enfoque de uso conjunto, como es el caso de los modelos hidrológicos superficiales de la Cuenca del Duero, con los que se logró la separación selectiva de aportaciones en subzonas de calibración superficial con interacción con masas subterráneas. Algunas herramientas secundarias también fueron útiles en la calibración de los modelos hidrológicos superficiales, tal es el caso del uso de los calibradores automáticos con optimización lineal de tipo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution, algoritmo evolutivo con características de algoritmo genético), que tiene muy buenos resultados en la calibración automática de modelos hidrológicos.

Para evaluar apropiadamente el intercambio de agua dado por la conexión de masas superficiales y subterráneas, en el contexto de uso conjunto de recursos hídricos, se propuso un conjunto de soluciones numéricas aproximadas presentadas para la evaluación eficiente de las relaciones río-acuífero y/o manantial, presentes de manera natural y que deben ser consideradas en los modelos de acuífero integrados a sistemas de uso conjunto. Dichas soluciones proponen realizar correcciones de las alturas piezométricas en las celdas de acuífero con dicha condición de conexión, mediante el aporte o extracción del caudal necesario para igualar las alturas piezométricas real y simulada en la celda analizada, en cada paso de tiempo evaluado. Las soluciones numéricas demostraron su eficiencia en el Capítulo 4 de la presente tesis, midiendo su eficiencia y tiempo de cálculo respecto de un modelo sintético similar en PMWIN-MODFLOW y posteriormente en la evaluación de caudal de descarga por manantial de un modelo de acuífero real.

Otras herramientas fueron útiles para mejorar la calibración automática de parámetros hidrogeológicos en el modelo de acuífero analizado. En particular, la aplicación de la metodología GLUE permitió calibrar volumétricamente el caudal de descarga del sistema acuífero del caso de estudio principal (sistema acuífero del Duero) y posteriormente mejorar la calibración de niveles piezométricos del mismo.

Finalmente, teniendo las herramientas de simulación superficial y subterránea ya calibradas para las condiciones de funcionamiento histórico, se procedió a evaluar el impacto del cambio climático regionalizado, para un caso de estudio en particular (cuenca hidrológica del Duero). El análisis del impacto regional del cambio climático se llevó a cabo sobre los valores de recarga media anual de las masas subterráneas del sistema acuífero del Duero, con lo que se determinan los posibles efectos del cambio climático sobre el funcionamiento del sistema hidrológico en su conjunto (determinando la variación en las aportaciones superficiales, recarga del acuífero y su funcionamiento para las condiciones de distintos escenarios climáticos evaluados).

7.4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Este apartado resume las posibles líneas de investigación futura que se consideran interesantes para mejorar la metodología propuesta para la integración de modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto, así como alternativas de investigación con enfoque de uso conjunto de recursos hídricos. Algunas de estas líneas de investigación son:

- Una línea directa de investigación es la aplicación de la metodología propuesta en otros sistemas de explotación reales, bajo distintas condiciones de interacción de sus recursos y uso conjunto de los mismos. La aplicación de la metodología permitiría a investigadores menos experimentados en el tema, tener presente el proceso necesario que debe considerarse en la evaluación integral de recursos hídricos con enfoque de uso conjunto.
- La necesidad del uso de algoritmos de calibración automática para los modelos hidrológicos superficiales con enfoque de uso conjunto, abre una línea de investigación futura referente a la implementación de funciones objetivo óptimas, que contemplen no solo el ajuste a los valores medios y/o extremos de las series históricas, sino que además en la optimización de parámetros consideren de mejor forma el forzamiento de los mismos para lograr la infiltración selectiva de sub-zonas de calibración con relación con masas subterráneas.
- La presente investigación no ha considerado el efecto del error cometido en la aproximación realizada para la evaluación de condiciones de contorno no lineales dadas en relaciones río-acuífero y/o manantial. Será pertinente efectuar un estudio que permita determinar la sensibilidad del modelo de acuífero ante distintas configuraciones de este tipo de condición en celdas de acuífero analizados.
- Otra línea de investigación que convendría explorar será la implementación de una herramienta genérica para la generación y evaluación automática de parámetros hidrogeológicos de los modelos de acuífero usados en el contexto del uso conjunto, atendiendo a la modelación estocástica de campos de parámetros y su incertidumbre asociada.

CHAPTER 7

CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH LINES

This section states the following: (i) the novel contributions resulting from this thesis; (ii) the general and specific conclusions of the investigation and (iii) some future research lines are proposed, in order to improve the evaluation of conjunctive use on complex water resources systems exploitation.

7.5. SUMMARY

In this thesis a generic methodology for including aquifer models that efficiently evaluate river-aquifer interactions in different case studies, from less to more complexity, within the framework of evaluation of conjunctive water resources use. The proposed methodology emphasizes the use of particular tools and methods to achieve the conjunctive evaluation of a water resources system. The adjustments to existing tools and the implementation of other allowed the conjunctive evaluation of surface water and groundwater that naturally interact within an hydrologic system. The particular tools and methods that were used on this thesis attended the following:

- i. The conjunctive acquisition of surface and groundwater contributions, by adapting surface resources simulation tools (rainfall-runoff models), under the approach of conjunctive use.
- ii. The efficient flow interchange evaluation given between surface and groundwater masses of a same hydrological system, by implementing an assessment tool for the river-aquifer interactions in an eigenvalues aquifer model.
- iii. The automatic hydrogeological parameters evaluation in order to calibrate an eigenvalues aquifer model, including river-aquifer interactions and the conjunctive use approach, by using the

- inverse parameter estimation, made by an adecuation of the generalized uncertainty estimation methodology.
- iv. The regionalized climate change impact assessment on the average recharge change in underground masses of a complex aquifer system, throught the estimation and application of the climate anomalies (rainfall and temperature averages) over the corresponding time series and the re-evaluation of surface and groundwater contributions.

The methodology has been implemented in two case studies: partly in a simple basin (Beniardá-Polop aquifer model, Alicante, Spain) and to a complex basin with intensive conjunctive water use interaction (Duero River Basin and its homonimus underlying aquifer system, Spain). The results of implementing the methodology and the particular tools and methods used on the complex case study were satisfactory, achieving the validation of the methodological proposal and the adaptations of pre-existing tools and methods. Particularly, the proposed approximated numerical solution for the evaluation of the river-aquifer interaction (in both case studies) have proven to be a powerful and more efficient proposal for the evaluation of the natural interaction of a conjunctive water use system.

7.6. ORIGINAL CONTRIBUTIONS OF THE THESIS

As original contributions made on the thesis research are the following:

- The development an integration of a generic methodology for evaluating aquifer models that are used on complex water resources systems, with conjunctive use approach.
- Adapt the parameters of the rainfall-runoff models in order to achieve the selective infiltration between surface and groundwater masses of the same system, evaluated with the conjunctive use approach.
- Design a computational routine for obtaining an approximated numerical solution on the evaluation of nonlinear boundary conditions, presented in the river-aquifer interactions that are evaluated by integrated eigenvalues aquifer models of a conjunctive water resources system.
- Develop a routine for the inverse estimation of hydrogeological parameters of eigenvalues aquifer models, by adapting and applying the generalized uncertainty estimation methodology.

7.7. CONCLUSIONS

Particular conclusions are presented first, which refer to the results obtained in the evaluation examples for the nonlinear boundary conditions. On the other hand, the general conclusions are related to the implementation of the proposed methodology: about the conjunctive approach made, its applicability, implementation and playback of the proposed methodologies (on a generalized form), to other conjunctive

exploitation water systems and/or aquifer systems with strong surface and groundwater interactions, different from the case studies.

7.7.1. Particular conclusions

7.7.1.1. *About the aquifer cases with synthetic and real river-aquifer and spring interactions*

As particular conclusions concerning the assessment of synthetic aquifer cases, following the eigenvalues methodology, the integration of a tool to efficiently assess the nonlinear boundary conditions, like the river-aquifer interactions or the spring interactions, in terms of the eigenvalues methodology. Its application was made to the case where aquifer cells are under perfect or imperfect connection condition, through the use of corrective factors of the increase or decrease of the water level in the evaluated aquifer cells.

The proposed iterative process for the water level correction and the associated inflow or discharge flow in the drop matrix $[D_{i,j}]$, does not suppose a significant computational cost, since the recalculated process and the stored corrections for different configurations and states of connection/disconnection for the studied aquifer cells. The computational cost obtained in the simulation is considered as low, as demonstrated in the analysis results, specifically in the runtime section for the eigenvalues model, compared to the results of a similar model on finite differences in ModFlow.

The runtime of this tool is enhanced in simulations with longer time periods because the proposed formulation requires the calculation of the state vector (L_i) only once, and its corresponding correction if a new connection/disconnection appears on the evaluated aquifer cells. This improves the computing time for subsequent time steps evaluated, avoiding solving partial differential equations that require the ModFlow formulation.

The evaluation of nonlinear boundary conditions on the presented synthetic cases, have been achieved through the formulation of a correction (linear type) in terms of the eigenvalues, related to the piezometric heads, that allowed the flow interchange evaluation through the river-aquifer or spring connection, that are presented on the integrated aquifer models of conjunctive use systems with intense surface and groundwater interaction.

It was noted that the results calculated about the discharge on the spring-type cells get better the greater the detail of the discretization in those areas is (compared to the synthetic case where only one spring-type cell was used and the same cell of the previous case, but discretized in 3 cells with equivalent dimensions). Likewise, the efficiency in computing time for long term simulations was improved.

After the verification of the correct operation of the developed tool, by its implementation on the synthetic aquifer cases, two real cases were studied, where a spring discharge needed to be simulated, for an aquifer system with flow interchange between its connected masses, fisic and hydraulic connections on springs discharge zones.

On the application of linear eigenvalues formulation for the river/spring boundary conditions, of the first real case evaluated (Beniardá-Polop Aquifer, Alicante, Spain), the discharge flow and storage were quite attached to the observed values, bringing back the confirmation of the good performance of the tool developed. The mean values of the above mentioned variables were calculated with an estimate of 15% and 2% higher respectively on the eigenvalues model, regarding the observed average values.

The parameters of the aquifer model developed and calibrated were used in the analysis of joint management of the system of exploitation of the Marina Baja, along with other aquifer models of simple representation, in order to represent the entire aquifer system in the area, having as well good results on the simulation and analysis of management alternatives.

7.7.1.2. About the rainfall-runoff models of the Duero exploitation systems

The rainfall-runoff models developed for the Duero exploitation systems follow the parameters needed for HBV models, which allowed the division of the different flow components of the total runoff and from which the base flow is discounted on the sub-basins interacting with groundwater masses, in order to do not duplicate water resources on a conjunctive simulation process and assumption.

Most model parameters were obtained by averaging recorded spatially mapped parameters, for example the land use and vegetation covering map of each Duero system allowed to obtain the potential evapotranspiration value (PEV), which is a necessary data to obtain the Real Evapotranspiration (RE) monthly. Respect to the Lithology map, its use allowed to obtain the related parameters of the percolation coefficients and discharge coefficients used on each conceptual tank where the HBV model divides the flows on a basin.

The simulation results of two exploitation systems on the Duero basin (which is the main case study), are presented in Annex 1: Conjunctive discharge estimation. Other models (for different exploitation systems on the CH-Duero) were developed in the same way, in order to improve the infiltration component on the developed eigenvalues aquifer model for the tertiary Duero aquifer. As results, work memories are available for further works or research investigations.

The results of flow (annual and monthly averages) presented in Annex 1 for the Pisuega and Arlanza Exploitation Systems show variable adjustment on the objective function used by the automatic calibration, which minimizes the error of the difference between the simulated value and the observed value. The automatic calibration was performed with the SCE-UA optimization algorithm adapted in Visual Basic to run in Excel spreadsheets. As an example, for the case of the sub-calibration zone SbZ-3 (Arlanza system), the objective function value (Fobj) obtained was -0.8047; on the case of the sub-calibration zone SbZ-1 (Pisuega system), the Fobj value was -0.9175.

The proposed adaption to the rainfall-runoff models on the selective recharge evaluation from surface to groundwater masses (through the manipulation of the discharge parameters on the surface models used), avoid the duplication of resources modeled in a basin, when the conjunctive water use is assumed.

The duplication of resources may come when considering the rainfall-runoff model generates values of infiltration that later come back to the river channels (through local flow on the aquifer masses) and also considering that in the river-aquifer interactions there is always a constant flow exchange between surface and groundwater masses, which are really simulated in detail in an aquifer model, instead of a runoff-rainfall model.

Therefore, by discounting the infiltrated water on the surface masses, which must be considered on a groundwater mass, and therefore to be considered in a single aquifer model, the water volumen availability in a conjunctive system is not considered twice.

This adaptation can be extrapolated to other case studies, where an intensive water resources use is made conjunctively and/or in complex systems with conjunctive water resources use.

Finally, a commentary about the parameters of the rainfall-runoff models calibrated, which have been used on the regionalized evaluation of the climate change impact on groundwater masses of the analyzed aquifer model.

7.7.1.3. About the aplicability of the approximated numerical solution for the evaluation of nonlinear boundary conditions

Currently the development of hydrological research has focused on the development of efficient numerical techniques to run distributed-type models, based on the simplification of complex numerical models, into simpler and robust models. In the case of groundwater, the inclusion of simplified aquifer models that adequately represent the parameters and the groundflow, under conjunctive water use assumption, its simulation is achieved more efficiently than in the numeric model original, which represents a contribution and improvement in hydrological research.

The initial study of checking the proper functioning of approximate numerical solutions in synthetic cases, set the basis for the implementation of the solutions in real and more complex aquifer models (the Beniardá-Polop and Duero aquifers in Spain).

By validating the approximated numerical solutions, including aquifer models of complex schemes for conjunctive water use and its simulation, the efficient water interchange evaluation during different management alternatives within the environment of a decision making tool (AQUATOOL).

The main limitations of approximated solutions are focused on the impossibility of representing in detail the groundwater levels in extraction wells located in areas where the meshgrid used is not sufficiently detailed. For a more detailed meshgrid, this would slow the first execution

of the aquifer model, because the eigenvectors and eigenvalues matrix need to be calculated for a single time. After the first simulation, the structure of the eigenvalues technique applied to groundwater flow simulation allows that by only knowing and applying different vectors containing external actions, the aquifer response can be known. This property of the eigenvalues models gives a great advantage over models that require to read data, perform routines from zero and converge on a solution (for example, the finite differences ModFlow aquifer models), which becomes a repetitive process for each variation on external actions affecting the model.

Therefore, the advantage of the structure of the eigenvalues aquifer models, allowed them to be included in management schemes, performing multiple simulations of management scenarios, which are required to be as fast and accurate as possible, but taking into account the interaction between surface and groundwater over extended time periods.

7.7.1.4. *About the hydrogeological parameter estimation associated to generalized uncertainty*

The GLUE methodology was used to obtain the set of parameters associated with a confidence interval, which satisfies the conditions of acceptability of efficiently estimate the discharge rate on aquifer cells with river-aquifer interactions on a linear groundwater flow model, solved by the eigenvalues technique (Duero aquifer, Spain). The improvement on the parametric field estimation (conductivity and storage coefficients) was observed in the results obtained, after the application of the uncertainty estimation methodology (GLUE), new knowledge was gained about the studied aquifer and its modelation.

In this study, the GLUE methodology was used to find the set of parameters and associated uncertainty regarding groundwater flow simulation in the studied area. Some of the main points of this sections are:

- i. The results indicate that with only a few parameters, the model becomes sensitive, having a great impact on the calculation of the discharge flow.
- ii. It has been highlighted the phenomenon of "equifinality", with which, for similiar efficiency values (Nash-Sutcliffe Index), different set of parameters were obtained.
- iii. It is concluded that the uncertainty in the calculation of the discharge rate (made in multiple realizations), is mainly related to the structure of the flow pattern, but not because of the "a priori" associated distribution function for the definition of the random parameter distribution made.
- iv. This kind of uncertainty may have its origin on the simplification made to the model structure, going from a finite differences model in ModFlow, to an eigenvalues model in Aquival 2.0.

- v. The need to conduct further studies, concerning the sampling of field data (parameters) for the different areas of the studied model, that can contribute to the reduction on the associated parameter uncertainty, and also to work in a detail improvement on the structure of the flow model used.
- vi. It will be important to identify the possible causes of the observed variability in data source, compared to the simulated values.

Given this case, future studies with greater certainty in the set of parameters (becoming from field data), will help to improve the efficiency of the model, respect to the discharge calculation. It will also be necessary the identification of possible causes of variability in the discharge flow, possibly caused by the temporal variation in the water resources exploitation made on the studied aquifer and also the influence of wet and dry periods related to the recharge on the studied groundwater masses.

7.7.1.5. About the regionalized impact estimation of the climate change over the groundwater masses of the Duero River Basin

The followed methodology for the regionalized impact estimation of the climate change was based on determining different types of climate models of global circulation and the downscaling technique used to obtain a regional climate circulation model, to be used on the estimation of climate anomalies: average temperature (T_p) and precipitation (P_p).

The results of the regionalized climate anomalies for the Duero Basin show a possible increase in the annual average temperature, between 1.2°C and 5.2°C; respect to the annual average rainfall, the results show an average reduction between 28.5% and 46.1%, but their own uncertainty must be taking into a count about this results, due to the great variability of this climate variable. Once the montly anomalies were obtained, they were applied to the historical series of T_p and P_p , so new series were obtained and also introduced to the calibrated rainfall-runoff models for the different basins on the Duero exploitation system. The runoff results obtained for two different calibration sub-regions and exploitation systems of the Duero basin, showed that their long-termn contributions may be reduced by 12.9% and 34.4%.

After the simulation of the rainfall-runoff models, new recharge values for the different surface sub-regions, which interact with specific underground masses of the Duero aquifer. The results show a reduction up to 29% on the average annual recharge, when the worst CO₂ concertarion scenario is assumed (RCP-8.5), on the 2081-2100 time window (long term period). Thus, it has been possible to obtain the direct impact on the recharge assigned to the simulated masses of the eigenvalues model for the Duero aquifer, according to the analyzed climatic scenarios.

7.7.2. General conclusions

The analysis and conjunctive water resources management in complex systems attend to many complications on its development process. This work has carried out the development and implementation of a methodology that provides a guidelines for the assessment of water resources in groundwater models integrated to conjunctive use systems. Each proposed methodology section supports or uses different tools and methods, according to the needs of simulation and data availability. Once the generic integration methodology is established, the next step taken was to evaluate methods and tools on individual cases, in order to validate some of these methods and tools or in order to obtain their efficiency on the operation.

For some tools adjustments were proposed, according to the needs of the modelling focused on conjunctive use, such in the case of rainfall-runoff models of the Duero basin, with which the selective separation of contributions from the calibrated surface sub-regions that interact with specific groundwater masses.

Some secondary tools were also useful in the calibration of surface hydrological models, such in the case of the use of automatic calibration tools, with linear optimization like the SCE-UA algorithm (Shuffled Complex Evolution, an evolutionary algorithm with characteristics of genetic algorithms), which has very good results in the automatic calibration of hydrological models.

To properly evaluate the exchange of water given by the connection of surface and groundwater masses, in the context of conjunctive water use, a set of numerical approximated solutions were proposed, in order to efficiently evaluate the river-aquifer and or spring interaction on aquifer cells of a groundwater model, which are naturally presented and need to be considered in aquifer models that will be integrated in conjunctive water use systems. Such solutions propose a correction of the piezometric heads in the cells involved in a simulation with a condition of connection on the aquifer cells, by providing or removing the necessary flow in order to match the real and simulated piezometric heads in the analyzed cells, for each time step evaluated.

The numerical solutions have demonstrated its efficiency on Chapter 4 of this thesis, by measuring its efficiency and computing time respect to a similar synthetic model made on PMWIN-ModFlow and later in the evaluation of spring discharge flow becoming of a real aquifer model.

Other tools were useful for improving the automatic calibration of hydrological parameters on the analyzed aquifer model. In particular, the application of the GLUE methodology allowed to volumetrically calibrate the discharge flow of the entire aquifer system (Duero aquifer) and subsequently to improve the calibration of the respective piezometric levels.

Finally, by having calibrated the tools of surface and groundwater simulation, according to the historic operation conditions, the impact of the regional climate change was evaluated, specifically for the Duero River Basin. The analysis of the regional climate change impact was held on

the values of annual average recharge made on selected groundwater masses of the Duero aquifer, so the potential effect of regional climate change over the hydrological functioning system are determined conjunctively (determining the variation in surface contributions, aquifer recharge and operating conditions under different climate scenarios).

7.8. FUTURE RESEARCH LINES

This section summarizes the possible research lines that are considered interesting in order to improve the proposed methodology for integrating aquifer models into water systems under conjunctive use, along with research alternatives focused on conjunctive water resources management. Some of these future research lines are:

- A direct research line is the application of the proposed methodology in other real operating systems, under different conditions of interaction in their resources and the conjunctive use approach.
- The need on the use of automatic calibration algorithms for the rainfall-runoff models, in terms of the conjunctive use approach, opens a future research line regarding the implementation of optimal objective functions that consider not only the adjustment to the mean values and/or the extreme values of the historical series, but also the best way of forcing them to achieve the selective infiltration of the related sub-regions of calibration, related to the selective underground masses.
- The present investigation has not considered the effect of the approximation error made by the assessment of the nonlinear boundary conditions, given in the river-aquifer or spring interactions. It would be appropriated to carry out a study to determine the sensitivity of the aquifer model under different configurations, such as the condition of the aquifer cells evaluated.
- Another future research line that should be explored will be the implementation of a generic tool for the automatic generation and/or evaluation of hydrogeological parameters for the different aquifer models used, according to the conjunctive use approach, based on the stochastic modelling of field parameters and its associated uncertainty.

REFERENCIAS

- AEMET. 2014. Agencia Estatal de Meteorología de España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente. Fuente: Página oficial de la agencia en internet, con la liga siguiente: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_mensuales
- Álvarez-Villa, O.D. 2009. Desarrollo de una librería computacional para la estimación espacial utilizando conceptos geográficos y programación orientada a objetos espaciales. Trabajo Final de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Álvarez-Villa, O.D.; Restrepo-Tamayo, A.; Sahuquillo, A.; Cassiraga, E. 2010. Estimating groundwater parameters from hydrograph base flow records. IAHR International Groundwater Symposium. Valencia, Spain.
- Álvarez-Villa, O.D. 2014. Simulación eficiente de las relaciones río-acuífero en sistemas de utilización conjunta mediante técnicas de reducción de modelos lineales invariantes en el tiempo. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Andreu, J.; Segura, J. 1983. El Modelo USOCON de simulación de utilización conjunta de una cuenca. Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia. C-2. España.
- Andreu, J.; Sahuquillo, A. 1987. Aplicación del método de los Autovalores al análisis de sistemas con uso conjunto de recursos hídricos superficiales y subterráneos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Andreu, J. 1992. Modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos. Manual de usuario. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. SPUPV-92.2012.
- Andreu, J.; Capilla, J.; Sanchís, E. 1996. AQUATOOL: A generalized decision support system for water resources planning and management. *Journal of Hydrology*. 177,269-291. doi: 10.1016/0022-1694(95)02963-X.

- Andreu, J.; Solera, A.; Capilla, J.; Ferrer, J. 2007. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- AQUATOOL, 2006. Andreu, J.; Capilla, J.; Sanchiz, E. A generalized decision-support system for water resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*. 37pp. Valencia, Spain.
- AQUIVAL 2.0. 2011. Módulo para resolver no linealidades en modelos de acuífero con interacción de uso conjunto usando la metodología de Autovalores. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. http://www.upv.es/aquatool/docs/ManualUsuario_Aquival2.pdf.
- Bear, J. 1979. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications Inc. New York, EEUU.
- Beven, K.J.; Binley, A.M. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*. 6, 279-298p.
- Beven, K.J.; Freer, J. 2001. Equifinality, data assimilation and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems. *Hydrological Processes*. 9, 149-168p.
- Bergström, S.; Forsman, A. 1973. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic Hydrology*. 4, 147-170.
- Bergström, S. 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, SMHI RHO 7. Norrköping, Sweden. 134pp.
- Bergström, S. 1995. The HBV model, computer models of watershed hydrology (editor: V.p.singh). Water Resources Publication.
- Birtles, A.B.; Reeves, M.J. 1977. A simple method for the computer simulation of groundwater and its application in the design of water resources system. *Journal of Hydrology*, 34, 77-96.
- Buras, N. 1963. Conjunctive operation of dams and aquifers. *ASCE, Journal of Hydraulic Division*. 89, 111-131.
- Caballero, H. 2005. La cuenca del Duero: Usos del agua, problemas y retos. DMA Informe 2005. Memoria Confederación Hidrográfica del Duero 2004-2005. España.
- Camacho, L.A.; Less, M.J. 2000. Modelación del transporte de solutos en ríos bajo condiciones de flujo no permanente: un modelo conceptual integrado. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina.
- Cancelliere, A.; Di Mauro, G.; Bonaccorso, B.; Rossi, G. 2007. Drought forecasting using the Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management*. 21(5), 801-819.
- Cantor, M. 2006. Caracterización y modelación hidráulica en un tramo del Río Teusacá utilizando experimentos con trazadores. Proyecto de Grado Ing. Civil. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

- CHD. Confederación hidrográfica del Duero. 2010. Memoria del Proyecto del Plan Hidrológico de Cuenca. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. España.
- CHD. Confederación hidrográfica del Duero. 2010. Memoria del proyecto de Plan Hidrológico de Cuenca. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. España.
- CHD. Confederación hidrográfica del Duero. 2014. Extracto informativo de página oficial de la CH-Duero. Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. España. <http://www.chduero.es/>.
- Cotler, H. 2004. El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Das, T.; Bárdossy, A.; Zehe, E. 2006. Influence of spatial variability of precipitation on distributed rainfall-runoff modeling. IAHS Publicaation 303: Promise and Progress (Editors: M. Sivapalan, T. Wagener, S. Uhlenbrook, E. Zehe, V. Lakshmi, X. Liang, Y. Tachikawa and P. Kumar). 134pp.
- Davison, E.J. 1966. A method for simplifying linear dynamics systems. IEEE Transactions on Automatic Control. 11(1), 93-101. doi: 10.1109/TAC.1966.1098264.
- Dodge, P. 1973. An introduction to system analysis. Theoretical and methodological problems of terminology. Union of International Associations. Brussels.
- Ehret, U. 2002. Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar. Doctoral Thesis. Institute of Hydraulic Engineering. University of Stuttgart. Germany.
- ENSEMBLES. 2009. A new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions. Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs. Geophysical Research Letters. Volumen 36, Issue 21. Doi: 10.1029/2009GL04896.
- EPTISA, 2006. Servicios de Ingeniería S.A. Trabajo de consultoría y asistencia para la confederación Hidrográfica del Duero. Estudio de modelización hidrogeológica esquemática de la cuenca del Duero. Memoria de Estudio. España.
- Estrela, 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. España.
- EVALHID. Paredes, J.; Solera, A.; Andreu, J.; Lerma, N. 2012. Manual técnico de EVALHID para la evaluación de recursos hídricos. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. http://www.upv.es/aquatoool/docs/ManualTecnico_EVALHID.pdf.
- FONAM. 2005. Fondo Nacional del Medio Ambiente del Perú. ¿Qué es el cambio climático?
- Fowler, F. 1981. Case Study U.S.A. Santa Clara Valley District. NATO, Advanced Study Institute. Operation of Complex Water Resources Systems. Erice, Italy.

- Freer, J.; Quilbé, R.; Rousseau, A.N. 1996. GIBSI: an integrated modeling system for watershed management. Sample Applications and current developments. *Hydrological Earth Systems Science*. 11, 1785-1795. Doi: 10.5194/hess-11-1785-2997.
- Goerlick, S.M. 1983. A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. *Water Resources Research*. 19(2), 79-95. doi:10.1029/WJR019i002p00305.
- Haimés, Y.Y. 1977. *Heirarchical Analysis of Water Resources Systems: Modeling and Optimization of Large Scale Systems*. McGraw-Hill International Book Company. New York, EEUU.
- Hall, W.A.; Dracup, J.A. 1970. *Water Resources Systems Engineering*. McGraw-Hill. New York, EEUU.
- Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering Agriculture*. 1(2), 96-99pp.
- Haro, D. 2014. *Methodology for the optimal management design of water resources system under hydrologic uncertainty*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- HBV. 1987. *Modelo Hidrológico Conceptual*. Organización Meteorológica Mundial. Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología. Suecia.
- Hernández, M.A.; Solera, A.; Nowak, W. 2014. *Conjunctive water resources management contribution: implementation of a random-parameters groundwater model, coupling surface water and groundwater*. II Iberic Congress on Groundwater. Valencia, Spain.
- Hernández-Barrios, L. 2007. *Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Hernández-Bedolla, J. 2011. *Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos*. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México.
- Herrera C.M.; Pozo, M.I.; Bazaga, P. 2012. Jack of all nectars, master of most. The epigenetic basis of a niche width in yeast. *Journal of Ecology*. 21, 2602-2616.
- Howe, J.; White, I.; Metz, B. 2005. The relationships between planning and flood risks management in the UK. *Planning Practice and Research*. 19, 4, 415-425pp.
- Hundecha, Y.; Bárdosy, A. 2004. Modeling of the effect of land use changes on the runoff of a hydrological model: Comparison of linear regresion models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology*. 292, 281-295.
- Iglesias, L.A. 1984. *Métodos teórico-prácticos para la realización de ensayos de bombeo*. Apuntes del Curso de Hidrogeología. Noel Llopis. 1977.
- IGME. 2006. Instituto Geológico y Minero de España. *Memoria de Actividades 2006*. Ministerio de Economía y Competitividad. España.

Tesis Doctoral

- <http://www.igme.es/actividadesIGME/memorias/MEMORIA%20DEL%20IGME%202011.pdf>.
- IPCC4. 2006. Informe especial de Escenarios de Emisiones del IPCC para Responsables de Políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. ISBN: 92-9169-413-1.
- Jiménez, C. 2011. Análisis del balance de recursos hídricos en el acuífero terciario de la cuenca del Duero. Trabajo Final de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Lenhart, T.; Eckhardt, K.; Fohrer, N.; Frede, H.G. 2007. Comparison of two different approaches of sensitive analysis. *Physical Chemistry Earth*. 27, 645-654.
- Lindenschmidt, K.E.; Fleischbein, K.; Baborowski, M. 2007. Structural uncertainty in a river water quality modeling system. *Ecological Modeling*. 204, 645-654.
- López, J. 1993. Restitución de datos de aforo en régimen natural. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. Editorial CIMNE. Barcelona, España.
- LU-Decomposition. 1975. Householder, Alston S. *The Theory of Matrices in Numerical Analysis*. Dover Publications. New York.
- Maddock, T. 1972. Algebraic technological function from a simulation model. *Water Resources Research*. 8(1), 129-134. doi:10.1029/WR008i001p00129.
- MATLAB-R2012a. Programa de evaluación y programación en lenguaje M. Matrix Laboratory. Versión 2012. U.S.A.
- McDonald, M.G.; Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Open-File Report 83-875. U.S. Geological Survey, 586p. <http://pubs.er.usgs.gov/usgspubs/twri/twri06A1>.
- METEO, 2015. Predicción estacional. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. España. http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/prediccion_estacional.
- Morel-Seytoux, H.J.; Daly, G.J. 1975. A discrete kernel generator for stream-aquifer studies. *Water Resources Research*. 11(2), 235-260. doi: 10.1029/WR011i002p00253.
- Nandakumar, N.; Mein, R.G. 1997. Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change. *Journal of Hydrology*. 192, 211-232.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3), 282-290.
- Paredes, J.; Solera, A.; Andreu, J. 2010. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Capítulo de Integración en modelos de simulación. Publicación del Instituto Geológico y Minero (IGME). 11, 267-294. Madrid, España.
- PHJ. 2007. Plan Hidrológico de Cuenca 2009-2015. Confederación Hidrográfica del Júcar. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. España. <http://www.chj.es/es->

- es/medioambiente/planificacionhidrologica/Paginas/PHC-2009-2015-Plan-Hidrologico-cuenca.aspx..
- Pérez, M.A. 2005. Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico y calidad del agua, integrado en sistemas de información geográfica, para grandes cuencas. Apotación al análisis de presiones e impactos de la directiva marco del agua. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Pérez, M.A. 2012. Evaluación del impacto del cambio climático sobre los sistemas de recursos hídricos. Compilación documental de la materia del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medioambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- PRUDENCE. 2004. Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects. Fifth Framework Programme. United Nations. <http://prudence.dmi.dk/>.
- Pulido-Velázquez, D. 2005. Solución de no Linealidades en la Aplicación del Método de Autovalores para la Simulación de Sistemas de Uso Conjunto. Extensión a acuíferos no confinados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Pulido-Velázquez, M.; Sahuquillo, A.; Ochoa-Rivera, J.C.; Pulido-Velázquez, D. 2005. Modeling of stream-aquifer interaction: the embedded multireservoir model. *Journal of Hydrology*. 313, 166-181. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.026.
- Pulido-Velázquez, D.; Sahuquillo, A.; Pulido-Velázquez, M. 2007. An efficient conceptual model to simulate water body-aquifer interaction in conjunctive use management models. *Water Resources Research*. 43, W07407. doi: 10.1029/2006WR005064.
- Pulido-Velázquez, D.; Alfred, D.; Andreu, J.; Sahuquillo, A. 2008. Reducing the computational cost of unconfined groundwater flow in conjunctive use models at basin scale assuming linear behavior: the case of Adra-Campo de Dalfías. *Journal of hydrology*. 353, 159-174. doi: 10.1016(j.jhydrol.2008.02006.
- Pulido-Velázquez, D.; Andreu, J.; Sahuquillo, A. 2009. Treatment on non-linear boundary conditions in groundwater modeling with eigenvalue methods. *Journal of Hydrology*. 368, 194-204. doi: 10.1016/j.hydrol.2009.02.002.
- RCP-IPCC5, 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. Scenario Process for AR5. Representative Concentration Pathways (RCPs). Data United Nations for Environmental Protection. Distribution Centre. http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html.
- Ramos, F.; Ferrer, J.; Sahuquillo, A. 1983. Determinación de Autovalores y autofunciones de acuíferos relacionados con ríos. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Madrid, España.
- Rivera, A.; Sahuquillo, A.; Andreu, J.; Mukherji, A. 2002. Opportunities of conjunctive use of groundwater and surface water. *Groundwater Intensive Use*. 371-383. A.A. Balkema Publishers. London, United Kingdom. doi: 10.1201/9781439833629.ch31.

- Rodríguez, I. 2004. Tesis doctoral: Sensibilidad de los sistemas de explotación de recursos hídricos frente al cambio climático en España. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Rosso, R. 1994. An introduction to spatially distributed modeling of basin response. *Advances in Distributed Hydrology*. (edited by Rosso, R., Peano, A., Becchi, I., Bemporad, G.A. Water Resources Publications. Fort Collins. 3-30.
- Sahuquillo, A. 1983a. An eigenvalue numerical technique for solving unsteady groundwater continuously in time. *Water Resources Research*, 19(1), 87-93.
- Sahuquillo, A. 1983b. Modelos pluricelulares englobados. Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia. B-4. España.
- Sahuquillo, A. 1991. simulación de acuíferos en modelos de gestión. *Conceptos y Métodos para la Planificación Hidrológica*. Andreu, J. (editor). Editorial CIMNE. Barcelona, p. 69-74.
- Sahuquillo, A. 2007. Conjunctive use of Surface water and groundwater. *Groundwater*. 3,206-224. Silveira, L., Usunoff, E. (Eds.) UNESCO, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Eolss Publishers Co. Ltd. Oxford, United Kingdom.
- Sahuquillo, A.; Cassiraga, E. 2010a. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Capítulo de Introducción. Publicación del Instituto Geológico y Minero (IGME). 1, 1-52. Madrid, España.
- Sahuquillo, A.; Cassiraga, E. 2010b. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Capítulo de Relaciones río-acuífero. Publicación del Instituto Geológico y Minero (IGME). 1, 53-88. Madrid, España.
- Sahuquillo, A.; Cassiraga, E. 2010c. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Capítulo de Modelos lineales. Publicación del Instituto Geológico y Minero (IGME). 2, 151-196. Madrid, España.
- SCE-UA. Duan, Q. 1992. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*. 158(3-4), 265-284.
- Schwarz, J. 1971. Linear models for groundwater management. *International Postgraduate Course in Management of Water Resources*, Technion (Israel Institute of Technology).
- Schwarz, J. 1976. Linear models for groundwater management. *Journal of Hydrology*. 28, 377-392.
- Schwarz, J. 1980. A systems approach to the strategy of integrated management of surface and groundwater resources. *Water quality management under conditions of scarcity, Israel as a case study*. Shuval, H. I. (Ed.). Academic Press. Israel.
- SIMGES, 2007. Manual de usuario SIMGES. Modelo de simulación de la gestión y el manejo hídrico, incluyendo el uso conjunto del agua

- superficial y subterránea. IIAMA. 106pp. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Simonovic, S.P. 2000. Tools for water management. One view of the future.
- SIMPA, 1996. Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación, SIMPA. Revista de Ingeniería Civil, No. 104, 43-52p. CEDEX. Ministro de Fomento. España.
- Solera, A. 2003. Tesis doctoral. Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistémica de recursos hídricos. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Solera, A.; Paredes, J.; Andreu, J. 2010. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Capítulo de Datos Hidrológicos. Publicación del Instituto Geológico y Minero (IGME). 4, 97-123. Madrid, España.
- Sordo, G. 2006. Economic control of quality manufactured products. Process Design for Results. New York. McGraw-Hill.
- Sudheer, K.P.; Lakshmi, G.; Chaubey, I. 2011. Application of a pseudo simulator to evaluate the sensitivity of parameters in complex watershed models. Environmental Modeling Software. 26, 135-143.
- Toledo, V.M. 1999. Hacia una modernidad alternativa: globalización, neoliberalismo y desarrollo sustentable. 118p. México, D.F.
- Torres, J.A.; Ordoñez, J.I.; Duque, R. 2012. Análisis de incertidumbre del tiempo de concentración en la modelación de eventos de tormenta en la cuenca alta del Río Magdalena. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica.
- Van, G.A.; Meixner, T.; Srinivasan, R.; Grunwals, S. 2008. Fit-for-purpose analysis of uncertainty using Split-sampling evaluations. Hydrological Science Journal. 53, 1325-1349.
- Vargas, J. 2003. Agua en espacios naturales: impacto y modelación. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. 92pp. Concepción, Uruguay.
- Velázquez, R.F.; Beven, K.; Feyen, J. 2009. GLUE based assessment on the overall predictions of a MIKE SHE application. Water Resources Management. 23, 1325-1349.
- Vrugt, J.A.; Gupta, H.V.; Bouten, W.; Sorooshian, S. 2003. Ashuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resources Research. 39, 1201-1216.
- Xuan, Y.; Cluckie, I.D.; Wang, Y. 2009. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilizing short.range rainfall predictions. Hydrological Earth Systems Science. 13, 293-303. Doi: 10.5194/hess-13-293-2009.
- Yeh, W. 1985. Reservoirs management and operation models: a state-of-the-art review. Water Resources Research. 21(12), 1797-1818.
- Zacharias, I.; Dimitrio, E.; Koussouris, T. 2005. Integrated water management scenarios for wetland protection: application in Trichonis Lake. Environmental Modelling Software. 20, 177-185.

ANEJOS

"No basta tener un buen ingenio, lo principal es aplicarlo bien".

René Descartes.

ANEJO 1. ESTIMACIÓN CONJUNTA DE APORTACIONES

En este anejo se ejemplifican las calibraciones de los modelos de aportaciones superficiales para dos sistemas de explotación del Duero (Sistemas Arlanza y Pisuerga, CH-Duero, España), realizados en la herramienta EVALHID, con el modelo lluvia-escorrentía de tipo HBV.

1.1. INTRODUCCIÓN

Puesto que el objetivo de la evaluación de recursos hídricos de un sistema es determinar, en los puntos de interés, la cantidad de recurso hídrico y su distribución en el tiempo, el uso de herramientas de modelización es necesario (Estrela, 1992). Estas herramientas son usadas para generar series de aportaciones en puntos no aforados, a partir de series meteorológicas y estimar los distintos términos de la ecuación de balance hídrico a una escala temporal adoptada (Estrela, 1992).

El trabajo que se presenta emplea un modelo matemático determinista y agregado, desarrollado con la herramienta EVALHID (2012) integrada en el Sistema Soporte de ayuda a la Decisión (SSD) AQUATOOL (Andreu et al, 1996).

Este tipo de modelo se basan en el establecimiento del balance de humedad entre las distintas zonas de almacenamiento consideradas y en las leyes de conexión entre ellas. Tal y como detalla Estrela (1992) en los modelos deterministas las variables viene dadas por leyes físicas (empíricas, conceptuales o teóricas) que explican toda su variabilidad. A su vez, los modelos agregados consideran la cuenca de forma global, donde las variables de entrada (precipitación, temperatura, etc) y los parámetros (capacidad de almacenamiento, coeficientes de descarga etc) son promediados en el espacio, obteniendo un valor medio para toda la cuenca analizada y para cada intervalo temporal considerado. La salida de este tipo de modelos se simula en un único punto de la red fluvial, un punto de salida de interés.

Los sistemas de explotación Arlanza y Pisuerga (Figura A1.1) se han subdividido en 44 y 55 sub-cuencas respectivamente, de acuerdo con la definición de las masas de agua realizada en el ámbito de la

Demarcación Hidrográfica del Duero (España). Dicha discretización puede ser modificada en base a la disponibilidad de información y los objetivos de simulación perseguidos.

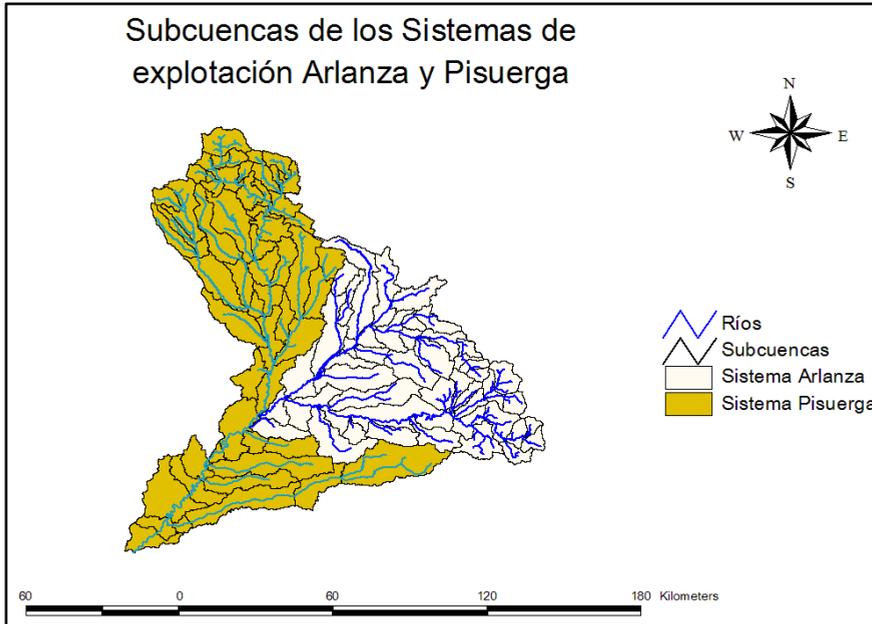
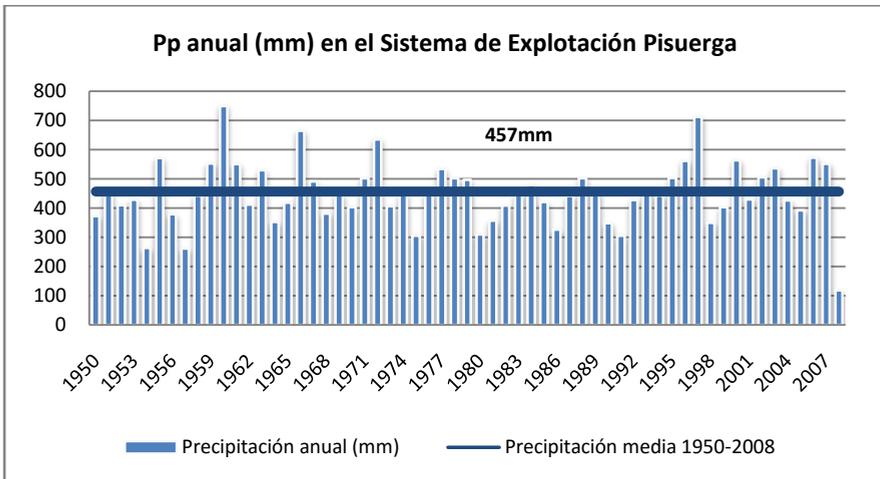
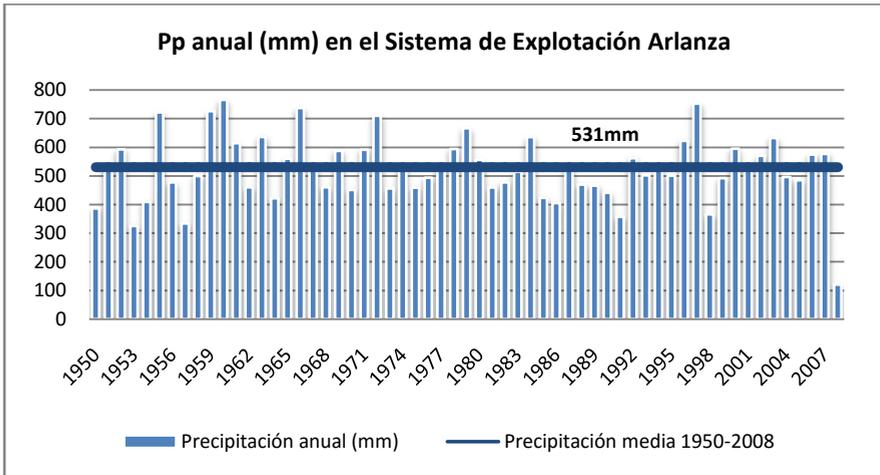


Figura A1.1. Sistemas de explotación analizados dentro de la CH-Duero.
Fuente: Elaboración propia.

1.2. DISPONIBILIDAD DE DATOS

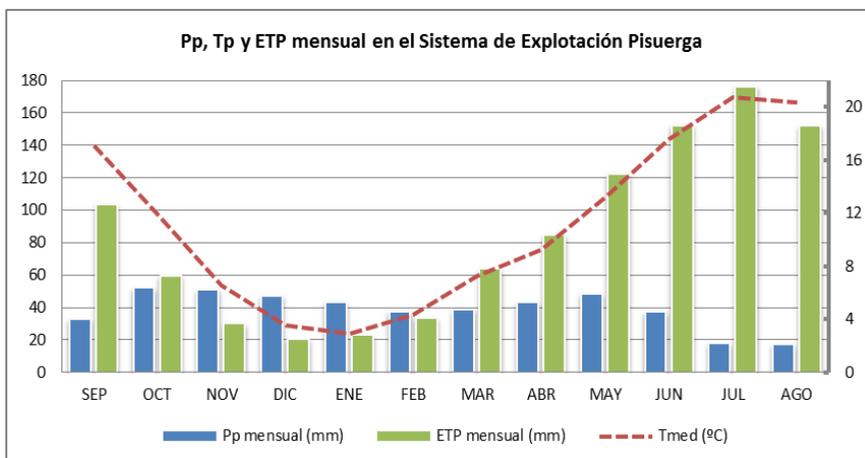
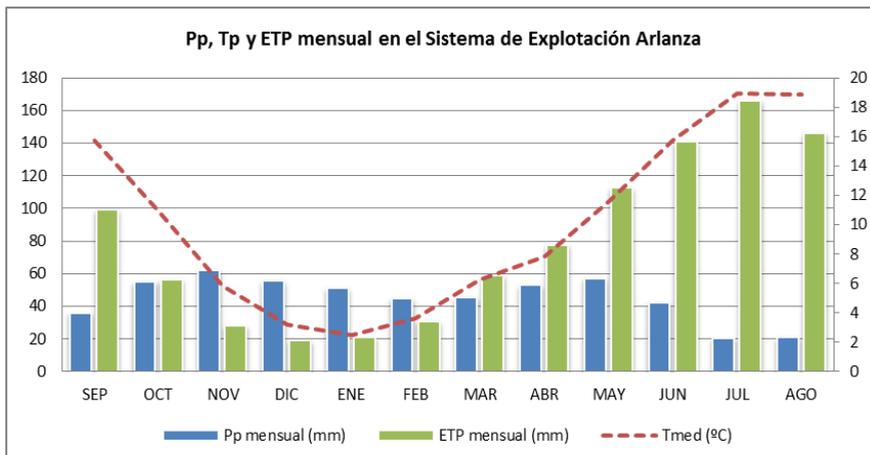
La modelización se realiza dividiendo los sistemas de explotación analizados en sub-cuencas y para cada una es necesario disponer de datos de series temporales de precipitación (P_p), temperatura (T_p), evapotranspiración potencial (ETP) y el valor de la superficie de la misma (A). Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer además, de series temporales de la temperatura del aire. En general, se necesita disponer de datos aforados (Q_a) o restituidos (Q_r) a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo.

Las series históricas de precipitación y temperatura de los sistemas de explotación analizados son obtenidas a partir de la base de datos Spain02 (Herrera et al, 2012), formada por una rejilla aproximada de 20 km^2 , que abarca la superficie de España. En ella se pueden consultar datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones tanto a escala diaria como con agregación mensual, para el periodo 1950-2008. En la Figura A1.2 son mostradas las series de precipitación anual y su media para el período 1950-2008, de los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuegra respectivamente, obtenidos de la base de datos SPAIN02.



Figuras A1.2a y A1.2b. Series de precipitación anual (mm) para los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura A1.3 se muestran los valores del año medio para las variables Pp, Tp y ETP en los Sistemas Arlanza y Pisuerga. El valor de la ETP es obtenido mediante la metodología de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985). Adicionalmente, en la Tabla A1.1 se presentan los valores medios de Pp, Tp y ETP para los sistemas analizados.



Figuras A1.3a y A1.3b. Año medio de las variables Pp, Tp y ETP para el Sistema de Explotación Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.

Tabla A1.1. Valores medios mensuales y anuales de las variables climáticas de los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuerga.

Fuente: CHD, 2010.

Mes	Sistema Explotación Pisuerga			Sistema Explotación Arlanza		
	Pp (mm)	Tp (°C)	ETP (mm)	Pp (mm)	Tp (°C)	ETP (mm)
SEP	32.86	17.13	103.44	35.98	15.77	99.07
OCT	52.03	11.96	59.71	54.98	10.94	56.25
NOV	51.29	6.56	29.98	62.28	5.85	27.93
DIC	47.31	3.55	20.38	55.54	3.21	18.91

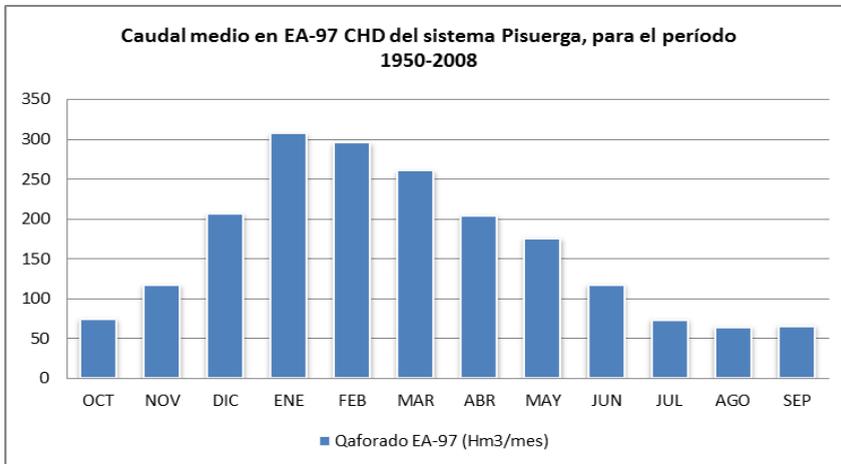
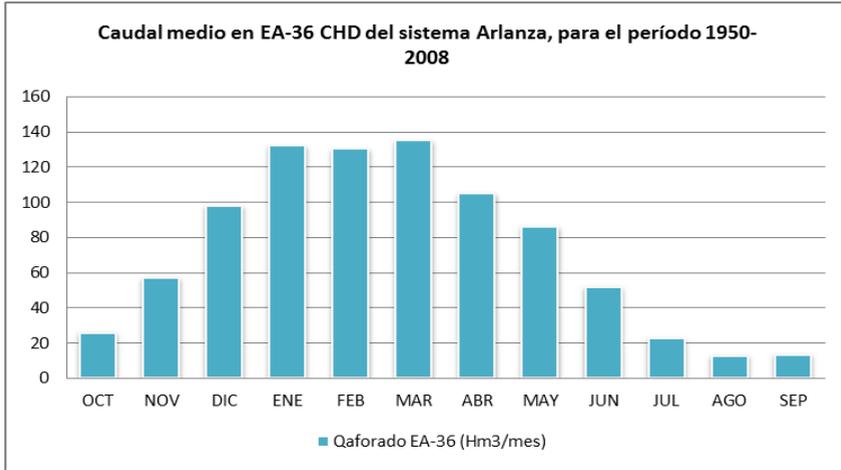
Tesis Doctoral						
ENE	43.52	2.95	22.86	51.08	2.47	21.12
FEB	37.62	4.35	33.66	44.56	3.61	30.88
MAR	38.63	7.31	63.69	45.61	6.23	58.91
ABR	43.19	9.23	84.94	52.77	7.85	77.68
MAY	48.48	13.18	122.54	56.97	11.60	112.39
JUN	37.16	17.55	152.34	42.02	15.72	140.72
JUL	17.74	20.71	176.40	20.11	18.96	166.15
AGO	17.31	20.38	151.93	20.88	18.86	146.34
ANUAL:	467.15	11.24	1021.85	542.77	10.09	956.36

Por otro lado, en la fase de calibración de los modelos hidrológicos, son utilizados los datos disponibles de caudal observado (Qobs) en la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA), los registros de embalses y datos de aforos de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD, 2010). Los datos están a escala mensual, con el objeto de obtener series de aportación que alimenten un modelo de gestión de recursos hídricos de escala temporal mensual también.

No se dispone de las series de aportaciones en régimen natural totales de los sistemas de explotación analizados como dato medido, puesto que se considera la existencia de un régimen alterado por la regulación y explotación de las cuencas que componen los sistemas (Solera et al., 2010). Por tanto, es necesario realizar la restitución a régimen natural, salvo para las cuencas de cabecera, donde se considera que los consumos aguas arriba de las estaciones de aforo son muy bajos. La aportación media estimada para los sistemas de explotación analizados es de $884\text{hm}^3/\text{año}$ para el sistema Arlanza y de $1179\text{hm}^3/\text{año}$ para el sistema Pisuerga. Su distribución media mensual se presenta en la Figura A1.4, junto con los valores mensuales y totales de aportación en la Tabla A1.2.

Tabla A1.2. Caudal medio mensual (hm^3/mes) en Estaciones de Aforo EA-36 y EA-97 de los Sistemas de Explotación Arlanza y Pisuerga. Fuente: CHD, 2010.

MES	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
Arlanza EA-97	26.1	57.3	98.6	132.6	130.9	135.7	105.5	86.7	52.2	22.8	13.1	13.6	883.6
Pisuerga EA-365.	75.0	117.5	207.2	308.0	296.5	261.3	205.2	176.5	118.1	74.3	65.0	66.6	1979.0



Figuras A1.4a y A1.4b. Caudal aforado medio mensual (hm^3/mes) en la salida de los sistemas de explotación Arlanza y Pisuegra. Fuente: CDH, 2010.

1.3. SELECCIÓN DEL MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA

Para lograr la evaluación hidrológica superficial es necesario elegir un modelo lluvia-escorrentía que mejor caracterice las sub-cuencas analizadas de los sistemas de explotación, encontrando los valores de los parámetros del modelo que mejor representen el comportamiento de las sub-cuencas. A su vez, la discretización temporal vendrá dada en parte por el tipo de modelo usado.

Si la información de entrada está en escala mensual, resulta más apropiado recurrir a modelos de pocos parámetros, como los modelos de Témez y HBV (2012). En cambio, si la simulación es a escala diaria, es preferible recurrir a modelos de mayor detalle en los procesos y por tanto, con mayor número de parámetros. Para este caso, es recomendable el uso de modelos tipo HBV y Sacramento.

El modelo hidrológico HBV permite validar los volúmenes de recarga asignados al modelo de acuífero por Autovalores del Duero, mediante el análisis de recarga por masas subterráneas subyacentes a los modelos de cuenca. El modelo HBV fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) por Bergström (1976, 1995) y actualmente es utilizada la versión modificada por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Stuttgart, Alemania (Lindström, 1997; Hundedcha y Bárdosy, 2004; Ehret, 2002; Das et al., 2006).

El modelo es de tipo conceptual y agregado, comúnmente utilizado en estudios de balance hídrico y para previsiones hidrológicas, abarcando los procesos más importantes de generación de escorrentía, con una estructura simple pero robusta, así como un pequeño número de parámetros. Se trata de un modelo hidrológico (Figura A1.5) compuesto por cuatro módulos principales: (i) fusión y acumulación de nieve, (ii) humedad del suelo y precipitación efectiva, (iii) evapotranspiración y (iv) estimación de escorrentía. La ejecución puede ser a escala temporal diaria o mensual, utilizando datos de entrada básicos como precipitación y temperatura observadas, así como evapotranspiración potencial.

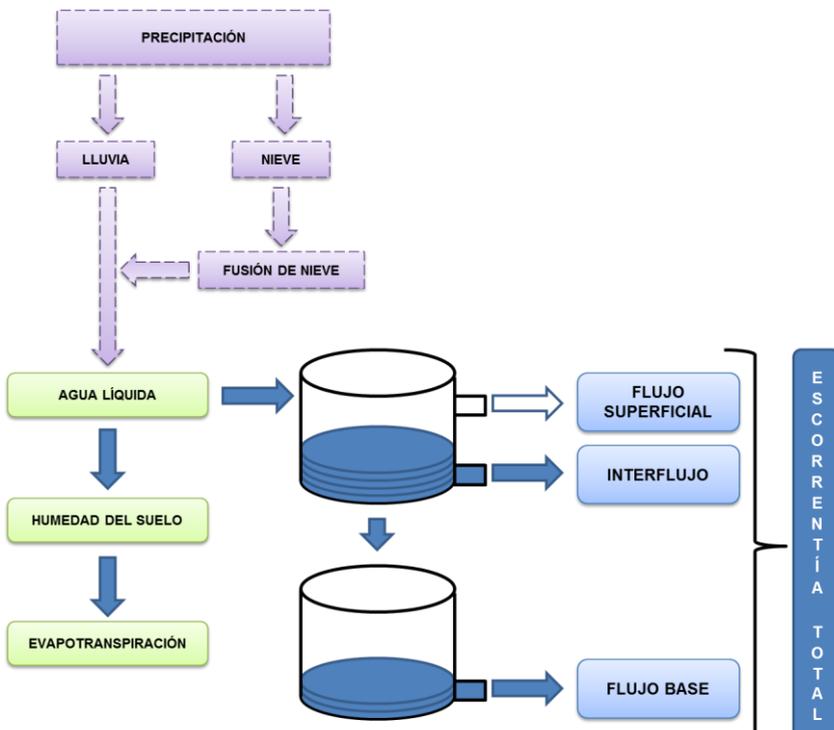


Figura A1.5. Esquema general del modelo HBV usado en la herramienta EVALHID. Fuente: Modificado del manual técnico de EVALHID V1.0.

Los principales procesos simulados se muestran en la Figura A1.5, destacando que la salida principal del modelo (la escorrentía total para

un punto de desagüe), consta de tres componentes: (i) la escorrentía superficial, (ii) el interflujo y (iii) el flujo base (considerado como la contribución al flujo subterráneo, el cual es separado de las aportaciones superficiales y considerado en las recargas subterráneas).

Para el análisis de las sub-cuencas de los sistemas de explotación Arlanza y Pisuerga, se ha escogido el modelo HBV (Bergström y Forsman, 1973), que consta de ocho parámetros y cuatro variables de estado (Figura A1.6) y considera como almacenamientos intermedios la humedad del suelo, el volumen almacenado en un depósito superior y el volumen almacenado en un depósito inferior o acuífero. Como flujos intermedios aparecen la infiltración o recarga y la percolación.

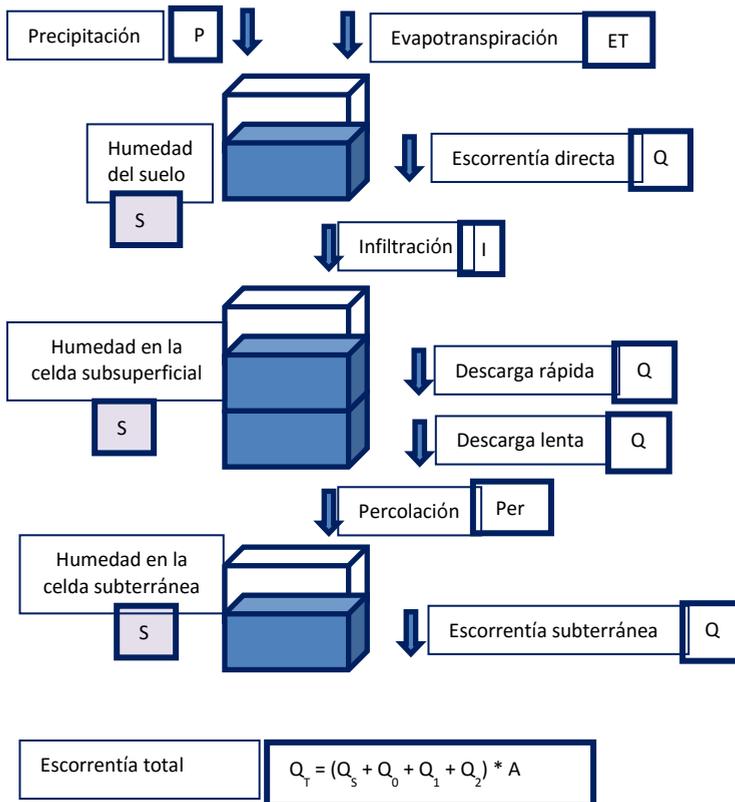


Figura A1.6. Esquema del funcionamiento del modelo HBV a partir de un sistema de tanques. Fuente: Tomada del Manual Técnico de EVALHID V1.0.

En la Figura A1.6, se muestran los procesos generales de la versión modificada del modelo HBV que es utilizada en el módulo EVALHID. Se incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que

contribuye a la escorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse, siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es la escorrentía total en el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escorrentía superficial, interflujo y flujo base (esta última como la contribución del flujo subterráneo).

La Tabla A1.4 muestra un resumen de los parámetros del modelo. Dentro de estos, es necesario definir las condiciones iniciales: (i) la humedad inicial del suelo (SM_0), (ii) los almacenamientos iniciales de ambos tanques ($S1_0$ y $S2_0$) y si es necesario, (iii) los parámetros del modelo acoplado de producción de escorrentía nival (TT y DD).

Tabla A1.4. Parámetros del modelo lluvia-escorrentía HBV y del modelo acoplado de nieve en el módulo de evaluación de recursos hídricos EVALHID. Fuente: Manual Técnico de Evalhid V1.0.

Zona	Parámetro	Descripción	Unidades	Rango
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm	50-1000
	β	Coefficiente de forma para la infiltración	-	1.0 - 3.0
	PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm	20 - 800
Celda Subsuperf.	Lmax	Umbral de descarga rápida (tanque superior)	mm	5 - 50
	K0	Coefficiente de descarga rápida (tanque superior)	día-1	0.10 - 0.50
	K1	Coefficiente de recesión (tanque superior)	día-1	0.01 - 0.40
Celda Profunda	Kperc	Coefficiente de percolación	día-1	0.01 - 0.50
	K2	Coefficiente de recesión (tanque inferior)	día-1	0.01 - 0.10
Celda de Nieve	TT	Umbral de temperatura máxima	°C	-2.0 - 2.0
	DD	Factor grado-día	mm/°C*t	0 - 100

1.4. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS SEGÚN LITOLOGÍA Y USOS DEL SUELO EN LAS SUB-CUENCAS DE ESTUDIO

Los parámetros a considerar en la fase de calibración de las sub-cuencas analizadas pueden variar dentro de un rango, de acuerdo con los usos del suelo y la litología. En el caso de la ETP, ésta puede ser corregida según los tipos de cultivo predominantes, mediante coeficientes orientativos. Dado que en las sub-cuencas delimitadas en cada sistema de explotación existirá una combinación de usos del suelo y litologías, los parámetros a utilizar en el modelo EVALHID variarán, según la información y el detalle con que se cuente. De esta forma, podemos acotar los valores de los parámetros en cada sub-cuenca, de acuerdo al uso del suelo y litología predominantes. En las Figuras A1.7 y A1.8 se muestra la distribución espacial del uso del suelo y litología en los sistemas de explotación de Arlanza y Pisuegra.

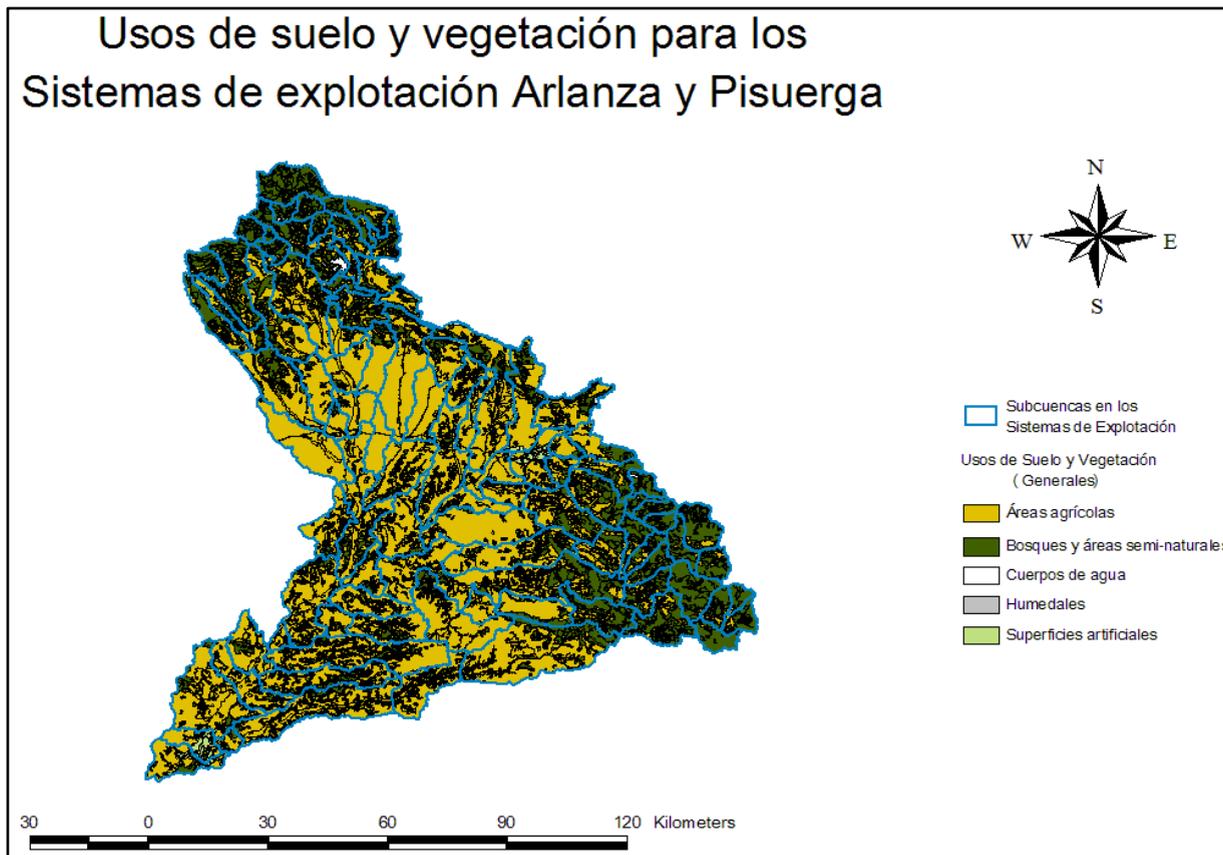


Figura A1.7. Uso del suelo en los sistemas de explotación Arlanza y Pisuegra (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.

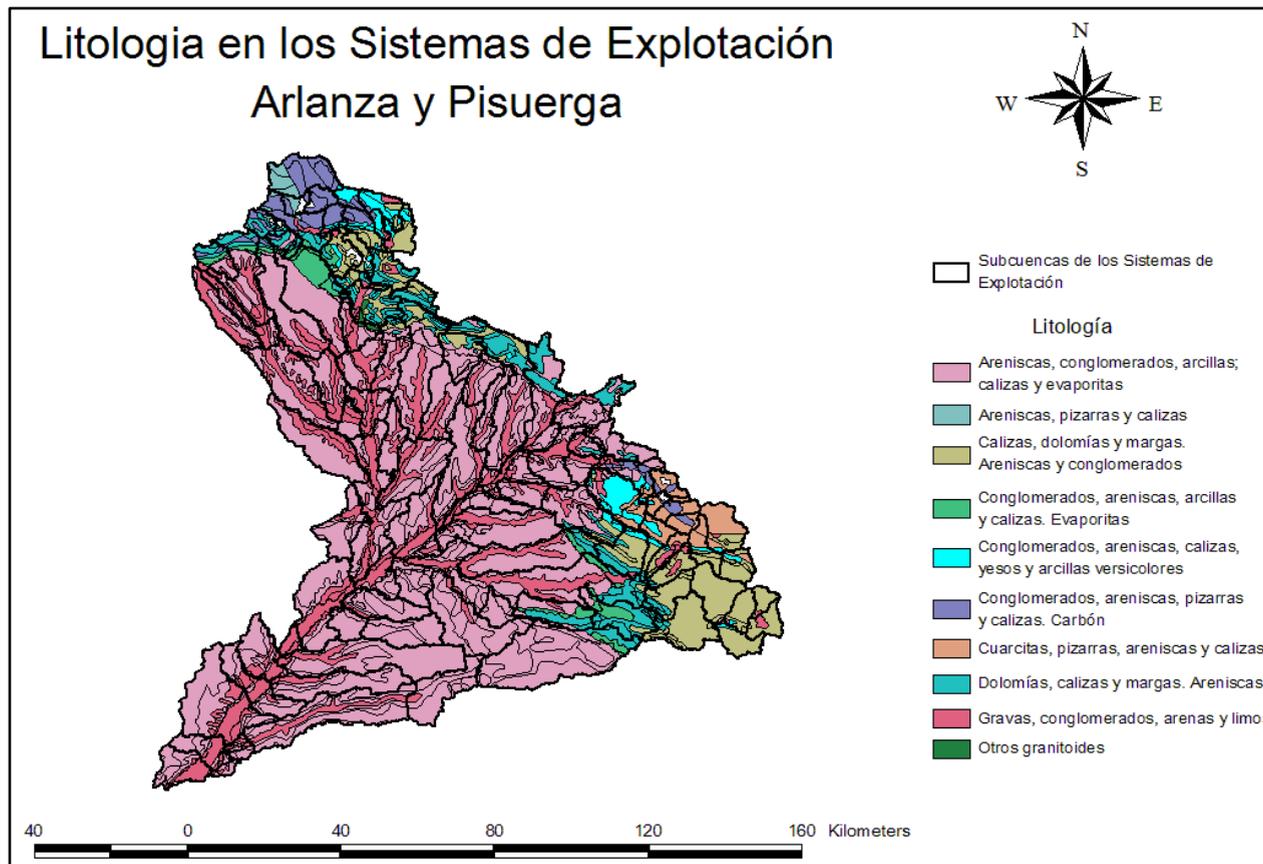


Figura A1.8. Litología en los sistemas de explotación Arlanza y Pisuergra (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.

1.5. CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS

La calibración de un modelo es la etapa del proceso de modelización en la que se busca que el modelo reproduzca la historia del sistema y se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato (Estrela, 1992).

Para la calibración de los parámetros de los modelos de sub-cuenca se ha utilizado una aplicación maestra que obtiene los parámetros que mejor ajustan los caudales circulantes en las estaciones de aforo, haciendo uso del módulo de evaluación de recursos. Se ha empleado una adaptación a Visual Basic del algoritmo SCE-UA (Duan, 1992) que permite importar los resultados de las aportaciones de EVALHID para compararlos con las series de aportaciones observadas y evaluar una función objetivo (F_{ob}). Esta F_{ob} representa una medida numérica de la diferencia entre la respuesta simulada por el modelo EVALHID y la respuesta observada en la cuenca (aforos).

El procedimiento habitual sería utilizar la serie histórica de aportaciones restituida a régimen natural para el periodo analizado (1950-2008). Esta restitución no se encuentra disponible para todos los puntos de control, por lo que se realizan dos procedimientos:

- i. Se recurre a la comparación directa con los caudales aforados en las estaciones de cabecera.
- ii. Para las estaciones ubicadas aguas abajo, influenciadas por la gestión del sistema, se recurre a un modelo de simulación de la gestión (SIMGES), que compara los caudales circulantes por las conducciones del modelo con los caudales observados en las estaciones ROEA y embalses, evitando así la restitución a régimen natural.

El grado de ajuste entre los valores simulados por el modelo y los observados se cuantifica mediante la visualización de gráficos y la utilización de funciones objetivo, en las que la minimización del error cometido en el cálculo es el fundamento de las técnicas de calibración automática de parámetros. Las funciones objetivo disponibles en la adaptación del algoritmo SCE-UA son: (i) el Índice de Nash-Sutcliffe, (ii) el Logaritmo neperiano de Nash, (iii) el Coeficiente de correlación de Pearson y (iv) la Media de la simetría del ajuste entre la simulación media y la observación media.

La elección de los puntos de calibración está determinada por la disponibilidad y longitud de los registros de estaciones de aforo y embalses de los sistemas estudiados. Para los sistemas Arlanza y Pisuerga, se cuenta con las estaciones de aforo de la Tabla A1.5.

Tabla A1.5. Estaciones de Aforo en los Sistemas Arlanza y Pisuerga. Fuente: Proveniente de datos de la CHD, 2010.

Sistema	EA No.	Nombre	Periodo	Años
S6. Pisuerga	3	QUINTANATELLO	1929-1995	66
	49	CABAÑES DE ESGUEVA	1945-2007	62
	33	CASTROVERDE DE CERRATO	1977-1997	20
	44	VALLADOLID	1927-2007	80
	8	PISCÁRDANOS	1965-1987	22
	21	CERVERA DE PISUERGA	1912-2007	95
	19	SALINAS DE PISUERGA	1961-2007	46
	100	SAN MAMÉS DE ZALIMA	1929-1963	34
	20	AGUILAR DE CAMPOO	1954-2007	53
	24	ALAR DEL REY	1911-2007	96
	133	HERRERA DE PISUERGA	1987-2007	20
	29	CORDOVILLA	1911-2007	96
	43	CABEZÓN DE PISUERGA	1930-2007	77
	97	VALLADOLID	1969-2007	38
	78	CAMPOSOLILLO	1961-2007	46
	107	Embalse de CERVERA	1932-2007	75
	22	RUESGA	1912-2007	95
S7. Arlanza	28	CASTROVIDO	1960-2007	47
	30	COVARRUBIAS	1912-2007	95
	31	PERAL DE ARLANZA	1911-2007	96
	36	QUINTANA DEL PUENTE	1912-2007	95
	109	Embalse del ARLANZÓN	1912-2007	95
	32	VILLASUR DE HERREROS	1972-2007	35
	125	SOTOPALACIOS	1974-2007	33

En la Figura A1.9 se pueden observar las estaciones de aforo (EA) utilizadas para el análisis de los sistemas de explotación estudiados. En dichas EA, es restado el caudal circulante aguas arriba, para que al momento de comprar con EVALHID, los resultados sean congruentes.

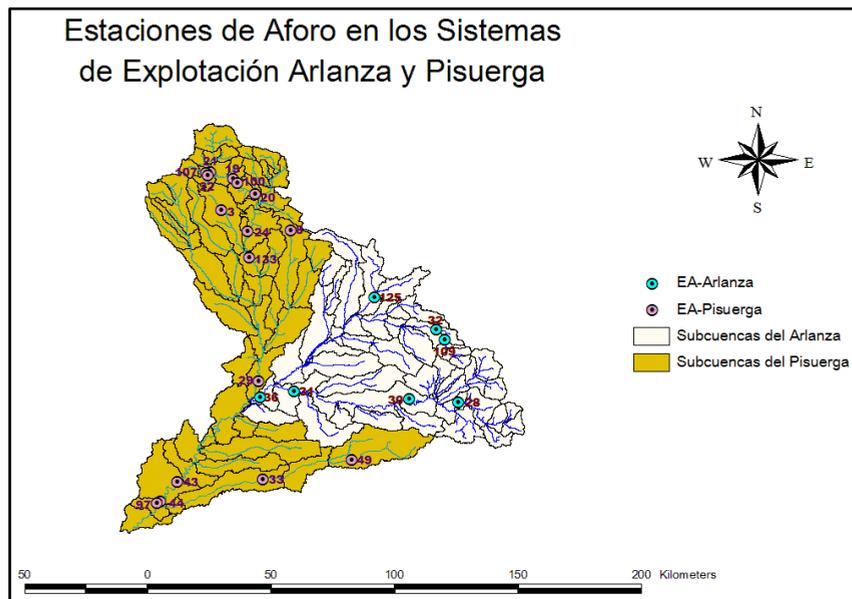


Figura A1.9. Estaciones de aforo usadas para la calibración de los sistemas Arlanza y Pisuerga (CH-Duero, España). Fuente: Elaboración propia.

El periodo de tiempo empleado en la calibración varía según la disponibilidad de registros de aforo. Se reservan los tres primeros años como períodos de calentamiento, con el propósito de minimizar el efecto de condiciones iniciales de humedad y los 7 últimos años como período de validación. Las estaciones de aforo utilizadas para la calibración y validación de estos sistemas de explotación se muestran en la Tabla A1.6.

Tabla A1.6. Subzonas de calibración en los Sistemas Arlanza y Pisuerga

Sistema	Código de Subzona	Estación de aforo	Años de registro	Área (km2)	Tipo de dato de aforo observado
S7 Arlanza	SbZ-1	125	33	141.23	Cuenca de Cabecera
	SbZ-2	32	35	149.62	Cuenca de Cabecera
	SbZ-3	28	47	336.34	Cuenca de Cabecera
	SbZ-4	30	95	780.98	Restitución RN
	SbZ-5	31	96	1393.37	Restitución RN
	SbZ-6	36	95	2144.43	Restitución RN
	SbZ-1	107	75	53.91	Cuenca de Cabecera
S6 Pisuerga	SbZ-2	21	95	221.00	Cuenca de Cabecera
	SbZ-3	20	53	269.85	Restitución RN
	SbZ-4	24	96	569.55	Restitución RN
	SbZ-5	133	20	347.08	Restitución RN
	SbZ-6	29	96	2800.23	Restitución RN
	SbZ-7	33	20	628.24	Cuenca de Cabecera
	SbZ-8*	43	77	2515.38	Restitución RN
	SbZ-9	97	38	750.51	Restitución RN

*NOTA. La Subzona 8 (SbZ-8) del sistema Pisuerga está compuesto por una subcuena del sistema Arlanza y por 5 subcuencas del sistema Carrión, las cuales desembocan a su vez en la EA-43, conformando la SbZ-8 del sistema Pisuerga, que será la zona analizada para la obtención de la restitución de caudales a régimen natural en esa zona, como paso previo a la calibración de la misma.

En la Figura A1.10 se muestran las subzonas de los sistemas de explotación analizados, de acuerdo a la asignación de datos de aforo disponibles.

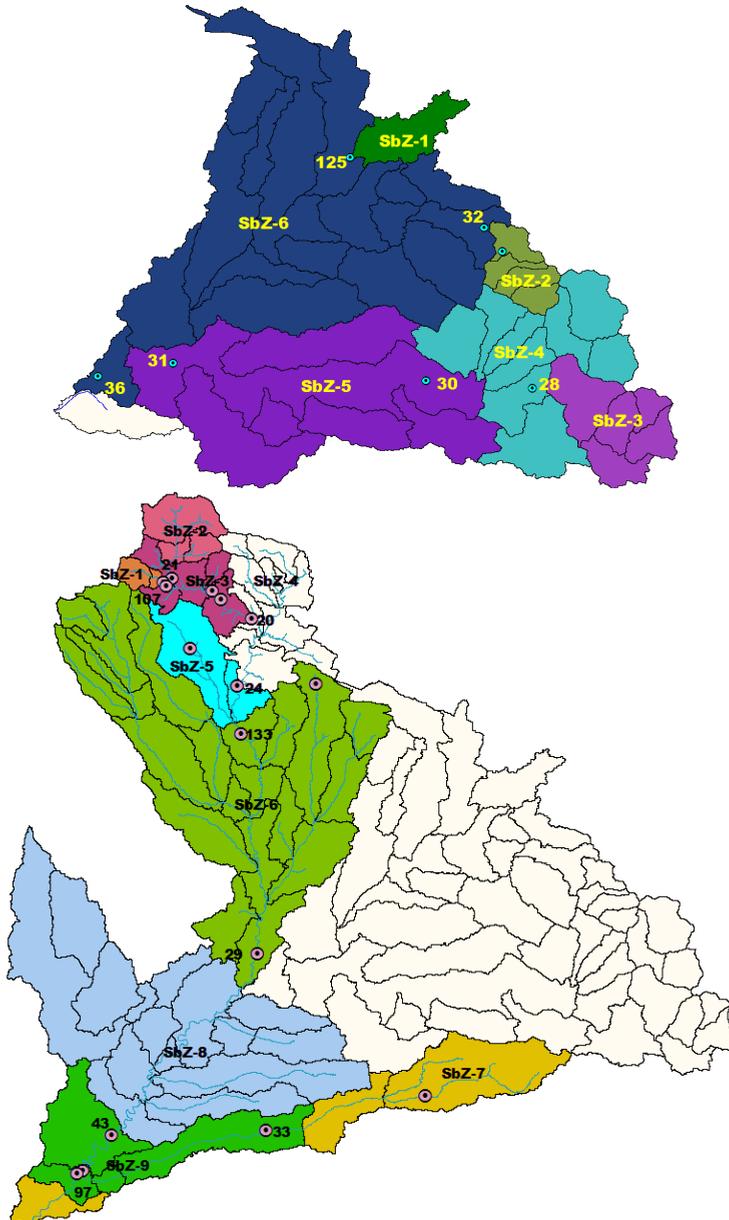


Figura A1.10. Subzonas de aforo en sistemas Arlanza y Pisuerga. Fuente: CH-Duero, 2010.

1.6. RESULTADOS

Para el análisis conjunto de los resultados de aportaciones en los sistemas de explotación, se requiere definir los puntos de desagüe superficiales y subterráneos, valores medios de aportaciones e infiltración con los que se trabajará la calibración de las subzonas evaluadas. Es importante mencionar que en las sub-cuencas a las que se les asigne un punto de desagüe subterráneo, no se modelará la componente de flujo subterráneo de la aportación de la sub-cuenca evaluada, sino que se considerará como una pérdida del sistema, de esta forma, se toma en cuenta que esa porción de agua que se pierde, es introducida posteriormente como aportación del modelo de flujo subterráneo pero aguas abajo, en una zona distinta a la sub-cuenca de donde es extraída. El objetivo de realizar esta asunción es el lograr tomar en cuenta los flujos regionales de mayor paso de tiempo, dentro del modelo de acuífero desarrollado en Autovalores para la Cuenca del Duero y a su vez, no caer en el error de considerar una duplicidad de recursos.

Los resultados se presentan en función de la subzona calibrada, la cual agrupa un mayor o menor número de sub-cuencas, en función de las estaciones de aforo disponibles aguas abajo para calibrar los valores simulados con el modelo HBV. Los resultados de caudal e infiltración se presentan a manera de gráficas anuales, año medio y tablas de parámetros con los valores obtenidos de la función objetivo. El algoritmo de optimización utilizado es el SCE-UA (Duan, 1992), que tiende a minimizar los errores de los valores simulados respecto a los observados. De esta forma, valores de la F_{ob} cercanos a -1 en las subzonas analizadas, serán los que mejor calibración hayan obtenido, de acuerdo al índice de Nash-Sutcliffe. A manera de ejemplo se presentan dos subzonas de calibración para cada sistema de explotación analizado.

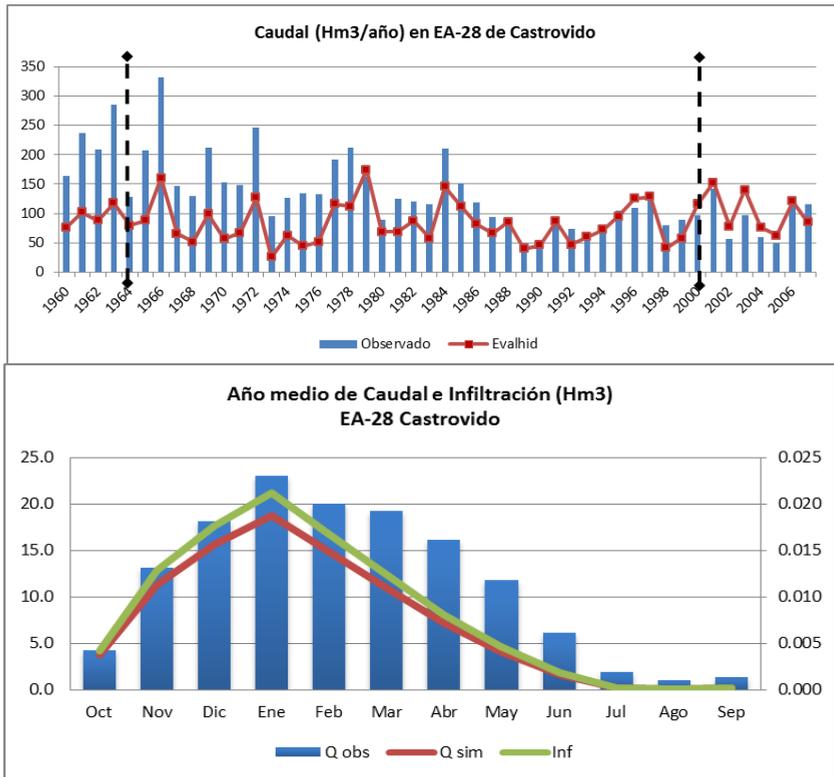
1.6.1. Sistema de explotación Arlanza

1.6.1.1. Subzona SbZ-3. Castroviejo

Para este sistema de explotación se presentan los resultados para la sub-zona SbZ-3 en la Tabla A1.7, que cuenta con resultados para las simulaciones [1,2,3], que varían según las consideraciones de los parámetros introducidos al modelo. Los resultados son: (i) la recarga que aporta al modelo subterráneo en Autovalores es mínima ($0.1\text{hm}^3/\text{año}$); (ii) el mejor caudal simulado es de $128.5\text{hm}^3/\text{año}$, correspondiente al 94% del caudal observado en la simulación [2]; (iii) el valor del índice de Nash para [2] es -0.8047; (iv) la serie anual de caudales simulados respecto de los observados se presenta en la Figura A1.11a y (v) el año medio de caudal e infiltración simulados, respecto del observado se presentan en la Figura A1.11b, donde se observa buena correspondencia entre valores simulados y observados.

Tabla A1.7. Datos de calibración (1960-2007) en la subzona SbZ-3 del Sistema Arlanza

<u>Datos de Estación de Aforo</u>		<u>Parámetros del modelo</u>			
Nombre:	Castroviejo	Parámetro	[1] Forzando recarga	[2] Sin forzar recarga	[3] Param. libres
Numero:	28	Beta	2.52	3.96	3.29
Recarga:	mínima (0.1hm ³ /año)	FC	116.15	345.54	293.07
MAS:	-	PWP	23.31	208.07	404.52
<u>Valores medios (hm³/año)</u>		L _{max}	49.97	10.11	26.76
Caudal obs:	136.21	K0	0.2003	0.1713	0.3729
Caudal sim:	88.74 – 128.49 – 130.01	K1	0.3537	0.0100	0.2470
Infiltración:	0.10 – 0.00 – 0.10	K2	0.0995	0.0000	0.0021
<u>Valores de Función objetivo</u>		K _{perc}	0.0004	0.0000	0.0002
F _{obj} calib [1]:	-0.6430	<u>Modelo NIEVE 1.0</u>			
F _{obj} calib [2]:	-0.8047	TT	-1.53	1.97	-0.62
F _{obj} calib [3]:	-0.6971	DD	60.38	52.45	50.97



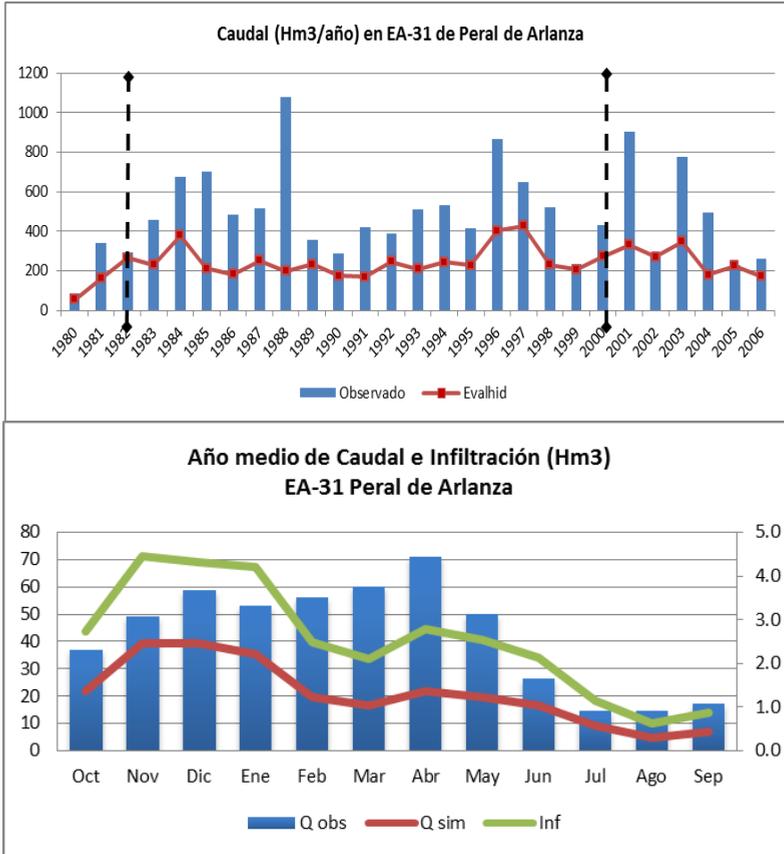
Figuras A1.11a y A1.11b. Calibración de EA-28 en Sistema de Explotación Arlanza (CH-Duero, España)

1.6.1.2. Subzona SbZ-5. Peral de Arlanza

En la Tabla A1.8, se muestran los resultados para las simulaciones [1,2,3] hechas en la subzona SbZ-5 del sistema de explotación Arlanza. Los resultados son: (i) la recarga que aporta al modelo subterráneo en Autovalores es de 30.34hm³/año; (ii) el mejor caudal simulado es de 456.63hm³/año, correspondiente al 90% del caudal observado en la simulación [2]; (iii) el mejor valor del índice de Nash fue para [3], con -0.5720; (iv) la serie anual de caudales simulados respecto de los observados se presenta en la Figura A1.12a y (v) el año medio de caudal e infiltración simulados, respecto del observado se presentan en la Figura A1.12b.

Tabla A1.8. Datos de calibración (1980-2006) en la subzona SbZ-5 del Sistema Arlanza

<u>Datos de Estación de Aforo</u>		<u>Parámetros del modelo</u>			
Nombre:	Peral de Arlanza	Parámetro	[1] Forzando recarga	[2] Sin forzar recarga	[3] Param. libres
Numero:	31	Beta	0.50	1.00	1.18
Recarga:	30.34 hm ³ /año	FC	20.02	123.48	107.43
No MAS:	M17-Burgos M29-Aranda del Duero	PWP	4.00	799.95	778.77
<u>Valores medios (hm³/año)</u>		L _{max}	44.75	75.30	48.12
Caudal obs:	507.36	K0	0.3328	0.3254	0.4937
Caudal sim:	250.29 – 456.63 – 436.37	K1	0.0505	0.2486	0.3996
Infiltración:	30.34 – 1.10 – 30.35	K2	0.0995	0.0000	0.0835
<u>Valores de Función objetivo</u>		K _{perc}	0.0065	0.0000	0.0278
F _{obj} calib [1]:	-0.2319	<u>Modelo NIEVE 1.0</u>			
F _{obj} calib [2]:	-0.5620	TT	-	-	-
F _{obj} calib [3]:	-0.5720	DD	-	-	-



Figuras A1.12a y A1.12b. Calibración de EA-31 en Sistema de Explotación Arlanza (CH-Duero, España)

Tanto la comparativa gráfica con el valor del índice de Nash obtenidos reflejan una simulación poco óptima, siendo más bajo el caudal simulado respecto del observado. Es posible que esta situación se presente dada la demanda de caudal a infiltrar por esa subzona del sistema de explotación. A continuación se presentan los mismos tipos de resultados (Tablas A1.9 y A1.10) para otro sistema de explotación (Pisuerga), con resultados (Figuras A1.13a, 1.13b y A1.14a, 1.14b) para la calibración de dos sub-zonas del mismo.

1.6.2. Sistema de explotación Pisuerga

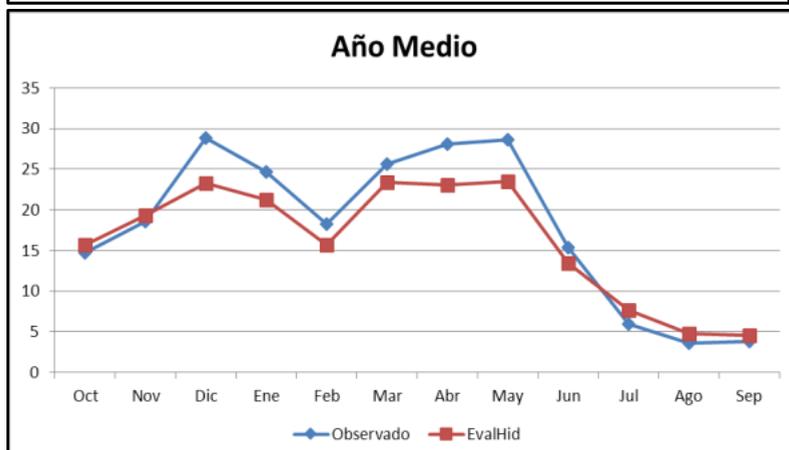
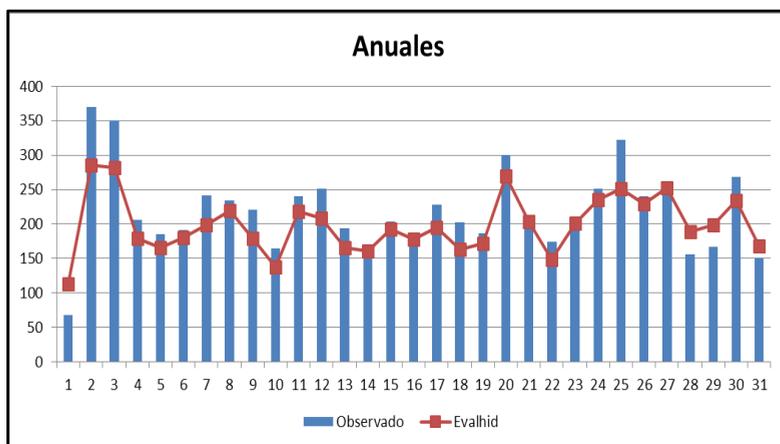
1.6.2.1. Subzona SbZ-1. Embalse de Cervera

Tabla A1.9. Datos de calibración en la subzona SbZ-1 del Sistema Pisuerga

<i>Datos de Estación de Aforo</i>		<i>Parámetros del modelo</i>			
Nombre:	Embalse de Cervera	Parámetro	[1] Forzando recarga	[2] Sin forzar recarga	[3] Param. libres
Numero:	107	Beta	-	-	3.326

Apartado de Anejos

			Tesis Doctoral	
Recarga:	Mínima (0.1hm ³ /año)	FC	-	- 146.015
No MAS:	-	PWP	-	- 566.400
<u>Valores medios (hm³/año)</u>		L _{max}	-	- 45.940
Caudal obs:	192.41	K0	-	- 0.2640
Caudal sim:	188.32	K1	-	- 0.0679
Infiltración:	-	K2	-	- 0.0302
<u>Valores de Función objetivo</u>		K _{perc}	-	- 0.0621
F _{obj} calib [1]:	-	<u>Modelo NIEVE 1.0</u>		
F _{obj} calib [2]:	-	TT	-	- 0.0148
F _{obj} calib [3]:	-0.9175	DD	-	- 9.6992

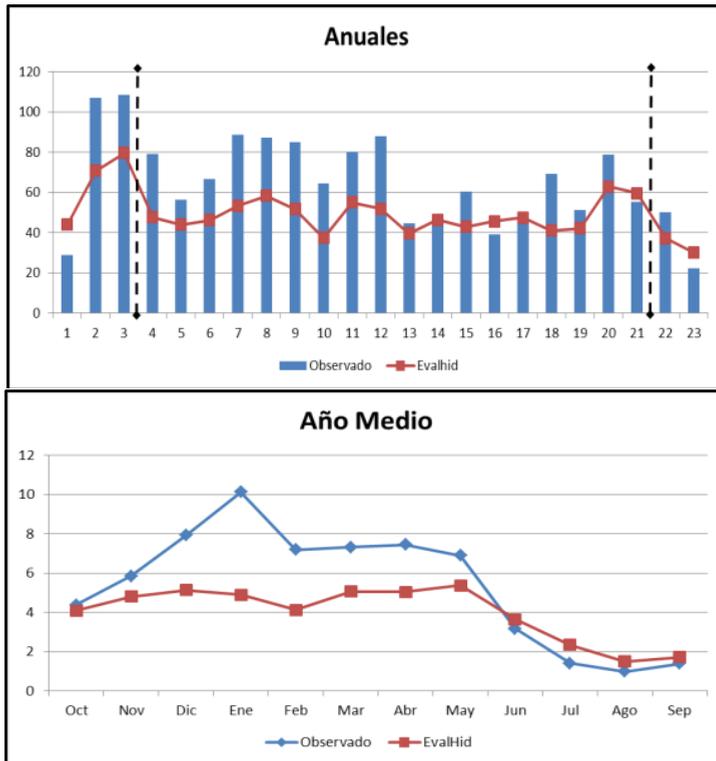


Figuras A1.13a y A1.13b. Calibración de EA-107 en Sistema de Explotación Pisuerga (CH-Duero, España)

1.6.2.2. Subzona SbZ-5. Herrera de Pisuerga

Tabla A1.10. Datos de calibración en la subzona SbZ-5 del Sistema Pisuerga

<u>Datos de Estación de Aforo</u>		<u>Parámetros del modelo</u>			
Nombre:	Herrera de Pisuerga	Parámetro	[1] Forzando recarga	[2] Sin forzar recarga	[3] Param. libres
Numero:	133	Beta	-	-	3.047
Recarga:	10.29hm ³ /año	FC	-	-	50.033
No MAS:	-	PWP	-	-	26.9773
<u>Valores medios (hm³/año)</u>		L _{max}	-	-	44.322
Caudal obs:	51.32	K0	-	-	0.3392
Caudal sim:	49.86	K1	-	-	0.0399
Infiltración:	-	K2	-	-	0.0426
<u>Valores de Función objetivo</u>		K _{perc}	-	-	0.9998
F _{obj} calib [1]:	-	<u>Modelo NIEVE 1.0</u>		-	
F _{obj} calib [2]:	-	TT	-	-	0.0004
F _{obj} calib [3]:	-0.6566	DD	-	-	9.9927



Figuras A1.14a y A1.14b. Calibración de EA-133 en Sistema de Explotación Pisuerga (CH-Duero, España)

A continuación, en la Tabla A1.11 se presenta un resumen de la infiltración media anual (hm^3) obtenida por sistema de explotación a partir de la calibración de los modelos lluvia-escorrentía del Duero.

Tabla A1.11. Infiltración media anual (hm^3) calculada para las sub-cuencas de los Sistemas de Explotación del Duero

ID	Superficie (km^2)	Infiltración (hm^3)	Sistema de Explotación
1	2292	49.1	Aranda del Duero
2	652	27.9	Ayllón
3	1681	56.5	Burgos
4	1292	29.7	Carrión
5	2373	59.3	Cuenca de Almazán
6	2426	19.8	Los Arenales
7	3628	29.9	Medina del Campo
8	397	5.0	Páramo de Astudillos
9	1064	23.6	Riaza
10	2441	40.9	Salamanca
11	493	19.7	Sepúlveda
12	3339	60.3	Tierra de Campos
13	1550	31.5	Tierra del Vino
14	1190	15.3	Tordesillas
15	2467	88.0	Valdavia
16	734	14.3	Villadiego
17	1003	18.8	Villafáfila
Total:	29020	589.6	

1.7. SÍNTESIS Y DISCUSIÓN

En este apartado se ha presentado la forma en que son estimadas conjuntamente las aportaciones superficiales e infiltración por calibración de cuatro modelos particulares de flujo superficial, que tienen acoplados sus resultados de recarga a un modelo de flujo subterráneo. La calibración de parámetros se llevó a cabo de manera automática, mediante el uso de herramientas en hojas EXCEL con implementación del algoritmo de optimización lineal SCE-UA.

Otros modelos para distintos sistemas de explotación pertenecientes a la CH-Duero fueron desarrollados y calibrados de igual forma, con lo que se mejora la obtención de aportaciones para el modelo de acuífero que se desarrolla y calibra en Autovalores para el Acuífero Terciario del Duero, España.

La metodología propuesta, para la inclusión de intercambio de flujo entre masas superficiales y subterráneas evita la duplicidad de recursos en la evaluación conjunta de recursos hídricos en la cuenca analizada. Lo anterior se realiza mediante el forzamiento de la calibración de parámetros en los modelos hidrológicos para lograr descontar el valor de infiltración modelado en el acuífero del Duero. La adaptación realizada al modelo hidrológico HBV (para la infiltración selectiva) puede extrapolarse para su implementación en otras cuencas donde se requiera evaluar el uso conjunto en sistemas de recursos hídricos complejos.

"La ciencia se compone de errores, que a su vez son los pasos hacia la verdad".

Julio Verne.

ANEJO 2. APROXIMACIÓN DE PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS USANDO LA METODOLOGÍA GLUE

En este anejo se expone la aplicación de la metodología GLUE para una mejora en la aproximación de los parámetros hidrogeológicos del modelo de acuífero por Autovalores del Duero (España). GLUE es una metodología expuesta por Beven y Binley (1992), como técnica de análisis de incertidumbre inicialmente, la cual puede ser adaptada para estimación de parámetros, con un valor de incertidumbre asociado.

2.1. INTRODUCCIÓN

Producto de la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos naturales y de la incapacidad de reproducir fielmente dichos fenómenos mediante modelos matemáticos, se han creado herramientas metodológicas e informáticas que nos ayudan a simular o imitar dichos fenómenos, con grandes limitantes (Sahuquillo, 2010b). En la gestión integrada de cuencas, los modelos superficiales y subterráneos juegan un papel importante, ya sea en el proceso de operación, evaluación y/o caso de estudio (Van et al., 2008). La mayoría de los modelos físicos son complejos y consideran múltiples parámetros para lograr su calibración exacta. Un gran número de parámetros, una estructura compleja del modelo usado y una amplitud en los valores posibles de los parámetros, conlleva ineludiblemente a un alto grado de incertidumbre y pérdidas de tipo temporal en la búsqueda de la calibración del modelo que represente mejor el fenómeno natural observado (Vrugt et al., 2003; Xuan et al., 2009). En este sentido, para aplicar de manera práctica y óptima modelos de gestión conjunta en la investigación de recursos hídricos, se requiere de herramientas metodológicas que coadyuven a la reducción de todo tipo de fuente de incertidumbre asociada (Beven y Binley, 1992). Típicamente la incertidumbre está asociada al propio modelo hidrológico usado (estructura), los datos de entrada y los parámetros del modelo. Por un lado, la incertidumbre estructural se mejora al comparar y modificar diversas componentes del modelo. En cambio, la relacionada a

los datos de entrada, es debida al cambio en condiciones naturales, limitaciones de medidas y ausencia de datos (Lindenschmidt et al., 2007). Actualmente tienen mucho impacto estudios relacionados con la incertidumbre asociada a la modelación hidrológica, relacionada con sus efectos en la predicción o toma de decisiones (Sudheer y Lakshmi, 2011).

Cuando se trabaja con un modelo de flujo muy grande, con un alto número de parámetros y de sub-procesos que afectan la calibración o inciden en la estructura del modelo, aparece el concepto de incertidumbre (Rosso, 1994). Se sabe que la incertidumbre relacionada con los parámetros de un modelo es intrínseca y que para cuantificarla es necesario utilizar metodologías específicas, de tal manera que previo al uso de los modelos hidrológicos para estimación y predicción, se conozca de ellos al menos la incertidumbre asociada a los parámetros que lo componen y a su estructura. Existen trabajos de incertidumbre paramétrica sobre problemas de gestión conjunta e integrada de cuencas (Zacharias et al., 2005; Camacho, 2000; Cantor, 2006; Torres et al., 2012), sin embargo pocos trabajos relacionados con la estimación de parámetros para un modelo hidrológico, asociando su incertidumbre.

El estudio se realiza en el acuífero de la Cuenca del Duero, situado al Norte de España. El acuífero profundo principal es denominado "Terciario Detrítico del Duero", el cual abastece de agua a las demandas urbana, agrícola, industrial, eléctrica, recreativa, etc. Distintos modelos hidrológicos se han usado para el análisis del impacto de la gestión histórica y actual de los recursos hídricos en la cuenca (López, 1993; EPTISA, 2006; CHD, 2010; Caballero, 2005), la mayoría de ellos, teniendo como interés principal la modelación superficial o subterránea de recursos, pocos de ellos atendiendo la gestión conjunta (Jiménez, 2011; Pulido-Velázquez et al., 2005; Sahuquillo, 2010b). Por tanto, es importante investigar la incertidumbre en los modelos superficiales y subterráneos usados de manera conjunta en la cuenca del Duero, dado el variado comportamiento hidrogeológico y la heterogeneidad de materiales, demandas y recargas del sistema en su conjunto. Este estudio se combina un modelo lineal de flujo subterráneo con la metodología GLUE, para estimar el mejor conjunto de parámetros hidrodinámicos del modelo, para un determinado intervalo de confianza y dado un valor aceptable de desviación estándar en los resultados obtenidos.

2.2. METODOLOGÍA

El poder identificar los parámetros adecuados para un modelo de hidrológico es un problema complejo y no lineal, pues es posible obtener múltiples soluciones óptimas, ya sea por algoritmos de optimización (Nandakumar y Mein, 1997), o cayendo en el fenómeno de equifinalidad (Beven y Binley, 1992), al contar con distintos conjuntos de parámetros que realizan predicciones similares. En este sentido, la metodología GLUE (Figura A2.1) mejora el rendimiento de un modelo, al concentrarse en la estimación de incertidumbre para un conjunto de parámetros y no

la de parámetros individuales, tomando en cuenta la interacción entre parámetros de un mismo modelo y su no linealidad, a través de mediciones de similitud (Velázquez et al., 2009).

Esta metodología considera todo tipo de fuentes de incertidumbre: de los datos de entrada, de la estructura del modelo, de sus parámetros y de la propia respuesta del modelo. GLUE ha sido ampliamente usada como herramienta general y eficiente para la calibración de modelos complejos y gran cantidad de parámetros (Beven y Freer, 2001). La metodología se basa en los siguientes pasos:

- i. La definición de una función de similitud para el proceso de comparación de resultados
- ii. La generación de conjuntos de parámetros adoptados “a priori” para la simulación
- iii. La definición de un umbral de aceptación de resultados (desviación estándar “ σ^2 ” del error, asumida por el modelo)
- iv. La revisión del conjunto de parámetros “a posteriori” y análisis de resultados

En general, para el paso (i), es usado el coeficiente (N) de Nash-Sutcliffe (1970) como función de similitud, al ser la medida de similitud más utilizada en la literatura (Freer et al., 1996), mediante la fórmula:

$$N = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2} \quad [E A.1]$$

Donde: $Qobs_i$ y $Qsim_i$ son los valores medidos y simulados para la realización i , \bar{Qobs} es la media de los valores observados.

El rango del coeficiente es desde $-\infty$ a 1, donde 1 indica un ajuste perfecto y valores negativos indican un ajuste no mejor que el de la media de los observados.

Dado que no se cuenta con mayor información, en el paso (ii) es elegida una función de distribución de tipo “uniforme” para representar los estadísticos “a priori” de la metodología. En este trabajo fueron ejecutadas 10,000 realizaciones, para las cuales se contó con campos de parámetros hidrodinámicos aleatorios para el modelo de flujo subterráneo. El inconveniente de esta metodología es la carga computacional impuesta ante la estrategia de muestreo aleatorio, sin embargo se mejora el desempeño respecto a simulación puramente de tipo Monte Carlo, al realizar en GLUE la evaluación simultánea de todos los parámetros del modelo (Lenhart et al., 2007).

Para el umbral de aceptación del paso (iii) de la metodología se escoge un umbral mínimo de 0.8 para el valor de Nash, evaluado según [E-A.1]. A su vez, la desviación estándar (σ_e^2) del error que es aceptada se fijó en $1.0 \text{ hm}^3/\text{año}$, para caudales observados que oscilan entre 1.0 y $50.0 \text{ hm}^3/\text{año}$. Si el valor de aceptabilidad obtenido es menor que el impuesto, la realización evaluada es considerada no apta y la combinación de parámetros es rechazada y removida de realizaciones posteriores.

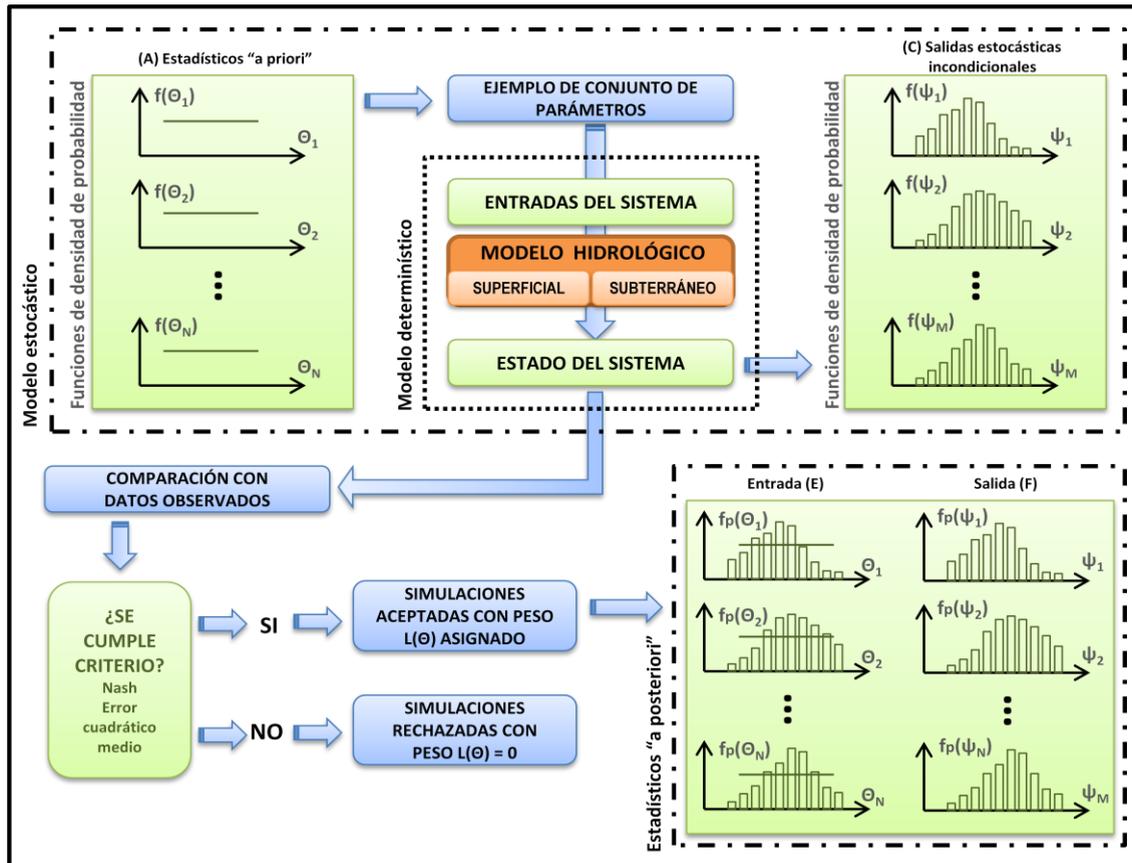


Figura A2.1. Esquema del funcionamiento de la metodología GLUE. Fuente: Elaboración propia.

2.3. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Duero (Figura A2.2) está localizada al Noroeste de la Península Ibérica, dentro de las comunidades autónomas de Asturias, Cantabria, Castilla-La Mancha, Castilla y León, Extremadura, Galicia, La Rioja y Madrid, con superficie de 78,859km² (CHD, 2010).



Figura A2.2. Localización de los Sistemas de explotación de la Cuenca del Duero. Fuente: CHD, 2010.

El área se caracteriza por un clima principalmente mediterráneo, con una temperatura media en invierno de 2°C (Enero) y en verano de 22°C (Julio). La cuenca tiene una precipitación media anual de 612mm, con valores mayores en zonas de montaña (>1800mm), valores medios en sistemas central e ibérico (1000m) y valores bajos en zonas del Bajo Duero, Salamanca, Zamora y Valladolid (400mm). En la zona existen estaciones meteorológicas e hidrométricas, en las cuales se auxilia para la restitución de aforos a régimen natural en tramos del Río Duero, que se considera con conexión al acuífero profundo “Terciario detrítico del Duero”. En dichos tramos se conoce el caudal transferido en la relación río-acuífero, la cual es la base para calibrar las entradas y salidas simuladas en el modelo de acuífero analizado.

2.4. MODELO DE FLUJO SUBTERRÁNEO Y CAMPOS DE PARÁMETROS ALEATORIOS

El modelo subterráneo utilizado está compuesto por un acuífero de dos capas (Figura A2.3), en la primera se presentan las masas subterráneas más someras, asociado a los flujos rápidos y locales y en la segunda capa el acuífero terciario detrítico, asociado a los flujos profundos y regionales. Se compone de una malla de 17x15 celdas, con 3 de ellas donde se evalúa la descarga por conexión río-acuífero, consideradas de nivel distinto de cero.

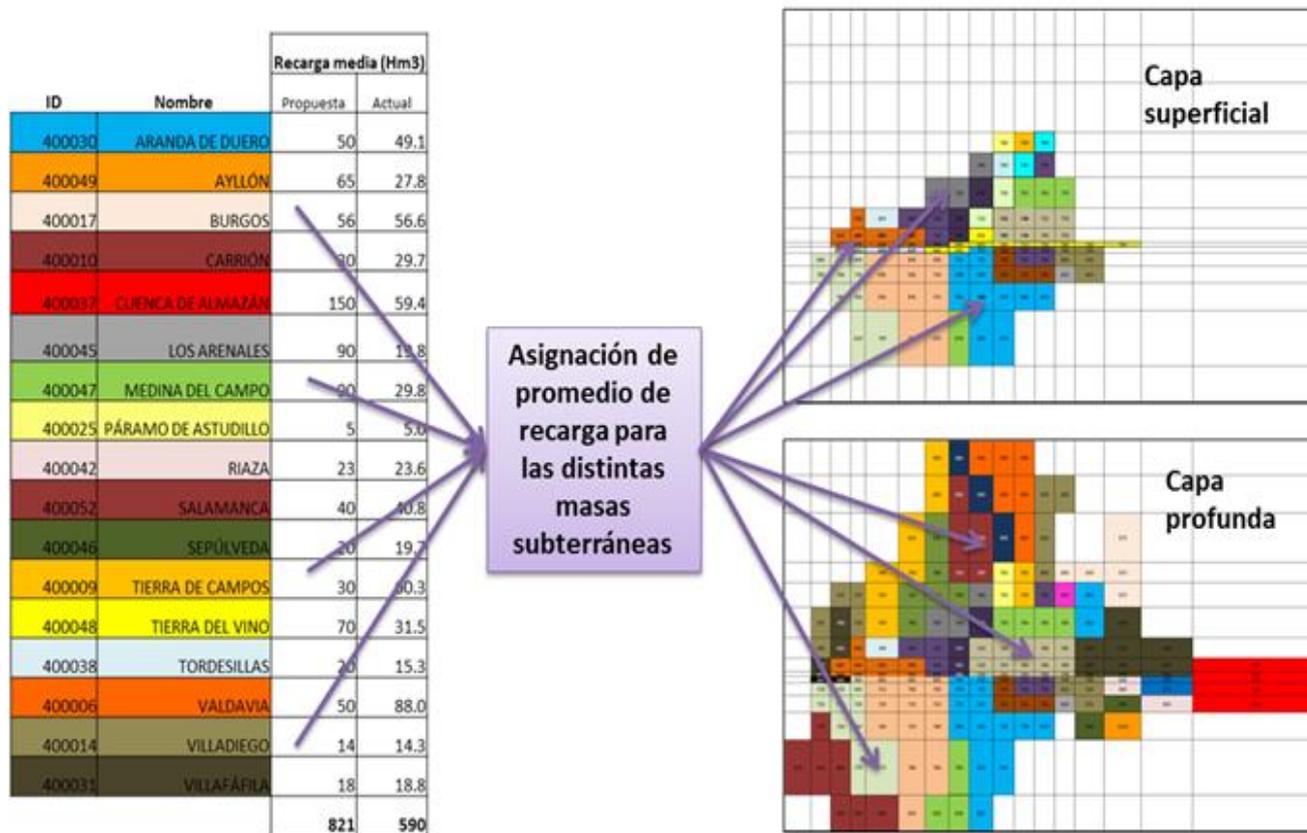


Figura A2.3. Modelo de acuífero por Autovalores para la simulación del flujo subterráneo. Fuente: Elaboración propia.

La descarga simulada en estas celdas permite la comparación con los caudales aforados y restituidos en los tramos finales del Río Duero (Jiménez, 2011), relacionados con las estaciones de aforo 2066.Carrascal, 2062.Toro, 2054.Villamaciel y 2015.Herrera. El modelo considera parámetros hidrogeológicos medios, en base a estudios bibliográficos sobre la estratigrafía de la zona. La Tabla A2.1 resume los valores medios de conductividad (K) y almacenamiento (S) por masa de agua subterránea presente en el modelo de flujo.

Tabla A2.1. Valores medios de conductividad y almacenamiento para las masas subterráneas del acuífero del Duero, España. Fuentes: CHD, 2010; Jiménez, 2011; Elaboración propia.

No	Masa Subterránea	Kx,y (m/día)	Sx,y (adim)
1	Aranda del Duero	1.6	0.0006, 0.0012
2	Ayllón	2.0	0.0005
3	Burgos	1.5	0.0003
4	Carrión	0.9, 1.0	0.0025
5	Cuenca del Almazán	1.9	0.0005
6	Los Arenales	2.0, 2.5, 3.0	0.0007, 0.0010
7	Medina del Campo	1.1, 2.0, 3.0	0.0010, 0.0025
8	Páramo de Astudillo	1.0	0.0025
9	Riaza	1.5, 1.2	0.0006, 0.0007
10	Salamanca	0.9, 3.0	0.0025
11	Sepúlveda	1.6	0.0005
12	Tierra de Campos	1.0	0.0025, 0.0050
13	Tierra del Vino	0.9, 1.0, 1.1	0.0025
14	Tordesillas	0.5, 1.0	0.0025
15	Valdavia	1.0	0.0025
16	Villadiego	0.8, 1.0	0.0020
17	Villafáfila	1.0	0.0025
18	Terciario detrítico del Duero	1.0, 1.3, 2.5, 3.0	0.0010, 0.0025

Por otro lado, para obtener el campo de parámetros aleatorios como entrada al archivo de datos simulado en AQUIVAL 2.0 (2011), mediante el código que ejecuta la metodología GLUE, es necesario definir zonas de parámetros similares. Se encontraron 13 zonas comunes de conductividad (K) y 11 zonas comunes de almacenamiento (S), en las capas 1 y 2 del modelo por Autovalores.

El caudal de descarga simulado en las celdas con conexión río-acuífero, derivado de las propiedades hidrogeológicas impuestas por los campos de parámetros aleatorios evaluados, permite obtener y comparar este resultado con los caudales aforados y restituidos a régimen natural observados.

Los rangos máximos y mínimos definidos en la Tabla A2.2 se corresponden con valores de literatura para los tipos de materiales presentes en los estratos del acuífero estudiado. Dichos rangos son el dato necesario para definir una distribución de tipo "uniforme", asociada a la metodología de estimación de incertidumbre y parámetros (GLUE), expuesta en el apartado siguiente.

Tabla A2.2. Rangos mínimo y máximo de conductividad (Kx,y) y almacenamiento (Sx,y) usados en los campos de parámetros aleatorios

Conductividad (m/día)	Almacenamiento		Almacenamiento (adim)	Almacenamiento	
	min	max		min	max
K1	0.25	1.0	S1	0.0002	0.0006
K2	0.40	1.6	S2	0.0003	0.0010
K3	0.45	1.8	S3	0.0003	0.0012
K4	0.50	2.0	S4	0.0004	0.0014
K5	0.55	2.2	S5	0.0004	0.0016
K6	0.60	2.4	S6	0.0005	0.0020
K7	0.65	2.6	S7	0.0006	0.0024
K8	0.75	3.0	S8	0.0008	0.0030
K9	0.80	3.2	S9	0.0010	0.0040
K10	0.95	3.8	S10	0.0013	0.0050
K11	1.00	4.0	S11	0.0025	0.0100
K12	1.25	5.0			
K13	1.50	6.0			

2.5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para la evaluación de la metodología GLUE, se desarrolló un código (Figura A2.4) en el entorno de MATLAB (R2012a), el cual expone los pasos generales seguidos en la metodología. Para el régimen estacionario estudiado (período 1970-2005), la descarga observada es negativa, producto de extracciones en la zona. Estas extracciones generan que las condiciones de descarga natural del acuífero al río se inviertan, lo que propicia una pérdida de caudal en los tramos de río en contacto con el acuífero.

Tras evaluar unas 10,000 realizaciones del modelo de flujo subterráneo, aplicando la metodología GLUE (con un tiempo total de simulación de 1 día y 18 horas, en una computadora Intel Core Duo Quad a 2.5GHz). Las realizaciones simuladas y aceptadas (Figura A2.5a) son presentadas junto con el ajuste del análisis “a posteriori” para el modelo de flujo (Figura A2.5b).

Por otro lado, en la estimación de un parámetro poblacional, se sabe que un intervalo de confianza es un rango de valores (dentro de una muestra), en el cual se encuentra el verdadero valor del parámetro estudiado, dada una probabilidad determinada (Rada, 2007). Por tanto, la probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre en el intervalo conocido, es denominado como “Nivel de Confianza” ($1-\alpha$) y la probabilidad de equivocarse se conoce como “Nivel de Significancia” (α). Generalmente se construyen intervalos de confianza $1-\alpha = 95\%$, comprobando que la función de distribución usada cumple con el error asumido.



Figura A2.4. Estructura del código para la evaluación de la metodología GLUE.
Fuente: Adaptado de metodología GLUE; Elaboración propia.

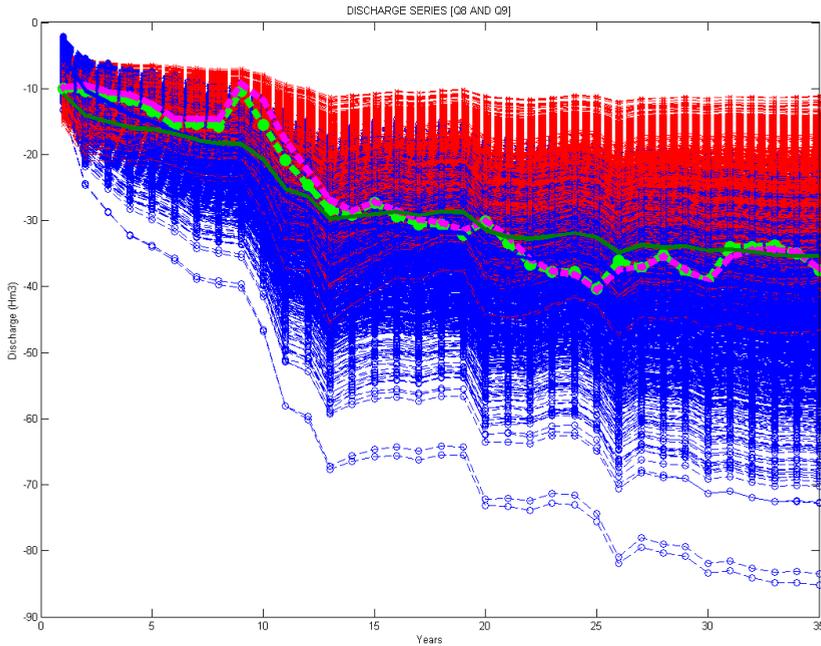


Figura A2.5a. Realizaciones "a priori" del modelo de flujo subterráneo para la descarga de caudal por celdas con conexión río-acuífero.

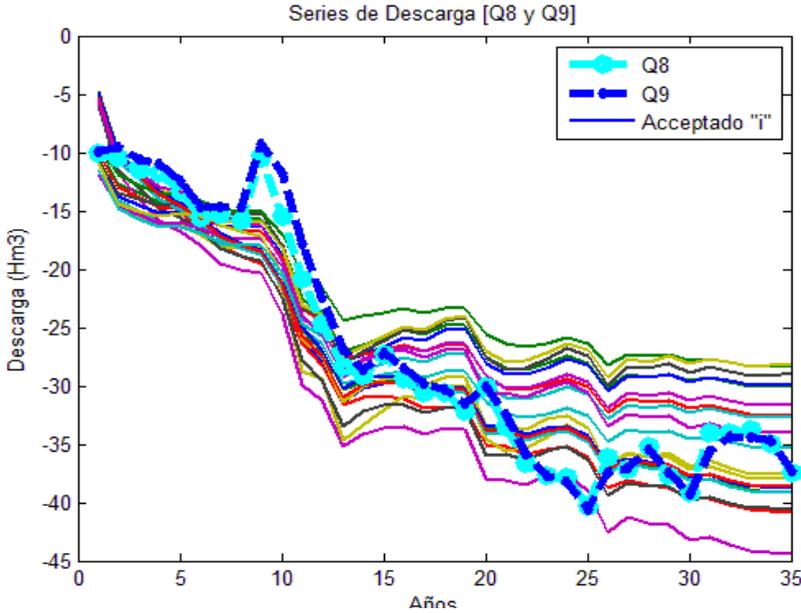


Figura A2.5b. Realizaciones “a posteriori” del modelo de flujo subterráneo para la descarga de caudal por celdas con conexión río-acuífero.

Uno de los problemas asociados a la modelación hidrológica se relaciona con el fenómeno de “Equiparidad” de parámetros en un modelo. En la Tabla A2.3 se muestran múltiples combinaciones de conjuntos de parámetros con valor de eficiencia de Nash similar. Este fenómeno puede ser debido a que los parámetros calibrados estén afectados por múltiples factores (correlación entre parámetros, sensibilidad, escalabilidad espacial y temporal, características estadísticas del error esperado, la estructura propia del modelo usado).

Tabla A2.3. Conjuntos de conductividades (Ki) para las 13 zonas del modelo de acuífero, con Nash ≈ 0.90

Zona	Ki (m/día)		
	1	2	3
1	0.6483	0.4746	1.0767
2	0.7316	0.3486	0.7120
3	0.9093	1.4997	1.3522
4	0.9912	1.6132	1.0032
5	1.1245	2.5387	2.5497
6	1.5647	1.5828	0.6124
7	1.6641	1.9124	1.1144
8	1.9915	1.0459	2.4659

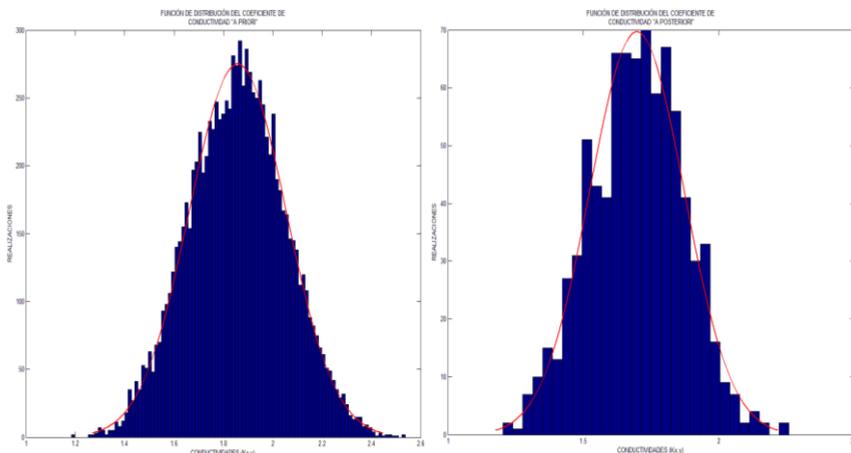
Tesis Doctoral

9	2.1873	1.7372	2.7023
10	2.3653	3.1390	1.5946
11	2.7360	3.0505	1.3102
12	3.1406	2.1474	3.0516
13	4.6145	4.5104	3.4148
Nash	0.909	0.908	0.907

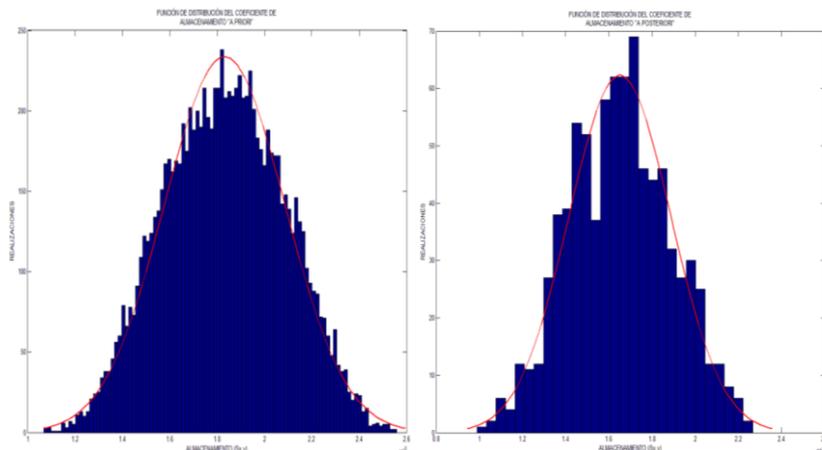
Tras el análisis de resultados, se observó que el conjunto de parámetros fue muy denso alrededor del límite máximo impuesto, lo que posiblemente infiera mayor incertidumbre en el modelo de acuífero usado. En las Figuras A2.6a,b,c,d se muestra la función de distribución de los parámetros de conductividad (K) y almacenamiento (S), “a priori” y “a posteriori”, una vez aplicada la metodología GLUE para la estimación de realizaciones aceptadas.

Se puede observar que los parámetros no siguen una distribución uniforme “a priori”, como se esperaría, sin embargo, sí que se observa una mejora en la distribución “a posteriori”, al acotar el rango de variación de ambos parámetros. Lo anterior implica una reducción en la incertidumbre en los parámetros de entrada del modelo, que conllevaría a obtener mejores índices de eficiencia para el caudal de descarga del modelo.

A su vez, la reducción del rango de distribución de ambos parámetros implicaría que el modelo esté influenciado por el conjunto de parámetros, en lugar de un solo parámetro individual.



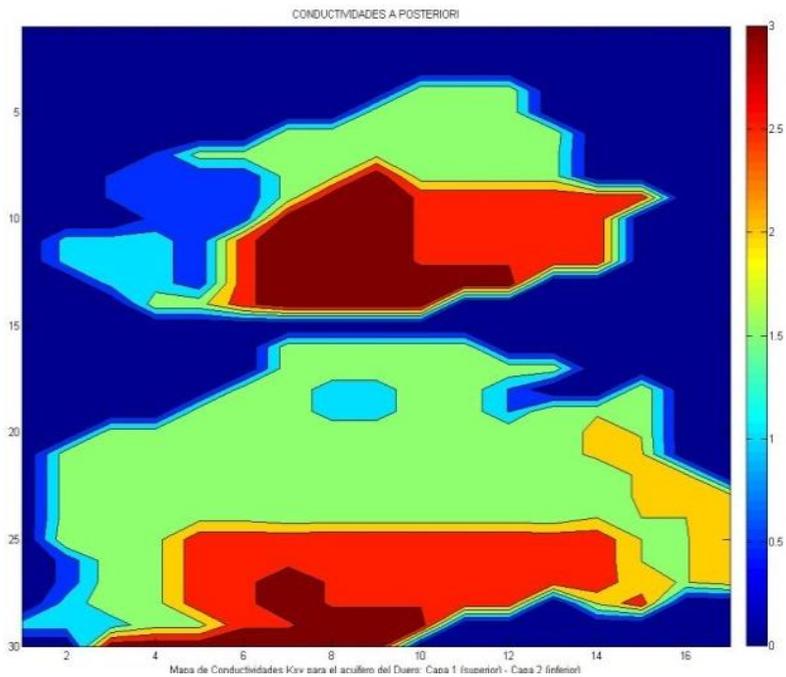
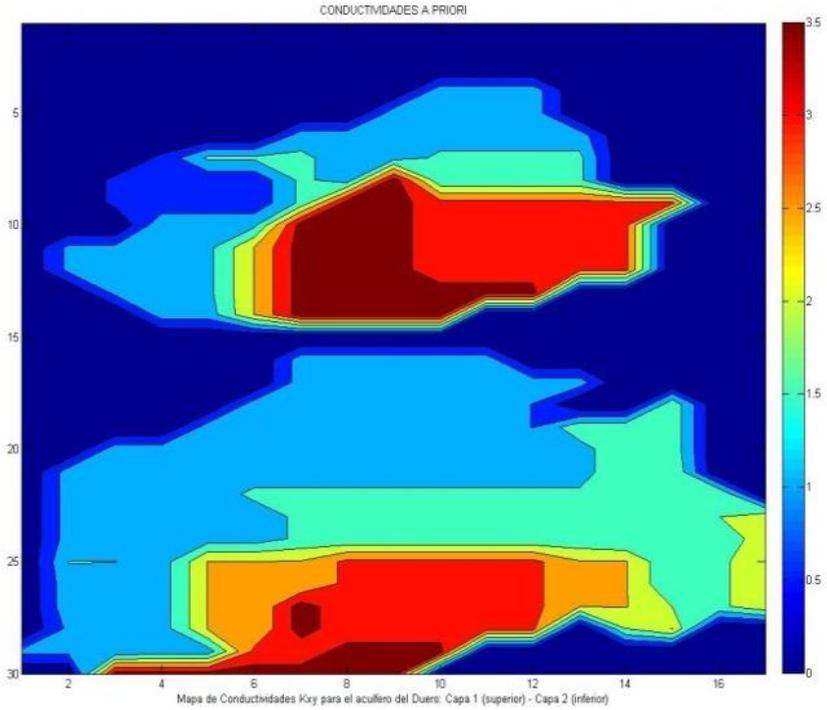
Figuras A2.6a,b. Funciones de distribución “a priori” y “a posteriori” para el parámetro de Conductividad (K) del modelo de flujo subterráneo.



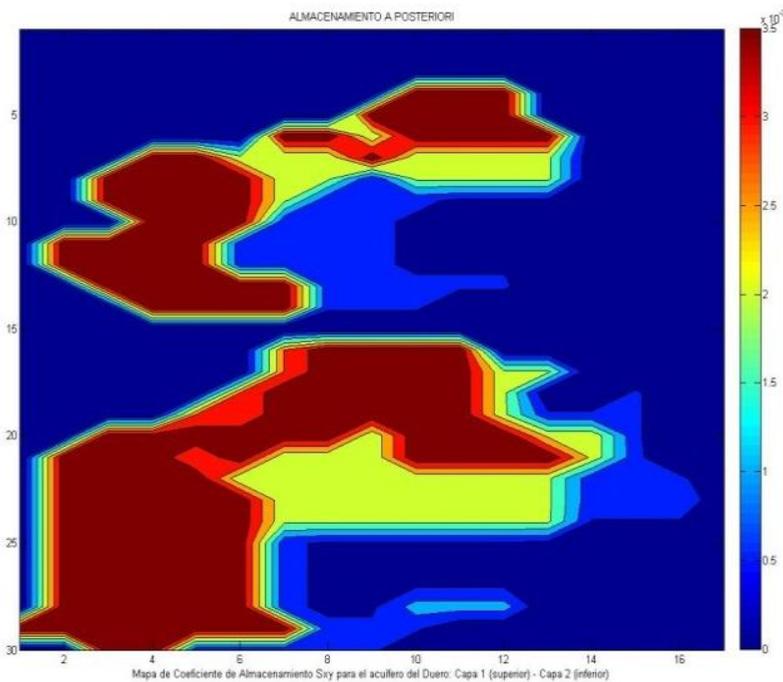
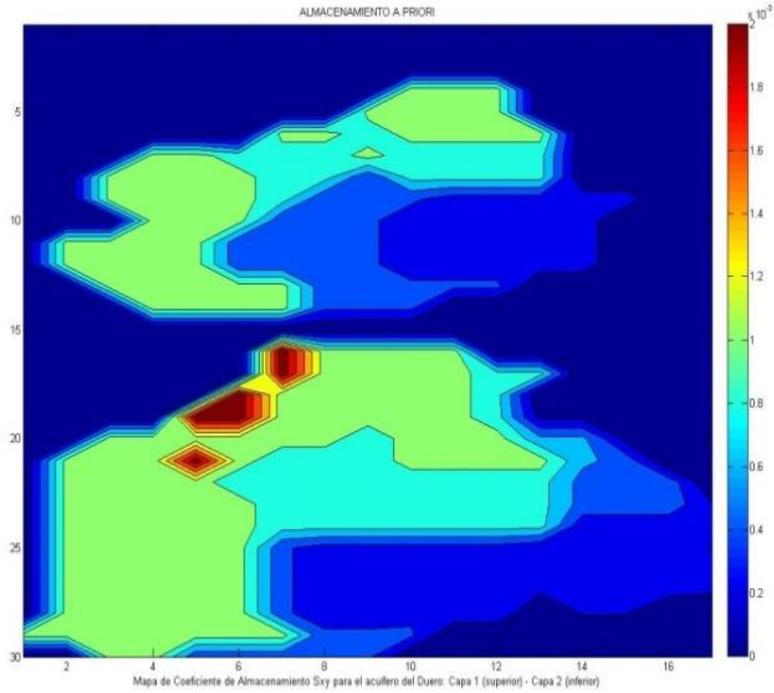
Figuras A2.6c,d. Funciones de distribución "a priori" y "a posteriori" para el parámetro de Almacenamiento (S) del modelo de flujo subterráneo.

En el caso del campo de conductividades (Figuras A2.7a,b,c,d), este no muestra un gran cambio respecto al campo original, con valores que oscilan entre los 0.5 y 3.0 m/día, coincidiendo con valores típicos de acuíferos de tipo detrítico. Por otro lado, el campo de almacenamientos sí que se modifica sustancialmente respecto al original, oscilando entre 0.5×10^{-3} y 3.5×10^{-3} , referente a valores típicos de acuíferos con relativo potencial de explotación.

Respecto a la frecuencia acumulada, se observó que la mayoría de las realizaciones (>80%) se correspondieron con valores de eficiencia (N) entre 0 y 1, lo que indicaría nuevamente la implicación del fenómeno de equifinalidad en la obtención de los parámetros del modelo. Alrededor de un 20% de las realizaciones corresponde con un $N > 0.80$, que indicaría una estimación robusta del caudal de descarga en el modelo de flujo y por consiguiente de los parámetros que utiliza.



Figuras A2.7a,b. Campos de conductividad "a priori" y "a posteriori" para el modelo de flujo subterráneo del Acuífero del Duero.



Figuras A2.7c,d. Campos de almacenamiento "a priori" y "a posteriori" para el modelo de flujo subterráneo del Acuífero del Duero.

Tras la aplicación de la metodología, los valores resultantes de los parámetros hidrogeológicos para el modelo de acuífero por Autovalores se presentan en la Tabla A2.4. Los valores iniciales, identificados como "GLUE a priori", provienen de datos de literatura para la litología presente en la zona, que comparados con los valores del modelo original en PMWIN-MODLFLOW, varían fuertemente.

Finalmente, los parámetros usados en la calibración volumétrica del modelo de acuífero por Autovalores se identifican como "GLUE a posteriori".

Tabla A2.4. Comparativa de los valores medios de los parámetros de Conductividad (K, en m/día) y Almacenamiento (S, adimensional) en zonas del acuífero del Duero.

Parámetro	Modelo Original	GLUE (a priori)	GLUE (a posteriori)
Kmed Capa1	1.772	1.761	1.898
Kmed Capa2	1.622	1.856	1.969
Smed Capa1	0.0017	0.0018	0.0020
Smed Capa2	0.0018	0.0019	0.0022

En las Figuras A2.8a,b y A2.9a,b se presentan los campos de conductividad y almacenamiento resultantes de la calibración volumétrica y de niveles piezométricos del modelo de acuífero por Autovalores que evalúa el uso conjunto de la cuenca del Duero.

La conductividad media obtenida para la Capa 1 es de 20.87m/día y en la Capa 2 de 18.80m/día, asociado a un valor de Nash de 0.88. Este valor se obtuvo como producto de lograr reproducir con una similitud del 91% el volumen de descarga observado en el acuífero y los niveles piezométricos observados con una similitud de 81%. A su vez, el almacenamiento medio obtenido en la Capa 1 fue del orden de 0.0108 y de 0.0125 en la Capa 2 del modelo de acuífero.

Tanto las conductividades como los almacenamientos calibrados para el modelo de acuífero son relativamente mayores a los obtenidos en la primera aplicación de la metodología GLUE (bajo calibración volumétrica), lo que nuevamente indica la presencia del problema de Equifinalidad, asociando conjuntos de parámetros distintos que reproducen, bajo la misma escala de similitud, las variables de interés.

La calibración conjunta en volumen y niveles piezométricos da una mayor certidumbre en los parámetros hidrogeológicos obtenidos para el modelo de acuífero que simula conjuntamente los recursos hídricos superficiales y subterráneos de una cuenca compleja con uso conjunto (caso particular de la cuenca hidrológica del Duero, España).

CAMPO DE CONDUCTIVIDADES ($K_{x,y}$), valores en m/día

CAPA 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1																	
2																	
3																	
4										15.5	15.4	15.3					
5									15.3	15.3	14.8	14.9					
6							15.4	15.4	14.6	14.5	14.5	14.2	15.4				
7			6.1	18.3	18.5	18.5	15.2	15.6	18.1	18.7	17.8	17.8					
8		6.0	5.9	5.5	6.5	18.7	14.7	37.2	17.8	18.4	18.2	17.8					
9		6.1	6.8	6.4	6.6	17.6	36.8	36.5	23.0	22.1	21.8	22.2	23.0	22.9			
10			13.2	12.3	12.5	36.6	36.7	36.3	22.3	22.8	22.9	22.8	21.8				
11	12.2	13.3	12.2	12.3	24.5	36.6	36.1	37.0	22.8	22.2	22.6	22.9	21.9				
12	12.7	13.3	13.4	12.4	25.1	36.9	36.1	35.9	21.9	22.1	22.8	22.6	22.4				
13		12.5	12.9	12.5	24.5	36.0	36.1	37.2	36.2	36.8	36.0						
14			14.5	14.7	24.8	36.8	36.9	36.0	36.7								
15																	
CAPA 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1						14.6	15.1	15.1	14.9	15.2							
2						15.6	15.5	14.4	15.4	15.4	14.5	15.1					
3					15.6	14.5	12.4	12.1	14.5	15.6	10.0			19.8			
4				15.0	15.2	15.1	13.4	13.1	15.5	15.4	10.6	19.7	19.1	20.0			
5		14.8	14.3	15.5	14.3	14.5	15.2	14.8	14.4	15.6	14.8	14.5	15.0	18.9			
6	15.6	14.2	15.6	15.2	14.2	14.6	15.4	14.6	15.1	15.1	15.1	14.6	15.9	15.7			
7	14.3	14.8	14.3	14.3	17.4	17.9	18.5	17.9	17.8	18.4	18.7	18.1	18.3	15.6	16.0		
8	15.5	14.4	15.0	14.3	14.4	18.1	18.2	18.2	17.7	17.6	18.3	18.2	18.2	15.2	15.9	19.7	
9	14.6	15.2	14.4	14.2	15.2	17.3	17.8	18.5	18.1	18.0	18.4	17.6	16.5	15.6	16.2	19.2	
10	16.2	15.2	15.0	24.7	24.5	24.8	22.8	22.8	22.7	23.0	22.7	24.8	25.3	16.2	20.0	19.8	
11	13.2	15.4	14.2	25.3	24.4	24.5	21.8	22.2	22.0	22.2	22.1	25.2	24.3	16.2	19.7	19.0	
12	12.4	14.4	15.3	25.4	25.3	36.2	22.6	22.0	21.9	22.0	21.7	25.3	25.1	15.3	19.8	19.7	
13	12.2	14.9	14.5	25.5	24.3	36.8	22.7	22.4	21.7	22.2	23.0		15.1	25.8			
14	12.8	12.6	12.2	14.4	14.3	22.1	22.9	36.8	37.2	37.0							
15			36.6	37.3	36.0	36.2	36.5	36.6	37.3								

Figuras A2.8a,b. Campo de conductividades calibrado para las Capas 1 y 2 del modelo de acuífero del Duero.

CAMPO DE ALMACENAMIENTOS (S), valores adimensionales

CAPA 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1																	
2																	
3																	
4										0.0121	0.0118	0.0126					
5									0.0119	0.0119	0.0135	0.0149					
6							0.0149	0.0118	0.0161	0.0119	0.0119	0.0182	0.0126				
7				0.0118	0.0119	0.0161	0.0161	0.0162	0.0135	0.0161	0.0161	0.0162	0.0162				
8			0.0119	0.0127	0.0119	0.0119	0.0160	0.0165	0.0088	0.0160	0.0165	0.0162	0.0161				
9			0.0123	0.0119	0.0119	0.0118	0.0163	0.0080	0.0082	0.0080	0.0057	0.0060	0.0060	0.0059	0.0067		
10				0.0118	0.0215	0.0118	0.0080	0.0086	0.0103	0.0057	0.0058	0.0056	0.0060	0.0059			
11		0.0117	0.0122	0.0120	0.0118	0.0081	0.0085	0.0081	0.0081	0.0061	0.0058	0.0060	0.0057	0.0055			
12		0.0120	0.0119	0.0118	0.0120	0.0080	0.0086	0.0080	0.0084	0.0073	0.0069	0.0058	0.0059	0.0056			
13			0.0119	0.0118	0.0119	0.0118	0.0118	0.0081	0.0080	0.0081	0.0083	0.0080					
14				0.0120	0.0118	0.0117	0.0117	0.0081	0.0082	0.0080							
15																	

CAPA 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1							0.0654	0.0119	0.0122	0.0124	0.0118						
2							0.0461	0.0118	0.0123	0.0119	0.0123	0.0174	0.0163				
3						0.0462	0.0124	0.0125	0.0118	0.0118	0.0125	0.0161			0.0026		
4					0.0468	0.0460	0.0117	0.0119	0.0121	0.0120	0.0118	0.0161	0.0023	0.0024	0.0025		
5			0.0123	0.0118	0.0119	0.0120	0.0182	0.0122	0.0161	0.0118	0.0118	0.0119	0.0089	0.0089	0.0024		
6		0.0135	0.0121	0.0118	0.0459	0.0119	0.0163	0.0358	0.0161	0.0118	0.0122	0.0120	0.0129	0.0104	0.0129		
7		0.0119	0.0144	0.0119	0.0118	0.0162	0.0164	0.0160	0.0161	0.0161	0.0160	0.0174	0.0174	0.0118	0.0115	0.0127	
8		0.0122	0.0119	0.0119	0.0120	0.0135	0.0161	0.0162	0.0164	0.0162	0.0163	0.0358	0.0164	0.0122	0.0121	0.0118	0.0049
9		0.0120	0.0315	0.0120	0.0118	0.0119	0.0161	0.0161	0.0161	0.0161	0.0208	0.0358	0.0163	0.0061	0.0053	0.0051	0.0058
10		0.0118	0.0129	0.0120	0.0122	0.0118	0.0091	0.0055	0.0056	0.0063	0.0055	0.0056	0.0050	0.0051	0.0056	0.0050	0.0049
11		0.0118	0.0126	0.0131	0.0119	0.0117	0.0081	0.0056	0.0073	0.0058	0.0057	0.0057	0.0049	0.0049	0.0056	0.0048	0.0049
12		0.0118	0.0118	0.0117	0.0126	0.0149	0.0080	0.0058	0.0062	0.0060	0.0059	0.0055	0.0051	0.0087	0.0050	0.0048	0.0049
13		0.0144	0.0118	0.0117	0.0120	0.0118	0.0080	0.0055	0.0059	0.0072	0.0087	0.0074		0.0050	0.0050		
14	0.0123	0.0124	0.0125	0.0120	0.0120	0.0120	0.0120	0.0080	0.0090	0.0080							
15			0.0119	0.0118	0.0080	0.0082	0.0081	0.0090	0.0080								

Figuras A2.9a,b. Campo de almacenamientos calibrado para las Capas 1 y 2 del modelo de acuífero del Duero.

Con estos parámetros hidrogeológicos, el modelo de acuífero logra reproducir un caudal de descarga por celdas en conexión con nivel constante del orden de 503hm³ y un caudal de descarga por celdas con conexión con ríos del orden de 59.7hm³, dando un total de caudal de salida del modelo de 562.8hm³, equivalentes a un 95% del volumen de entrada al modelo por recarga natural.

2.6. SÍNTESIS Y DISCUSIÓN

Se utilizó la metodología GLUE para obtener el conjunto de parámetros, asociado a un intervalo de confianza, que satisfaga las condiciones de aceptabilidad de eficiencia en la estimación del caudal de descarga por celdas con conexión río-acuífero en el modelo de flujo subterráneo de tipo lineal, por Autovalores. Se observó en los resultados la mejora en la estimación paramétrica de campos de conductividad y almacenamiento, tras la aplicación de la metodología de estimación de incertidumbre (GLUE), obteniéndose una mejora en el conocimiento del modelo y del acuífero estudiado. Se puso de manifiesto la presencia del fenómeno de equifinalidad y la dificultad añadida que esto supone para la calibración de un modelo de flujo subterráneo complejo.

Se concluye que la incertidumbre asociada al cálculo del caudal de descarga (hecha en las múltiples realizaciones), está mayormente relacionada con la estructura del modelo de flujo, más no tanto a la función de distribución asociada "a priori" para la definición de la distribución de parámetros aleatorios. Este tipo de incertidumbre puede tener su origen en la simplificación realizada de la estructura del modelo, al pasar del modelo de diferencias finitas de ModFlow al modelo por Autovalores en AQUIVAL 2.0.

Ante estos resultados, es necesario llevar a cabo posteriores estudios, con datos de campo (parámetros), los cuales reduzcan la incertidumbre asociada a los mismos, así como trabajar en un mayor detalle de la estructura del modelo de flujo usado. A su vez, será de gran importancia el identificar las posibles causas de variabilidad en los datos observados, fuente de comparación con los valores simulados, esto debido a variaciones temporales en la explotación de los recursos hídricos del sistema superficial y del acuífero estudiado, la influencia de períodos húmedos y secos, fenómenos climáticos y su relación con la recarga como dato de entrada del modelo de flujo.

Los parámetros medios (K y S) de la calibración volumétrica son la base para generar la serie de caudal adoptada como "Caudal observado". Esta serie ha sido usada posteriormente como serie de comparación de las realizaciones hechas en la implementación de la metodología GLUE ante la adición de nuevas restricciones de similitud: (i) la comparación de pocos niveles piezométricos observados y (ii) la comparación con la totalidad de los mismos.

"Lo poco que conozco carece de valor, comparado con lo que ignoro y no desespero en conocer".

René Descartes.

ANEJO 3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADO EN MASAS SUBTERRÁNEAS DEL DUERO

3.1. GENERALIDADES

Los modelos climáticos tienen como objetivo reproducir mediante expresiones matemáticas las variables que caracterizan al clima, por medio del análisis de posibles climas futuros, asociados a la aplicación de escenarios climáticos predictivos. Para realizar un proceso de modelación climática predictiva, es necesario tener como base un escenario de variación climática futura, comúnmente asociada a escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, producto del crecimiento poblacional y su desarrollo asociado.

A diferencia de un proceso de modelación del clima histórico, donde el modelo necesita ser calibrado, el proceso de simulación climática únicamente asocia una posible variación del clima futuro para las condiciones actuales de un modelo ya calibrado.

Tanto los modelos climáticos de circulación global acoplados océano atmósfera (MCGAO-A), como los de circulación regional (MCR), tienen asociado un escenario de emisión de gases de efecto invernadero. A partir de estos modelos climáticos, se generan escenarios de posibles fluctuaciones medias de las variables climáticas. Dichos escenarios son el producto final usado como dato de entrada a los modelos hidrológicos de una cuenca.

Mediante la aplicación de un incremento o reducción mensual de las variables climáticas sobre los datos históricos y, suponiendo que en el futuro se presentarán con la misma estacionalidad y variabilidad, se asume que el clima futuro (bajo la influencia de los escenarios climáticos), repercutirá sobre las variables hidrológicas de una cuenca, de manera positiva o negativa, incrementando, reduciendo o acentuando la estacionalidad de las variables climáticas sobre la cuenca.

3.2. TÉCNICAS DE BAJADA DE ESCALA (DOWNSCALING)

Las técnicas de bajada de escala o downscaling son utilizadas sobre los modelos globales para regionalizar los resultados climáticos, para conocer de forma más detallada los resultados de las variables climáticas, con lo que se toman en cuenta las características locales del clima. De acuerdo a Pérez (2012), existen dos tipos de técnicas:

- i. De tipo estadísticas, que consisten en establecer relaciones entre las variables climáticas generales y el clima específico.
- ii. De tipo dinámicas, las cuales asocian modelos numéricos climáticos sobre una malla densa, mejor conocido como “anidamiento” en un modelo de circulación global.

Las técnicas de tipo estadístico establecen correlaciones o analogías entre las principales variables climáticas observadas respecto de los resultados obtenidos con los modelos de circulación global. Una vez establecida la relación, se detalla la condición de clima futuro a una escala menor.

Para el ámbito europeo existen los proyectos PRUDENCE (2004) y ENSEMBLES (2009), los cuales tienen como objetivo la predicción regional del clima y de incertidumbre climática, el primero con una malla de 50km y 20km respectivamente. El proyecto PRUDENCE aplica diversos modelos globales sobre el ámbito europeo (HAD-AM3H del Centro Hadley del Reino Unido y el ECHAM4 del Instituto Max Planck de Alemania). En específico para los modelos regionales de España, estos son acopiados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), siendo los modelos regionales productos del proyecto PRUDENCE los presentados en la Figura A3.1, donde se realiza una bajada de escala desde una malla de 300km hasta una de 50km, de acuerdo a los datos de los escenarios de emisiones A2 y B2.

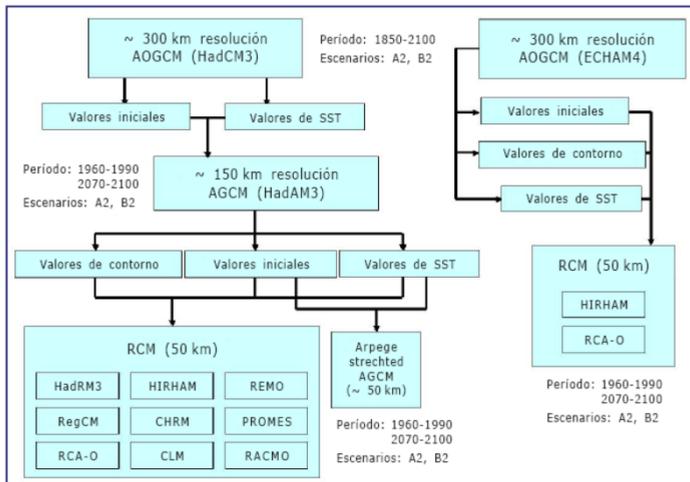


Figura A3.1. Resultados de técnicas dinámicas para la obtención de modelos climáticos regionales HADCM3 y ECHAM4. Fuente: IPCC4, 2006.

3.3. PROYECTO ENSEMBLES USADO POR LA AEMET PARA LA BAJADA DE ESCALA ESTADÍSTICA DE LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL

En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha usado el proyecto ENSEMBLES para la generación de escenarios climáticos regionalizados, usados como referente para elaborar estudios de impacto y vulnerabilidad específicos. La AEMET genera y suministra estimaciones cuantitativas de los cambios esperados en el clima sobre España, asociado a un valor de incertidumbre. El marco natural para evaluar las incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático es la aproximación probabilística, explorando un conjunto representativo de métodos de regionalización, modelos globales emisiones de gases de efecto invernadero, etc. Dicho conjunto define un “ensemble” que permite realizar una exploración de distintas fuentes de incertidumbre asociadas al clima específico de una región.

De acuerdo al Portal de Bajada de Escala (METEO, 2015), del proyecto ENSEMBLES, existen dos tipos principales de metodologías de bajada de escala: (i) la de tipo algorítmica (de tipo no generativa) y (ii) la basada en modelos (de tipo generativa). La técnica algorítmica se vale de analogías y tipos de clima para predecir el clima regional futuro; mientras que las técnicas basadas en modelos hacen uso de la regresión lineal, de modelos lineales generalizados, de redes neuronales y cuantiles de regresión para reproducir regionalmente el clima futuro.

La metodología seguida para establecer la variación de temperatura y precipitación en la zona de estudio, de acuerdo a la bajada de escala estadística elaborada en el portal europeo de ENSEMBLES es: (i) seleccionar las estaciones meteorológicas de referencia en la zona de estudio; (ii) extraer la información climática histórica de las estaciones, de acuerdo al período de análisis de interés; (iii) seleccionar el método estadístico de bajada de escala y (iv) obtener la predicción de cambio de las variables climáticas, de manera regionalizada.

3.4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN MASAS SUBTERRÁNEAS DEL DUERO

La evaluación del impacto de cambio climático regionalizado sigue los procesos de la Figura A3.2, los cuales se describe a continuación:

- i. A partir de los escenarios socio-económicos, se realizan proyecciones, estimaciones y modelos socio-económicos, indicadores del crecimiento poblacional y el desarrollo social y económico.
- ii. A cada escenario socio-económico se le asocia una estimación de emisiones, ligada a un determinado valor crecimiento y desarrollo, generando distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

-
- a. Recientemente se adopta el término de "forzamiento radiativo" para asociar trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero que dependen de distintos factores, en lugar de hablar de emisiones estimadas
 - iii. A partir de estos escenarios, se desarrollan escenarios climáticos, tomando en cuenta distintos modelos que de manera generalizada simulen el clima global.
 - a. Actualmente se habla de escenarios RCP (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5), asociados a trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero
 - iv. Dentro de un modelo climático global se puede anidar o reducir la escala del mismo, logrando estimar de manera regionalizada la variación del clima para una zona menor que en los modelos globales.
 - v. De los escenarios climáticos regionalizados se desprenden escenarios hidrológicos, desarrollados a partir de modelos que reproducen las variables hidrológicas de una cuenca.
 - vi. Para lograr escenarios hidrológicos regionalizados, se debe estimar la variación de temperatura (Δt) y precipitación (Δp) para horizontes temporales futuros de interés.
 - vii. Una vez obtenidas (Δt) y (Δp), es aplicado el incremento o reducción mensual sobre la serie histórica de temperatura y precipitación respectivamente.
 - viii. La nueva serie (modificada) se asume como la futura serie climática que posiblemente se presente en la zona de estudio. Se asume que los patrones de variabilidad climática históricos posiblemente se repitan en el futuro, por lo que sólo se incrementa o reduce en cantidad las variables estimadas en el clima futuro.
 - ix. Estas series climáticas se pueden usar para evaluación de escenarios de gestión futuros, que consideren el impacto del cambio climático sobre la variación en los patrones de temperatura y precipitación históricos.

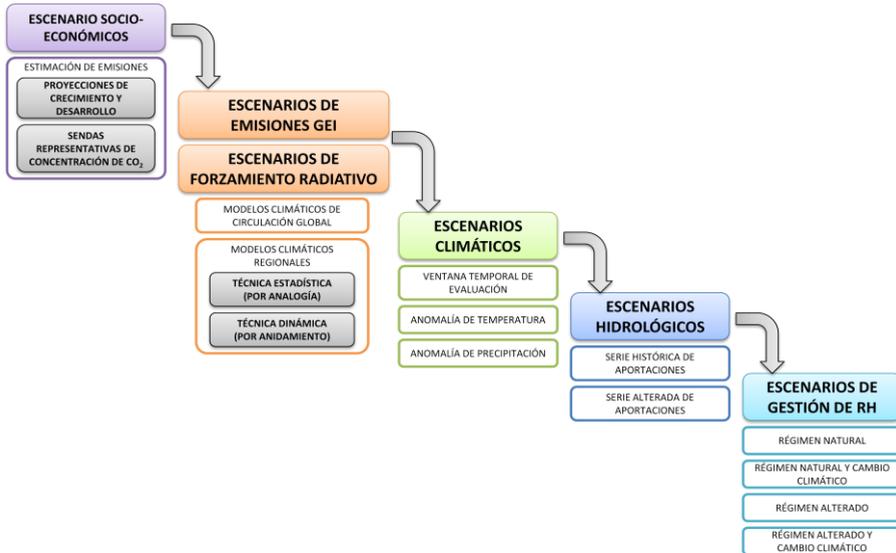


Figura A3.2. Proceso de evaluación del impacto del cambio climático regionalizado en escenarios de gestión de recursos hídricos. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Regionalización del impacto del cambio climático

Las denominadas "proyecciones regionalizadas" de cambio climático (llamados también escenarios climáticos), dan información sobre las estimaciones del clima futuro en las cuencas de España, convirtiéndolos en una herramienta necesaria para la evaluación de impactos y vulnerabilidad en sectores dependientes del uso y explotación del agua en los distintos sistemas de explotación de España, así como para analizar y diseñar políticas adecuadas para la adaptación de los sistemas a los efectos del cambio climático (AEMET, 2014).

De la página oficial de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), se han extraído los promedios de las variables climáticas de interés (precipitación y temperaturas máxima y mínima) para el estudio de la regionalización de impacto de cambio climático en las masas del acuífero del Duero. La información se extrajo a manera de archivos con formato TXT (con información de tipo puntual: datos para cada estación climática) y en formato TXT y SIG (para datos de tipo rejilla); además, se presentan figuras en las que se representa el promedio anual de las anomalías proyectadas para las sendas representativas de concentración 4.5, 6.0 y 8.5 (RCP, por sus siglas en inglés). Éstas se identifican por su forzamiento radiativo total para el año 2100, que varía desde 2,6 a 8,5 Wm⁻².

Los escenarios de emisión utilizados en el AR4 no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos

de los nuevos RCPs pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI.

Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono.

Los resultados que se presentan se refieren a 3 posibles forzamientos radiativos: 8,5 Wm⁻² (RCP8.5, en rojo), 6,0 Wm⁻² (RCP6.0, en ocre) y 4,5 Wm⁻² (RCP4.5, en azul). Estos resultados utilizan la información regionalizada en puntos correspondientes a observatorios y/o estaciones climáticas situadas en las distintas comunidades autónomas españolas.

La información presentada se refiere a dos tipos de resultados gráficos de proyecciones de cambio climático para el siglo XXI regionalizadas con métodos estadísticos y dinámicos: (i) gráficos de evolución para las comunidades autónomas de España y (ii) mapas de proyecciones puntuales para la España peninsular-Baleares y Canarias. A manera de resumen se muestran en la Figura A3.3 los distintos tipos de resultados gráficos que se presentarán, en función de los distintos modelos climáticos de proyección y de regionalización, así como de las variables climáticas representadas.

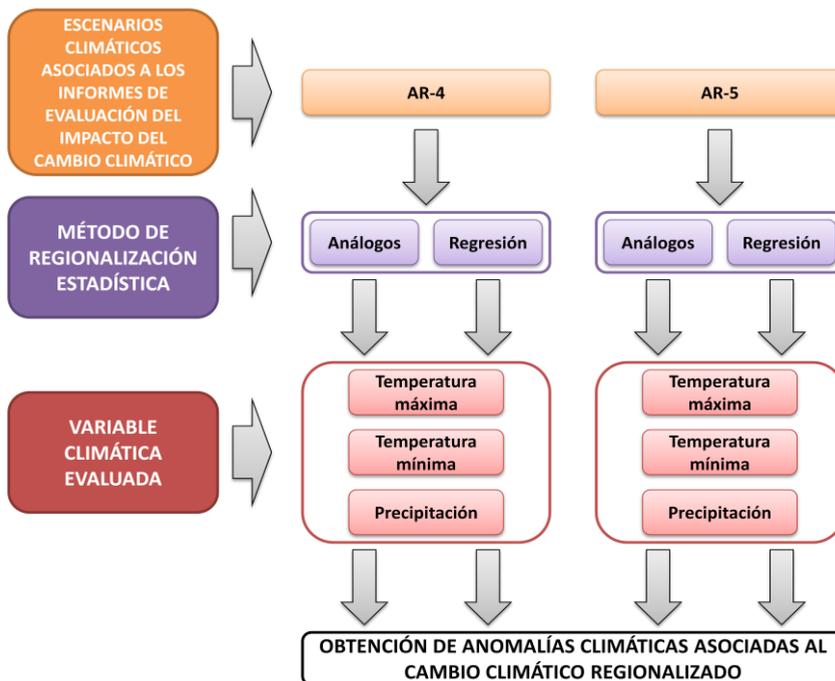


Figura A3.3. Comparativa de resultados de anomalías climáticas, para distintos escenarios climáticos y métodos de regionalización estadística. Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.1. Gráficos de evolución para las comunidades autónomas de España

La información presentada en "gráficos de evolución" de la página de AEMET se refiere tanto a valores medios como a extremos. Los valores medios (calculados anual y estacionalmente) se presenta en tipos de gráficos para las temperaturas máxima y mínima, unos que incluyen la evolución de todas las proyecciones obtenidas de todos los modelos utilizados y otros que muestra la evolución media (promediada sobre todos los modelos disponibles) de estas proyecciones así como su dispersión, expresada en un forma de "banda" de +/- una desviación estándar alrededor de la evolución media. En este último caso, a todas las proyecciones se les asigna el mismo peso y el número de modelos utilizados para cada escenario está indicado, entre paréntesis, en las respectivas figuras.

De acuerdo a AEMET (2014), en las proyecciones regionalizadas del AR4 los modelos procedentes del proyecto ENSEMBLES disponen de información para todo el siglo XXI mientras que los modelos del AR5 solo disponen de información para los periodos: 2046-2065 y 2081-2100. Estos periodos están marcados con bandas amarillas en los respectivos gráficos.

En las proyecciones regionalizadas del AR5 las gráficas están referidas a los cambios de las variables respecto al periodo de referencia 1961-1990 para ambos métodos estadísticos, de regresión y de análogos. Para el cambio de la precipitación, AEMET utiliza un filtro gaussiano en los métodos estadísticos y media móvil de 10 años en los dinámicos.

Otro timpo de información interesante que ofrece la AEMET en su página oficial es la referente a extremos (calculados anualmente). Esta información se presenta únicamente en forma de evolución media de cada uno de los extremos considerados así como su dispersión, expresada en forma de "banda" de +/- una desviación estándar alrededor de la evolución media. La información presentada corresponde a los siguientes índices de extremos:

- N^o días cálidos (DC): n^o de días con temperatura máxima superior al percentil 90 del periodo de referencia. Los cambios se expresan en porcentaje respecto al periodo de referencia.
- Duración olas de calor (DOC): n^o de días de la ola de calor (OC) más larga, definiéndose una OC como al menos 5 días consecutivos con T_{max} superior al percentil 90 del periodo de referencia. Los cambios se expresan en días respecto al periodo de referencia.
- N^o noches cálidas (NC): n^o de noches con temperatura mínima superior al percentil 90 del periodo de referencia. Los cambios se expresan en porcentaje respecto al periodo de referencia.

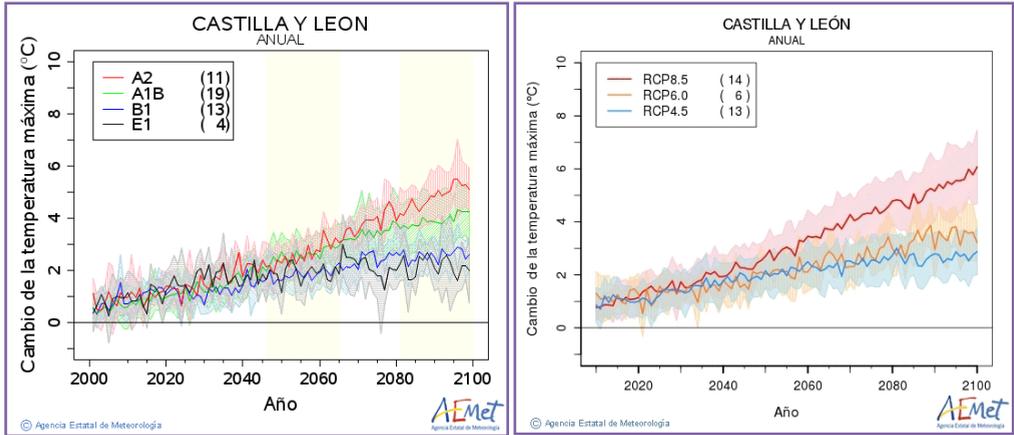
- N° días helada (DH): n° de días con temperatura mínima inferior a 0° C. Los cambios se expresan en días respecto al periodo de referencia.
- N° días lluvia (DL): n° de días con precipitación total igual o superior a 1 mm. Los cambios se expresan en días respecto al periodo de referencia.
- Precipitación intensa (PI): fracción de la precipitación total registrada en los días cuya precipitación en 24 h es superior al percentil 95 de la distribución de precipitaciones diarias (superiores a 1 mm) en un periodo de referencia. Los cambios se expresan en porcentaje respecto al periodo de referencia.
- Duración del periodo seco (PS): n° máximo de días consecutivos sin precipitación o con precipitaciones inferiores a 1 mm. Los cambios se expresan en días respecto al periodo de referencia.

En las Figuras A3.4a, 3.4b, 3.4c, 3.4d y 3.4e se muestran las proyecciones para el cambio de la temperatura máxima; en las Figuras A3.6a, 3.6b, 3.6c, 3.6d y 3.6e se presentan las proyecciones para la temperatura mínima; en las Figuras A3.8a, 3.8b, 3.8c, 3.8d y 3.8e se muestran las proyecciones para el cambio en la precipitación media y en las Figuras A3.10a, 3.10b, 3.10c, 3.10d y 3.10e se presenta el cambio para las precipitaciones intensas.

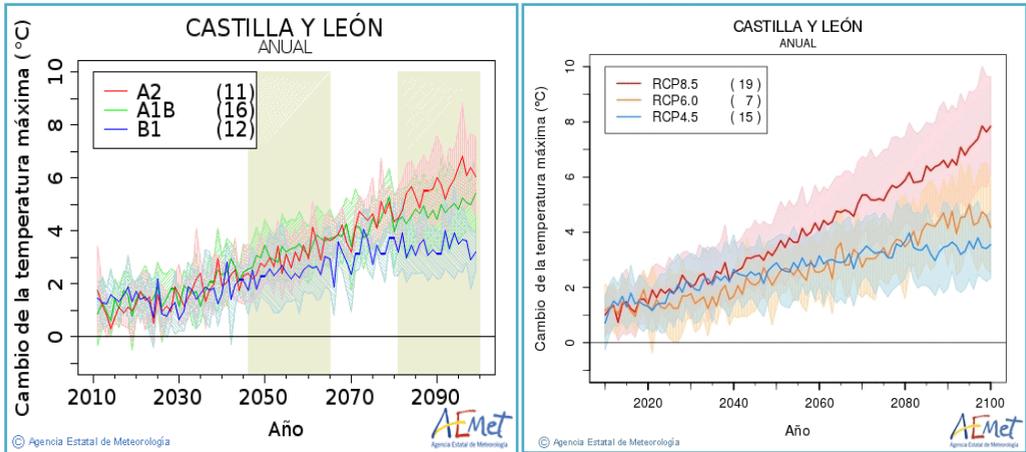
Los resultados de dichas figuras están asociados a los escenarios climáticos del AR4 y AR5, de acuerdo al método de regionalización estadística análoga, por regresión y dinámica de ENSEMBLES.

Las Figuras A3.5, A3.7, A3.9 y A3.11 concentran los resultados de la variación media anual de las temperaturas máxima y mínima y la variación de la precipitación media anual y la precipitación intensa, para el conjunto de escenarios climáticos y sus resultados para los modelos regionalizados que se han analizado.

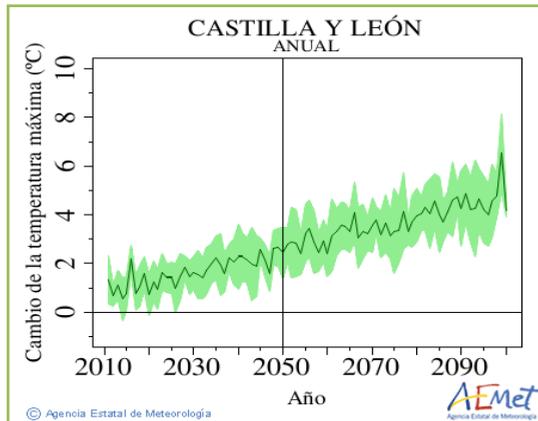
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA ANÁLOGA



REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA POR REGRESIÓN



REGIONALIZACIÓN DINÁMICA DE ENSEMBLES



Figuras A3.4a, 3.4b, 3.4c, 3.4d y 3.4e. Cambio de temperatura máxima (media anual, en °C) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.

Tabla A3.1. Cambio de Temperatura máxima (°C) . Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.

<i>Regionalización Estadística análoga</i>						
Periodo	AR4			AR5		
	B1	A1B	A2	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2046-2065	+1.82	+2.33	+2.45	+1.79	+1.88	+2.91
2081-2100	+2.15	+3.89	+4.52	+2.17	+3.06	+5.12
<i>Regionalización Estadística por regresión</i>						
2046-2065	+2.11	+3.24	+3.05	+2.27	+2.08	+3.84
2081-2100	+3.38	+4.39	+5.26	+2.69	+4.03	+6.28
<i>Regionalización Dinámica ENSEMBLES</i>						
Periodo	mín	med	máx			
2046-2065	+1.12	+2.23	+3.31			
2081-2100	+2.89	+4.05	+5.27			

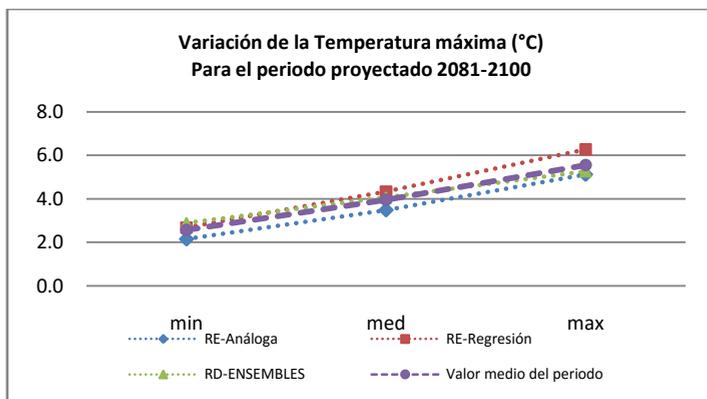
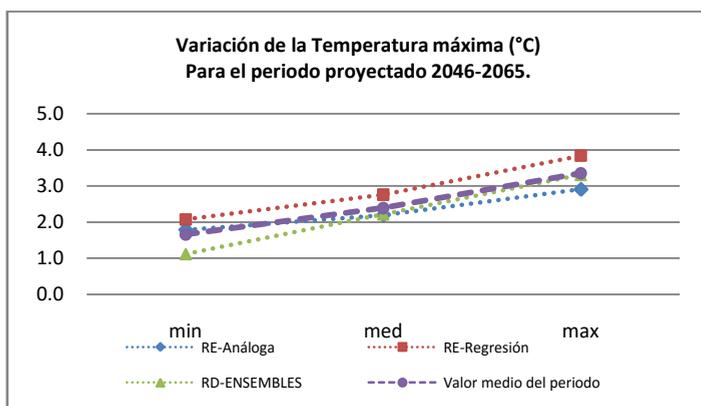
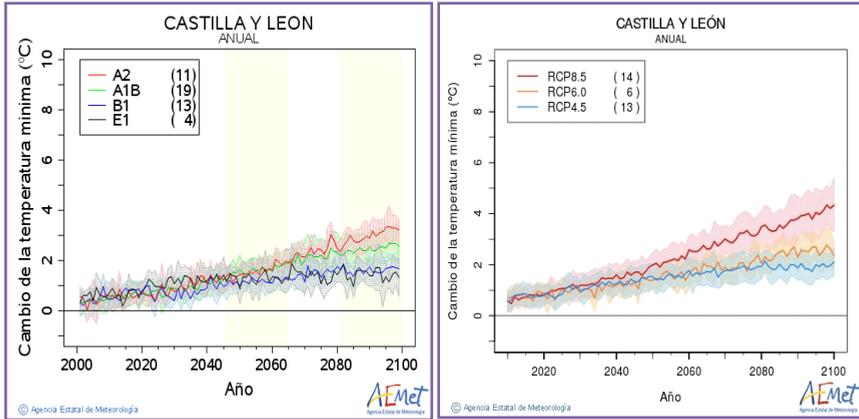


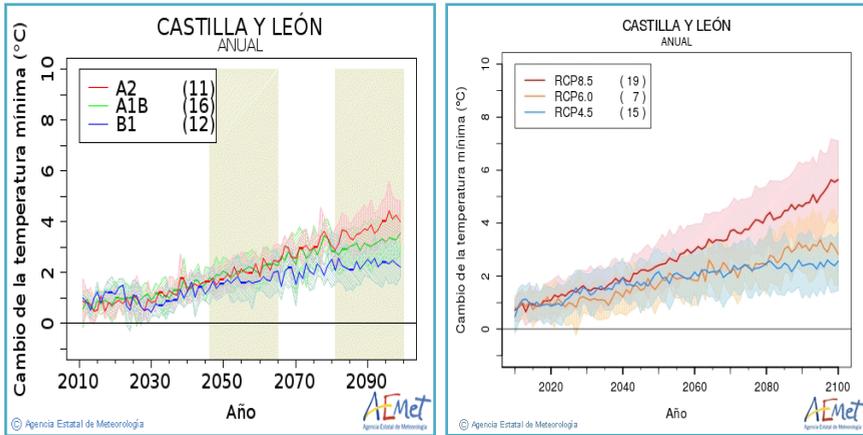
Figura A3.5a y 3.5b. Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.

De acuerdo a los datos analizados de la Tabla A3.1 y los gráficos antes presentados, se observa que en promedio, la variación proyectada para la temperatura máxima en el periodo 2046-2065 será del orden de +2.39°C. En el caso del periodo 2081-2100, la media de la temperatura máxima variará en +3.96°C.

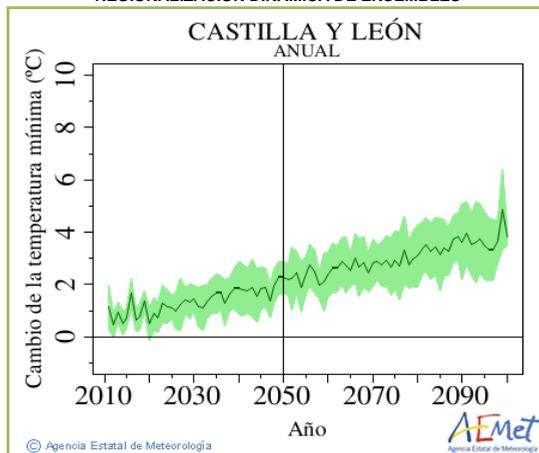
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA ANÁLOGA



REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA POR REGRESIÓN



REGIONALIZACIÓN DINÁMICA DE ENSEMBLES



Figuras A3.6a, 3.6b, 3.6c, 3.6d y 3.6e. Cambio de temperatura mínima (media anual, en °C) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.

Tabla A3.2. Cambio de Temperatura mínima (°C). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.

<i>Regionalización Estadística análoga</i>						
Periodo	AR4			AR5		
	B1	A1B	A2	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2046-2065	+1.94	+2.15	+2.28	+1.18	+1.27	+2.14
2081-2100	+2.09	+3.21	+4.32	+1.44	+1.83	+3.01
<i>Regionalización Estadística por regresión</i>						
2046-2065	+1.88	+2.07	+2.01	+1.96	+1.84	+2.34
2081-2100	+2.08	+3.02	+3.34	+2.04	+2.38	+4.21
<i>Regionalización Dinámica ENSEMBLES</i>						
Periodo	mín	med	máx			
2046-2065	+0.77	+2.02	+2.37			
2081-2100	+2.21	+3.15	+4.41			

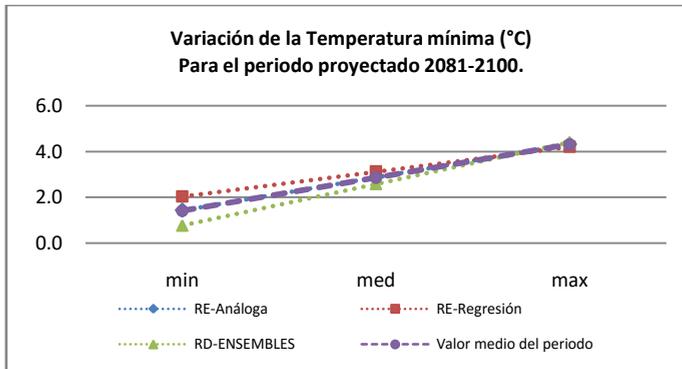
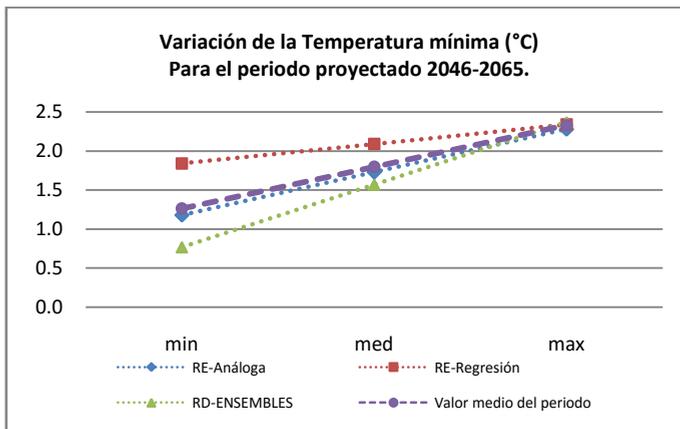
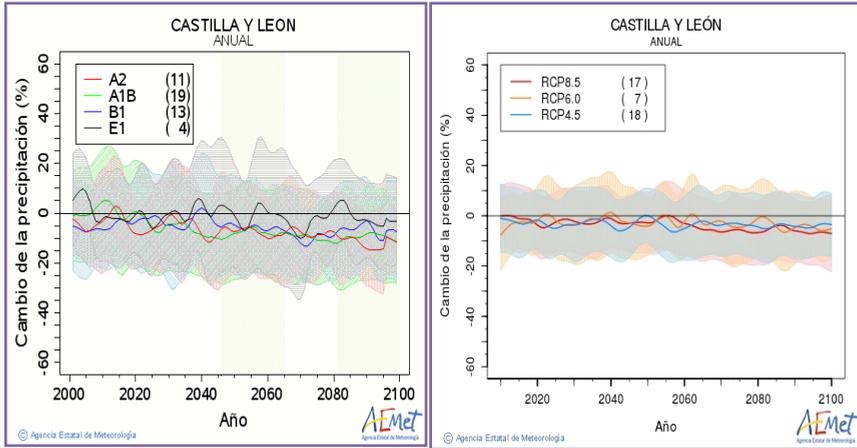


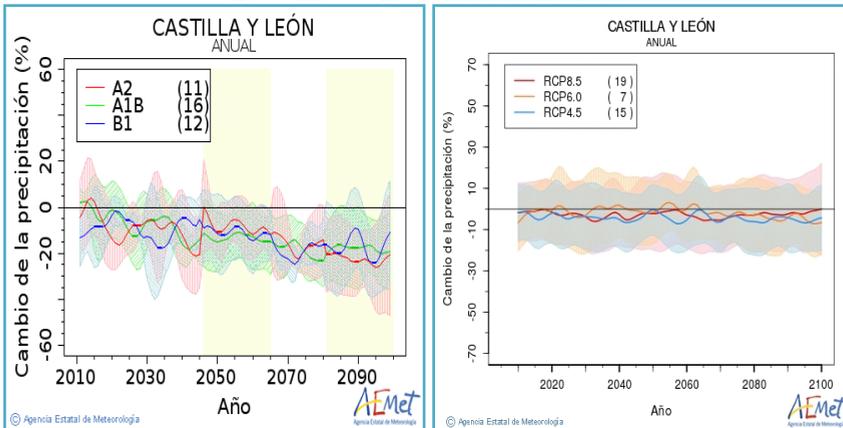
Figura A3.7a y 3.7b. Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.

De acuerdo a los datos analizados de la Tabla A3.2 y los gráficos de este apartado, se observa que en promedio, variación proyectada para la temperatura mínima en el periodo 2046-2065 será del orden de +1.80°C. En el caso del periodo 2081-2100, la media de la temperatura máxima variará en +2.87°C.

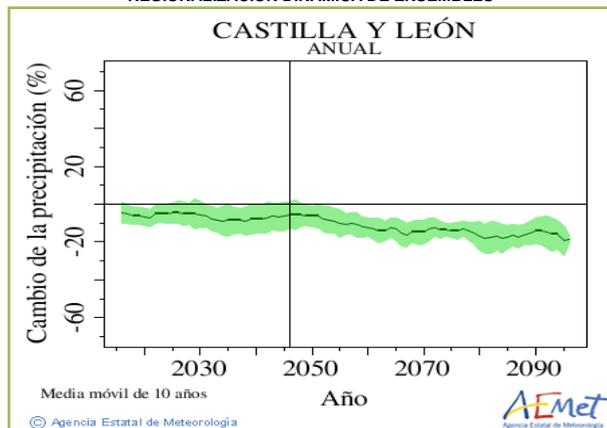
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA ANÁLOGA



REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA POR REGRESIÓN



REGIONALIZACIÓN DINÁMICA DE ENSEMBLES



Figuras A3.8a, 3.8b, 3.8c, 3.8d y 3.8e. Cambio en la precipitación media anual (en %) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.

Tabla A3.3. Cambio en la Precipitación media anual (en %). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.

<i>Regionalización Estadística análoga</i>						
Periodo	AR4			AR5		
	B1	A1B	A2	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2046-2065	-3.8	-6.2	-8.3	-2.6	-4.3	-3.7
2081-2100	-4.2	-6.5	-12.3	-4.1	-3.9	-8.4
<i>Regionalización Estadística por regresión</i>						
2046-2065	-9.4	-12.6	-8.1	-3.4	+1.2	-2.9
2081-2100	-12.2	-13.7	-19.4	-5.1	-2.7	-1.8
<i>Regionalización Dinámica ENSEMBLES</i>						
Periodo	mín	med	máx			
2046-2065	-12.8	-6.3	-0.2			
2081-2100	-23.7	-11.2	-5.4			

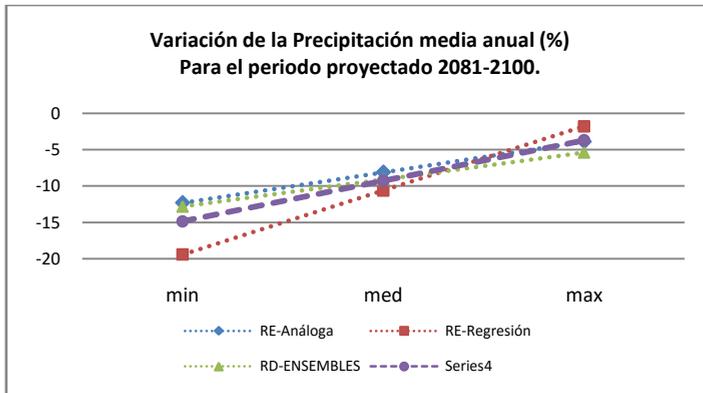
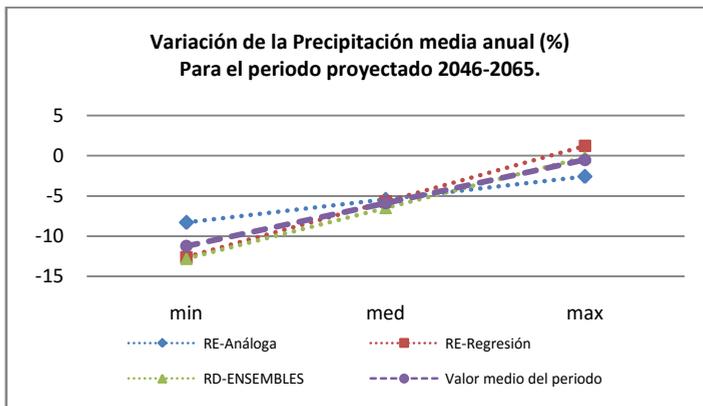
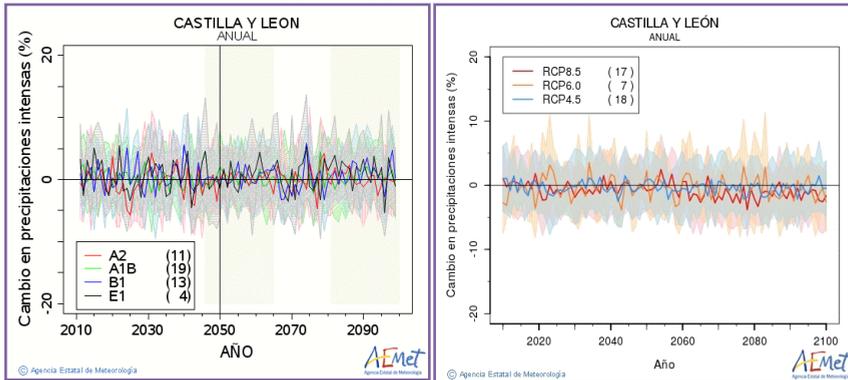


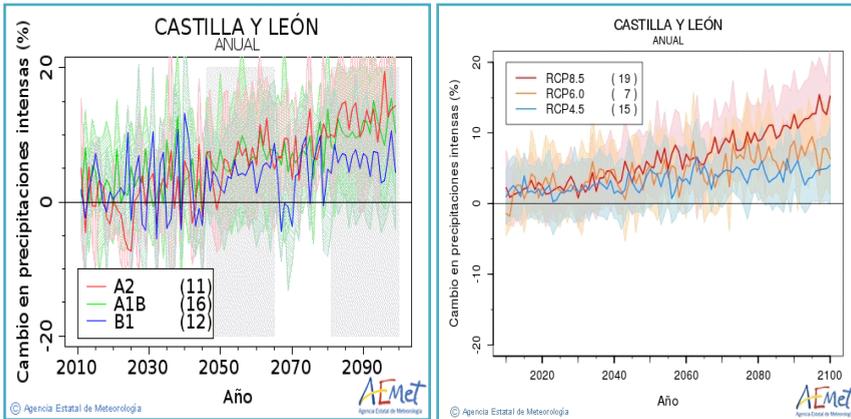
Figura A3.9a y 3.9b. Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos, para los dos periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.

De acuerdo a los datos analizados de la Tabla A3.3 y los gráficos de este apartado, se observa que (en media) el cambio en la Precipitación media anual para el periodo 2046-2065 será del orden de -5.88%. En el caso del periodo 2081-2100, la media del cambio en la Precipitación sera de -9.27% anual.

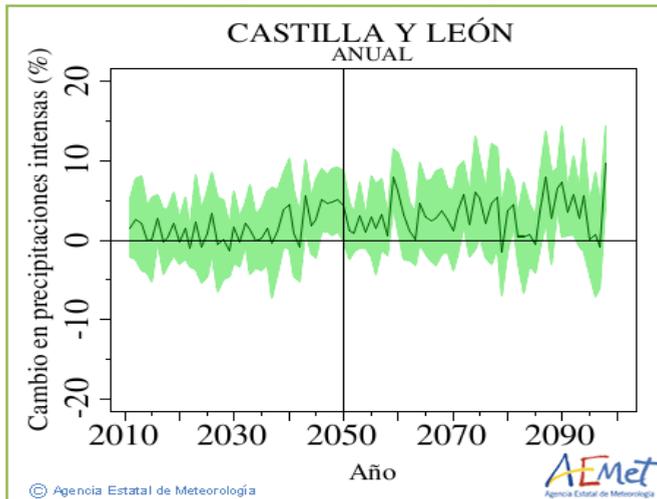
REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA ANÁLOGA



REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA POR REGRESIÓN



REGIONALIZACIÓN DINÁMICA DE ENSEMBLES



Figuras A3.10a, 3.10b, 3.10c, 3.10d y 3.10e. Cambio en las precipitaciones intensas (en %) para los escenarios AR4 y AR5 y distintas regionalizaciones. Fuente: AEMET, 2014.

Tabla A3.4. Variación anual en las Precipitaciones intensas (en %). Fuente: Síntesis realizada de datos de AEMET, 2014.

<i>Regionalización Estadística análoga</i>						
Periodo	AR4			AR5		
	B1	A1B	A2	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2046-2065	+0.3	+1.1	+2.2	-0.5	-0.2	-1.1
2081-2100	+3.9	+2.6	-0.8	-1.1	-1.4	-2.6
<i>Regionalización Estadística por regresión</i>						
2046-2065	+5.2	+7.7	+7.1	+4.4	+4.9	+7.3
2081-2100	+6.9	+10.3	+12.4	+3.1	+5.7	+10.9
<i>Regionalización Dinámica ENSEMBLES</i>						
Periodo	mín	med	máx			
2046-2065	+0.7	+4.9	+9.2			
2081-2100	+1.3	+5.2	+11.3			

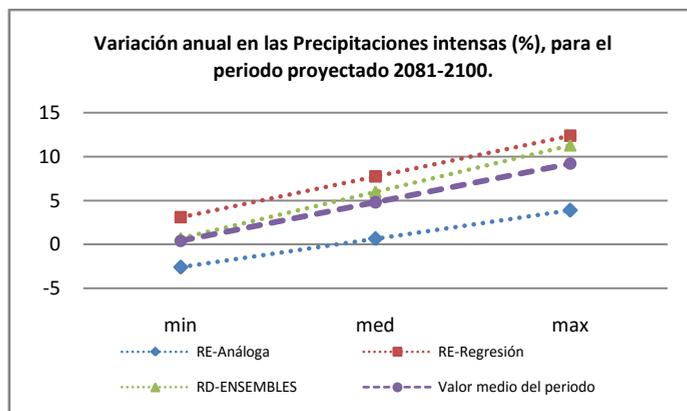
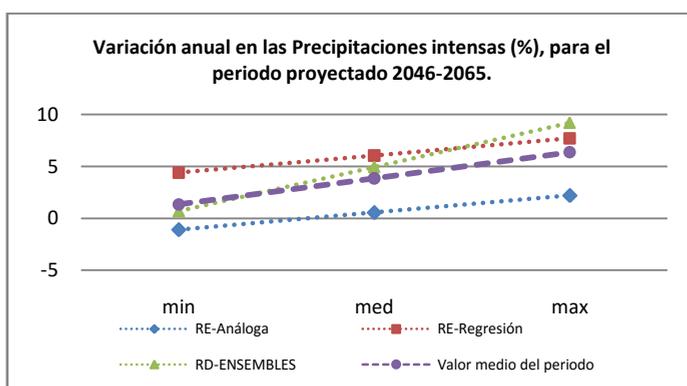


Figura A3.11a y 3.11b. Variación de la temperatura máxima (°C) como promedio de los distintos escenarios climáticos y para los periodos de análisis. Fuente: AEMET, 2014.

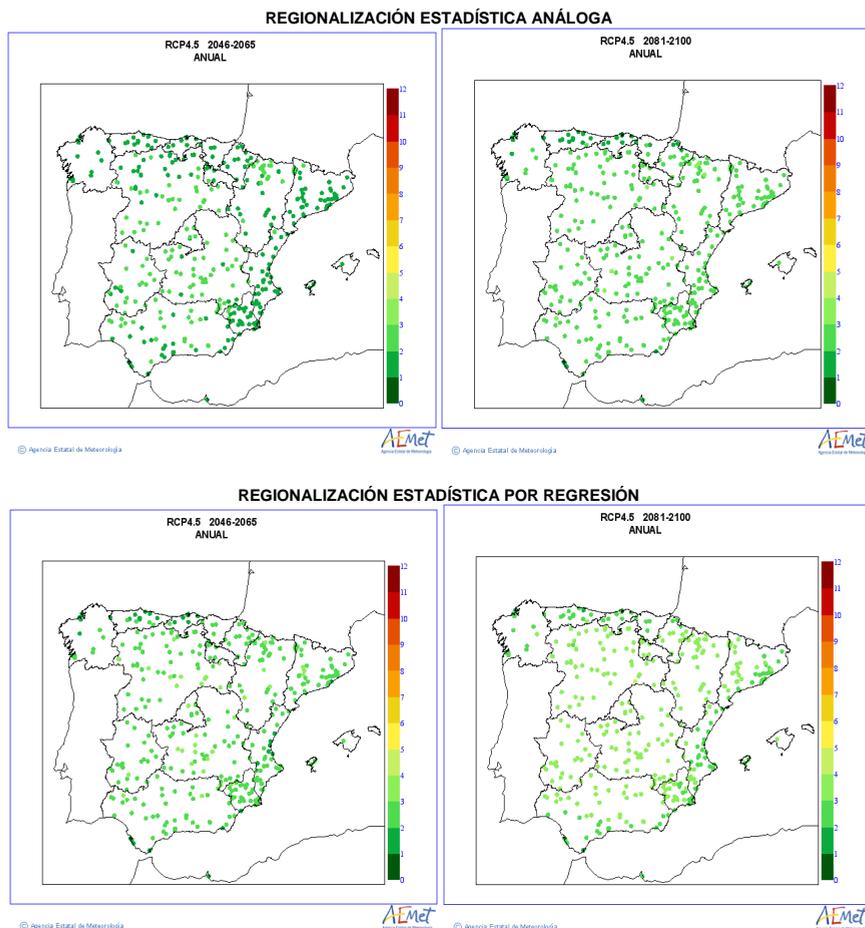
De acuerdo a los datos analizados de la Tabla A3.4 y los gráficos de este apartado, se observa que (en media) la variación anual en las Precipitaciones intensas para el periodo 2046-2065 será del orden de +3.85%. En el caso del periodo 2081-2100, la media de la variación de las Precipitaciones intensas sera de 4.80% anual.

3.4.1.2. *Mapas de proyecciones puntuales para la España Peninsular-Baleares y Canarias*

De acuerdo a AEMET (2014), la información presentada en "mapas de proyecciones" se refiere a dos conjuntos de mapas, para representar los cambios en los valores medios de dos periodos del siglo XXI: 2046-2065 y 2081-2100, calculados anual y estacionalmente, y en la parte inferior su correspondiente incertidumbre (dos desviaciones estándar). A todas las proyecciones se les asigna el mismo peso. En las proyecciones regionalizadas con modelos del AR5, de acuerdo a AEMET, los mapas están referidos a los cambios de las variables respecto al periodo de referencia 1961-1990 para ambos métodos estadísticos.

El conjunto de figuras presentado compara los resultados de proyección de cambio en las respectivas variables climáticas para las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100, en función del método de regionalización y los escenarios de las sendas representativas de concentración de CO₂ (RCP's 4.5, 6.0 y 8.5), de acuerdo a como se describe a continuación:

- i. Para el Escenario Climático del RCP 4.5, en las Figuras A3.12a, 3.12b, 3.12c y 3.12d se muestran las proyecciones del valor medio anual de la temperatura máxima, con regionalización estadística análoga (figuras a y b) y por regresión (figuras c y d); en las Figuras A3.13a,3.13b, 3.13c y 3.13d se representa la proyección del valor medio anual de la temperatura mínima, con regionalización estadística análoga y por regresión respectivamente; y en las Figuras A3.14a, 3.14b, 3.14c y 3.14d se muestra la proyección de la precipitación media anual, para la regionalización estadística análoga y por regresión.
- ii. Para el Escenario Climático del RCP 6.0, en las Figuras A3.15a, 3.15b, 3.15c y 3.15d se muestran las proyecciones del valor medio anual de la temperatura máxima, con regionalización estadística análoga (figuras a y b) y por regresión (figuras c y d); en las Figuras A3.16a,3.16b, 3.16c y 3.16d se representa la proyección del valor medio anual de la temperatura mínima, con regionalización estadística análoga y por regresión respectivamente; y en las Figuras A3.17a, 3.17b, 3.17c y 3.17d se muestra la proyección de la precipitación media anual, para la regionalización estadística análoga y por regresión.
- iii. Para el Escenario Climático del RCP 8.5, en las Figuras A3.18a, 3.18b, 3.18c y 3.18d se muestran las proyecciones del valor medio anual de la temperatura máxima, con regionalización estadística análoga (figuras a y b) y por regresión (figuras c y d); en las Figuras A3.19a,3.19b, 3.19c y 3.19d se representa la proyección del valor medio anual de la temperatura mínima, con regionalización estadística análoga y por regresión respectivamente; y en las Figuras A3.20a, 3.20b, 3.20c y 3.20d se muestra la proyección de la precipitación media anual, para la regionalización estadística análoga y por regresión.

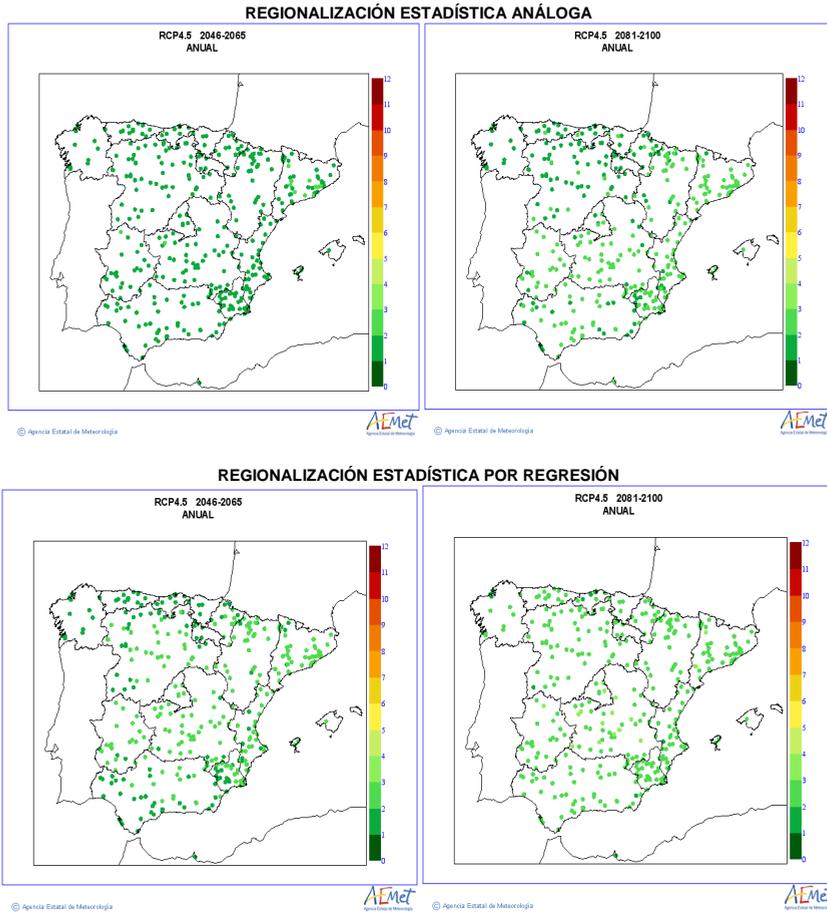


Figuras A3.12a, 3.12b, 3.12c y 3.12d. Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.5 resume los valores medios de la Temperatura máxima (°C) en el escenario RCP 4.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.5. Variación media anual de Temperatura Máxima (°C) para el escenario climático RCP 4.5

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística	2046-2065	2081-2100
Análogo	+2.24	+4.37
Por Regresión	+2.61	+4.48

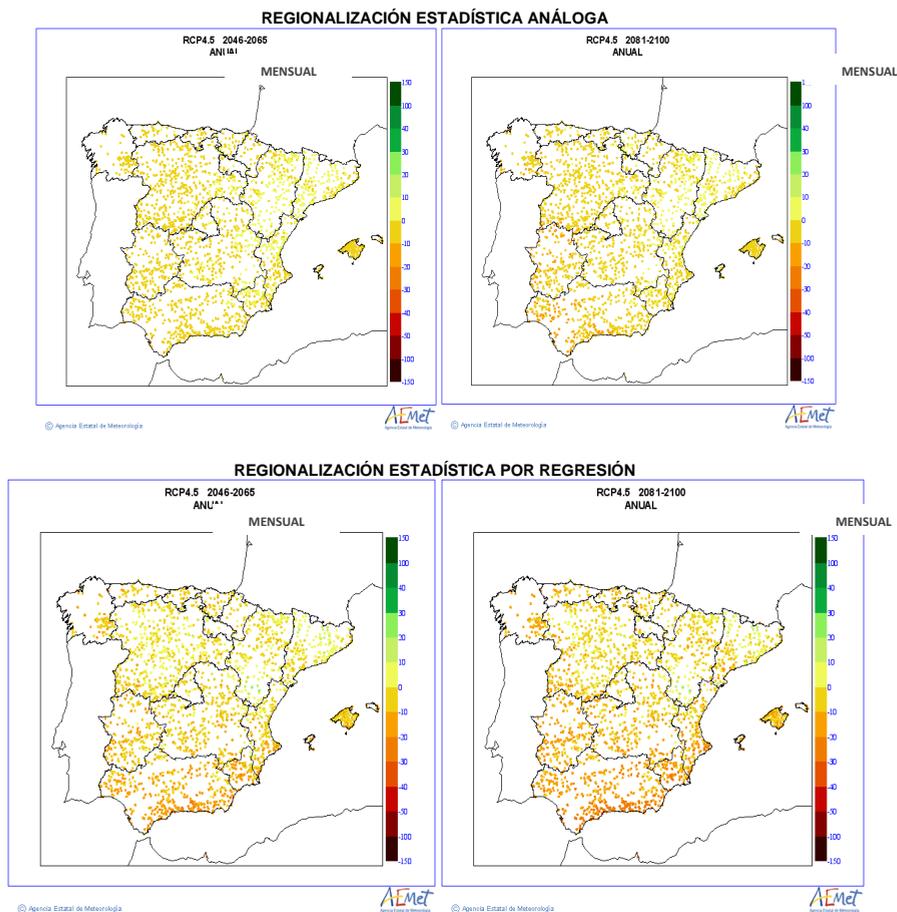


Figuras A3.13a, 3.13b, 3.13c y 3.13d. Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.6 resume los valores medios de la Temperatura mínima (°C) en el escenario RCP 4.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.6. Variación media anual de Temperatura Mínima (°C) para el escenario climático RCP 4.5

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística Análoga	+1.06	+2.06
Por Regresión	+1.85	+2.79

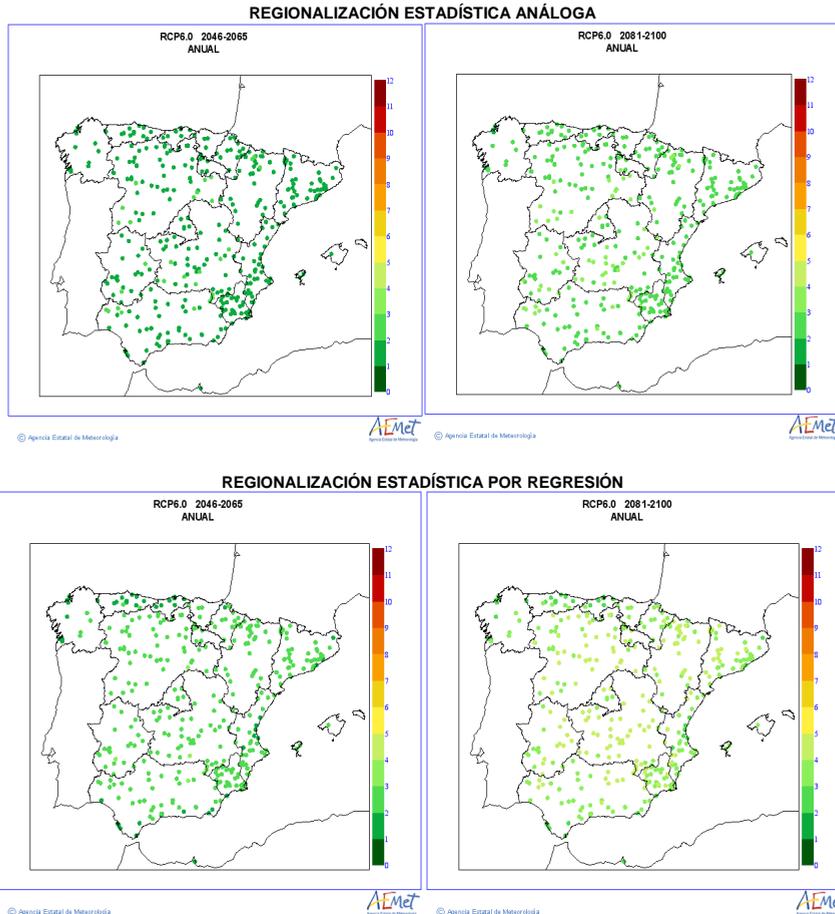


Figuras A3.14a, 3.14b, 3.14c y 3.14d. Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 4.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.7 resume los valores medios de la variación de Precipitación anual (mm) en el escenario RCP 4.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de precipitación media.

Tabla A3.7. Variación media mensual de la Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 4.5

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	Estadística 2046-2065	2081-2100
Análoga	-5.20	-10.64
Por Regresión	-3.38	-7.17

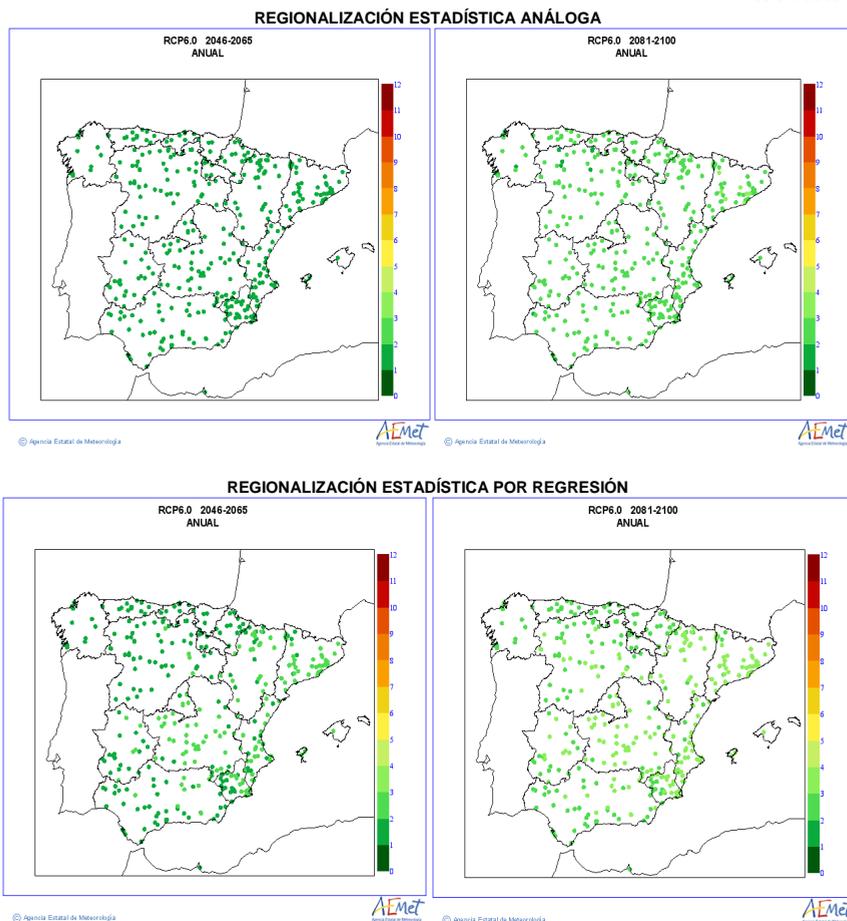


Figuras A3.15a, 3.15b, 3.15c y 3.15d. Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.8 resume los valores medios de la Temperatura máxima (°C) en el escenario RCP 6.0, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.8. Variación media anual de Temperatura Máxima (°C) para el escenario climático RCP 6.0

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística		
Análoga	+2.69	+4.86
Por Regresión	+3.39	+5.21

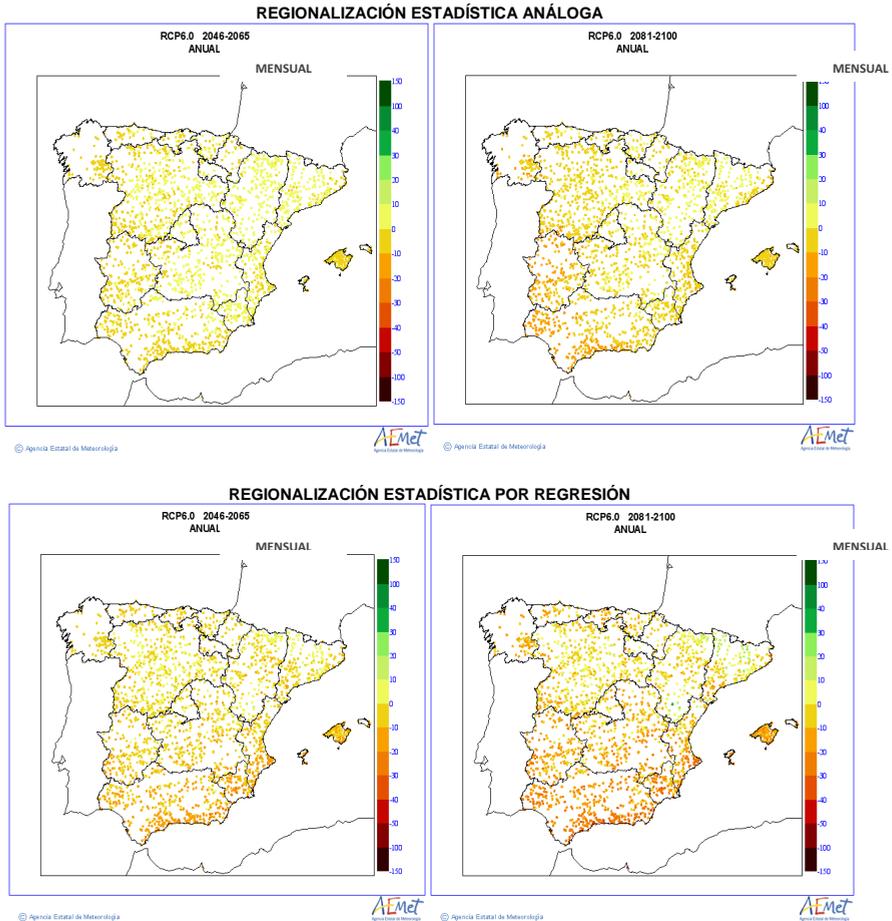


Figuras A3.16a, 3.16b, 3.16c y 3.16d. Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.9 resume los valores medios de la Temperatura mínima (°C) en el escenario RCP 6.0, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.9. Variación media anual de Temperatura Mínima (°C) para el escenario climático RCP 6.0

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	Estadística 2046-2065	2081-2100
Análoga	+1.26	+2.29
Por Regresión	+1.88	+3.05

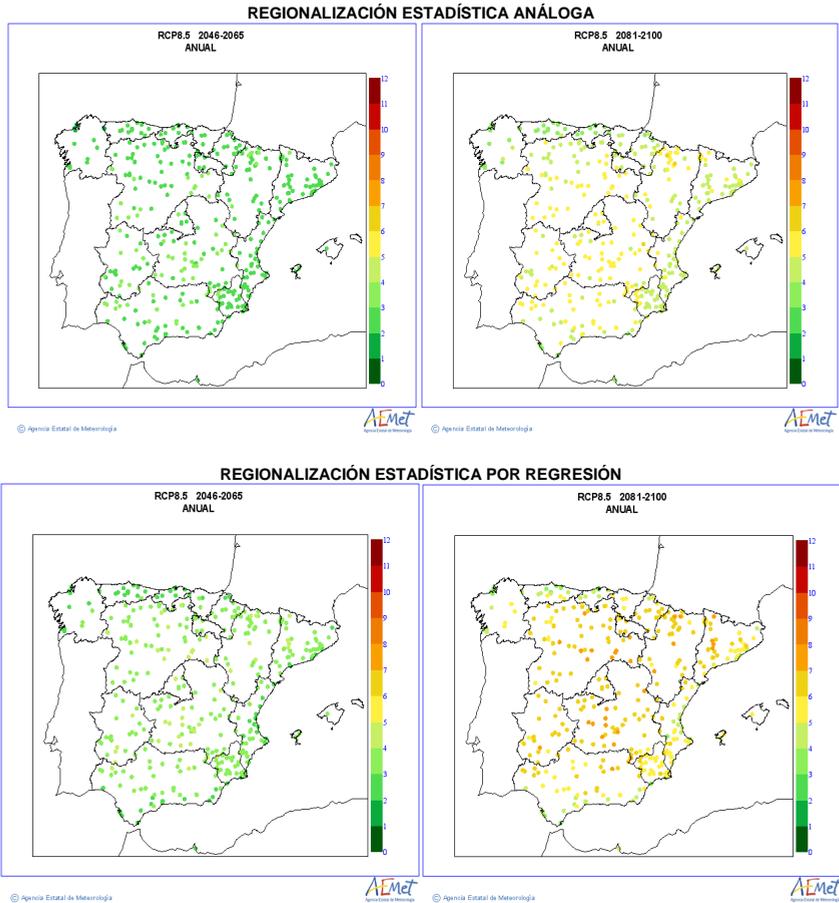


Figuras A3.17a, 3.17b, 3.17c y 3.17d. Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 6.0 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.10 resume los valores medios de la variación de la Precipitación anual (mm) en el escenario RCP 6.0, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de precipitación media.

Tabla A3.10. Variación media anual de Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 6.0

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística	2046-2065	2081-2100
Análoga	-8.53	-13.52
Por Regresión	-5.54	-11.77

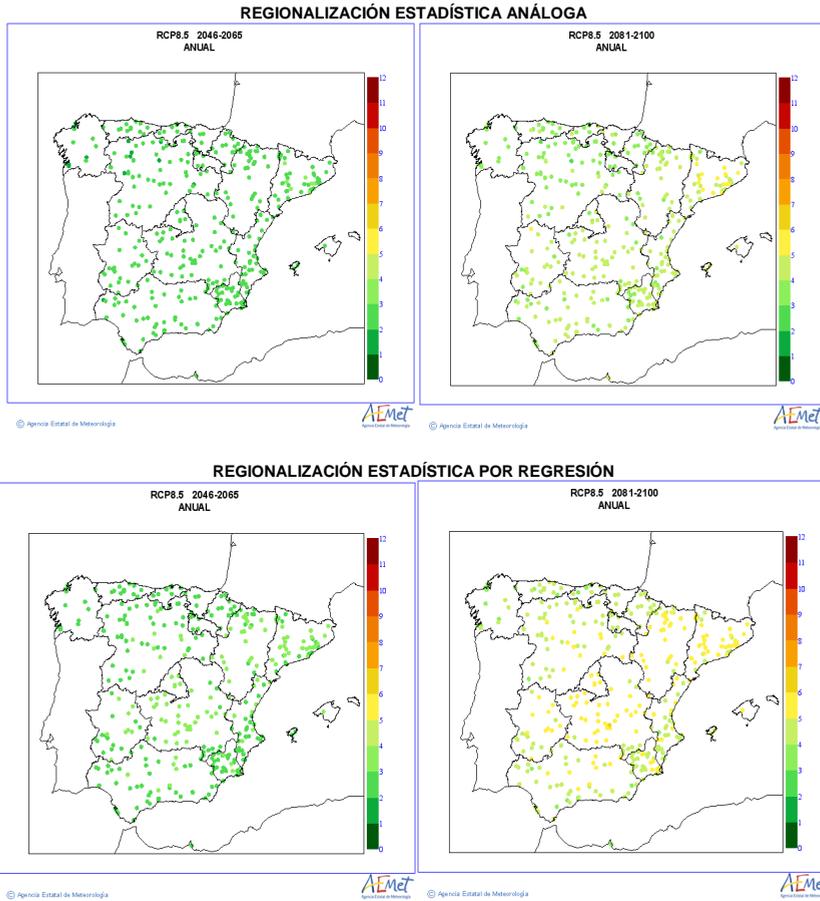


Figuras A3.18a, 3.18b, 3.18c y 3.18d. Valor medio anual de la temperatura máxima (°C) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.11 resume los valores medios de la Temperatura máxima (°C) en el escenario RCP 8.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.11. Variación media anual de Temperatura Máxima (°C) para el escenario climático RCP 8.5

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística		
Análoga	+4.41	+6.80
Por Regresión	+5.01	+7.21

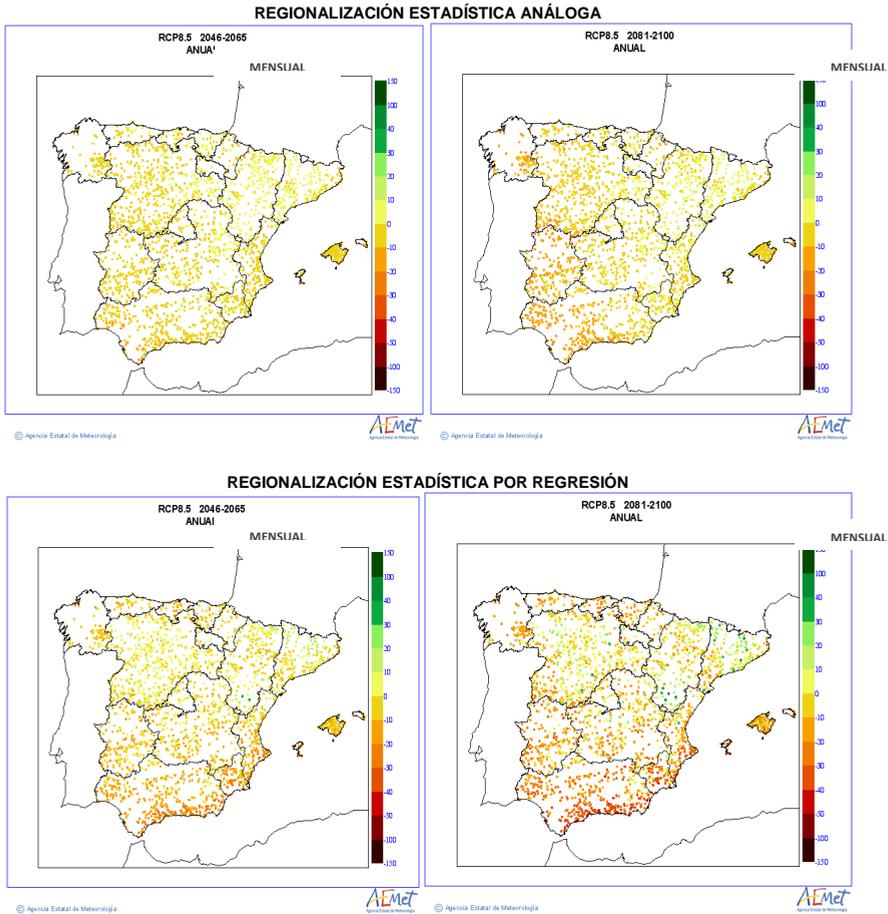


Figuras A3.19a, 3.19b, 3.19c y 3.19d. Valor medio anual de la temperatura mínima (°C) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

La Tabla A3.12 resume los valores medios de la Temperatura mínima (°C) en el escenario RCP 8.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de temperatura media.

Tabla A3.12. Variación media anual de Temperatura Mínima (°C) para el escenario climático RCP 8.5

Tipo de Regionalización	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Estadística Análoga	+2.08	+3.20
Por Regresión	+2.88	+4.06



Figuras A3.20a, 3.20b, 3.20c y 3.20d. Valor medio anual de la variación en la precipitación (en mm) para el RCP 8.5 y las ventanas temporales indicadas. Fuente: AEMET, 2014.

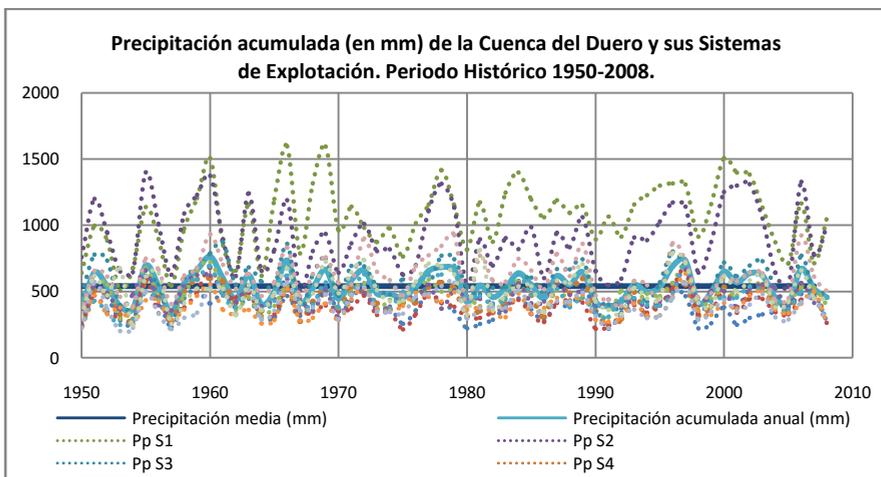
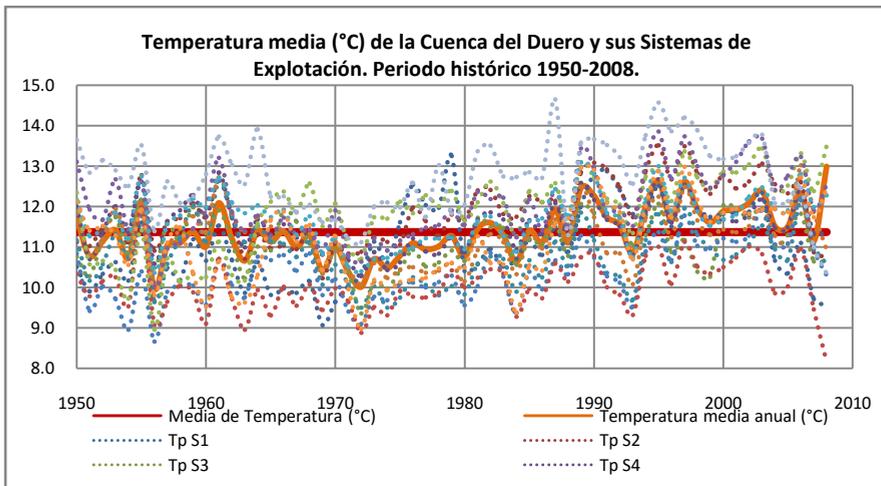
La Tabla A3.13 resume los valores medios de la variación de la Precipitación anual (mm) en el escenario RCP 8.5, que posteriormente es utilizada para modificar por cambio climático a la serie histórica de precipitación media.

Tabla A3.13. Variación media mensual de Precipitación (mm) para el escenario climático RCP 8.5

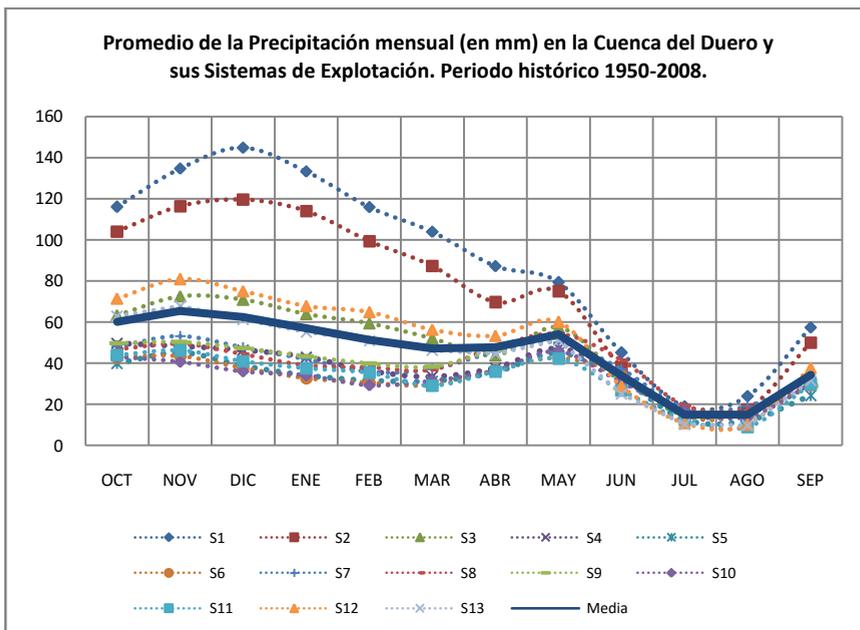
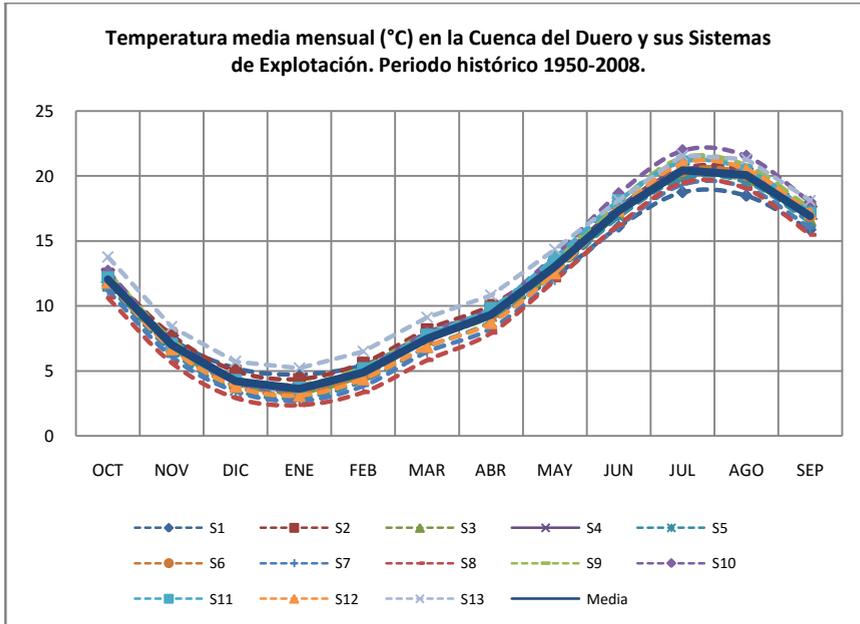
Tipo de Regionalización Estadística	Ventana Temporal	
	2046-2065	2081-2100
Análoga	-8.80	-13.75
Por Regresión	-5.75	-12.14

3.4.2. Comparación de los datos históricos de Precipitación y Temperatura media, respecto de las anomalías climáticas regionalizadas para los Sistemas de Explotación del Duero.

En este apartado primero se exponen los datos históricos de precipitación (P_p) y temperatura media (T_p) de los Sistemas de Explotación de la Cuenca del Duero. Primero, en las Figuras A3.21a y 21b se muestran las series históricas de P_p y T_p , para el periodo 1950-2008; después, en las Figuras A3.22a y 3.22b se exponen los valores mensuales de las mismas series, para la precipitación y temperatura medias. Posteriormente, se comparan los datos históricos con los datos provenientes de los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, tanto en media anual como mensual.



Figuras A3.21a y 3.21b. Serie de Temperatura media y Precipitación acumulada históricas en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.



Figuras A3.22a y 3.22b. Series de Temperatura media mensual y Precipitación promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.1. Resultados para la Temperatura media de los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, con regionalización estadística análoga

Los resultados de Temperatura para los escenarios climáticos analizados, considerando las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100, se comparan con las medias de precipitación histórica de los Sistemas de Explotación del Duero.

En las Figuras A3.23a, 3.23b y 3.23c se presenta la comparación del promedio de la temperatura media anual de los sistemas de explotación y su valor medio para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, que son comparados con los datos históricos observados.

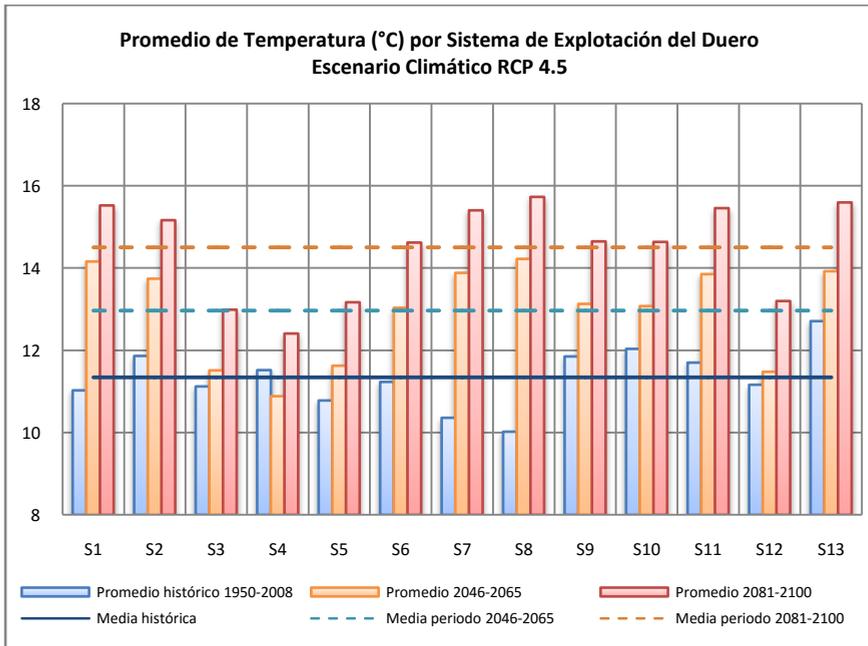
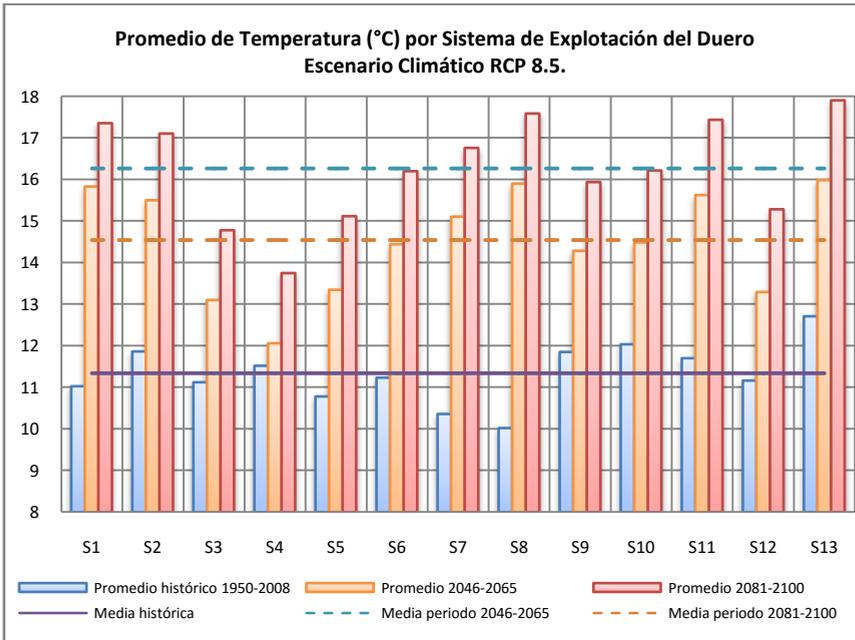
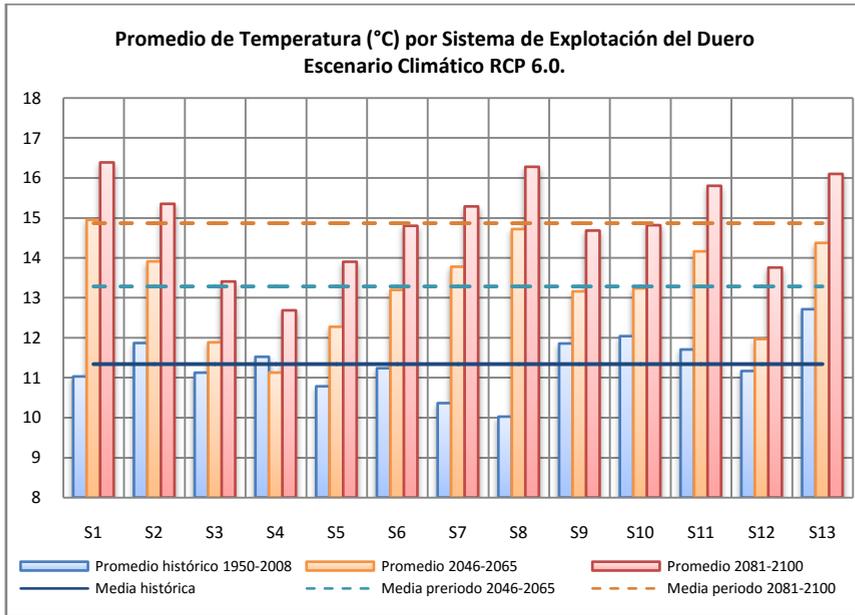


Figura A3.23a. Serie de Temperatura promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.



Figuras A3.23b y A3.23c. Series de Temperatura promedio mensual en la Cuenca del Duero y sus Sistemas de Explotación. Fuente: Elaboración propia.

A manera de resumen, en la Tabla A3.14 se muestran los promedios de variación de la Temperatura media en los sistemas de explotación del Duero, para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, de las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100, comparados con el promedio histórico de Temperatura media en cada sistema de explotación.

Tabla A3.14. Promedio de la Temperatura media (°C) en los Sistemas de Explotación del Duero. Proyecciones climáticas RCP 4.5, 6.0 y 8.5

Periodo	Sistema de Explotación												Valor medio en la Cuenca	Variación (°C)	% de variación	
Histórico	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12				
1950-2008	11.0	11.9	11.1	11.5	10.8	11.2	10.4	10.0	11.9	12.0	11.7	11.2	12.7	-	-	
Proyección del RCP 4.5																
2046-2065	14.2	13.7	11.5	10.9	11.6	13.0	13.9	14.2	13.1	13.1	13.9	11.5	13.9	+1.2	9.6	
2081-2100	15.5	15.2	13.0	12.4	13.2	14.6	15.4	15.7	14.7	14.6	15.5	13.2	15.6	+2.9	22.7	
Proyección del RCP 6.0																
2046-2065	14.9	13.9	11.9	11.1	12.3	13.2	13.8	14.7	13.2	13.2	14.2	12.0	14.4	+1.7	13.1	
2081-2100	16.4	15.3	13.4	12.7	13.9	14.8	15.3	16.3	14.7	14.8	15.8	13.8	16.1	+3.4	26.6	
Proyección del RCP 8.5																
2046-2065	15.8	15.5	13.1	12.1	13.4	14.4	15.1	15.9	14.3	14.5	15.6	13.3	16.0	+3.3	25.8	
2081-2100	17.4	17.1	14.8	13.8	15.1	16.2	16.8	17.6	15.9	16.2	17.4	15.3	17.9	+5.2	40.9	

3.4.2.2. *Resultados para la Precipitación de los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, con regionalización estadística análoga*

Los resultados de Precipitación para los escenarios climáticos analizados, considerando las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100, se comparan con las medias de precipitación histórica de los Sistemas de Explotación del Duero.

En las Figuras A3.24a, 3.24b y 3.24c se muestra la comparación de la precipitación promedio de los sistemas de explotación y su valor medio para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, comparándolos con los datos históricos.

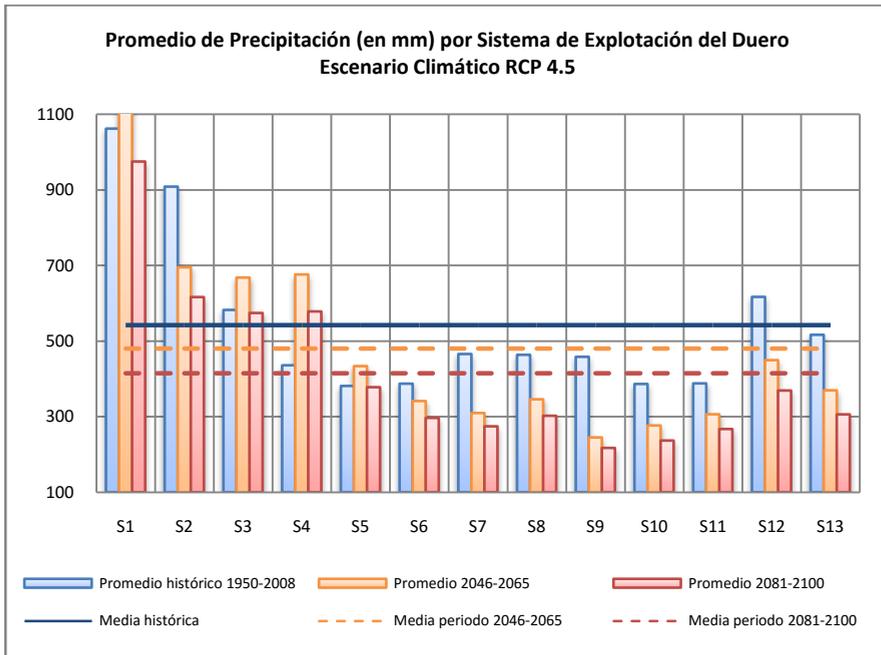
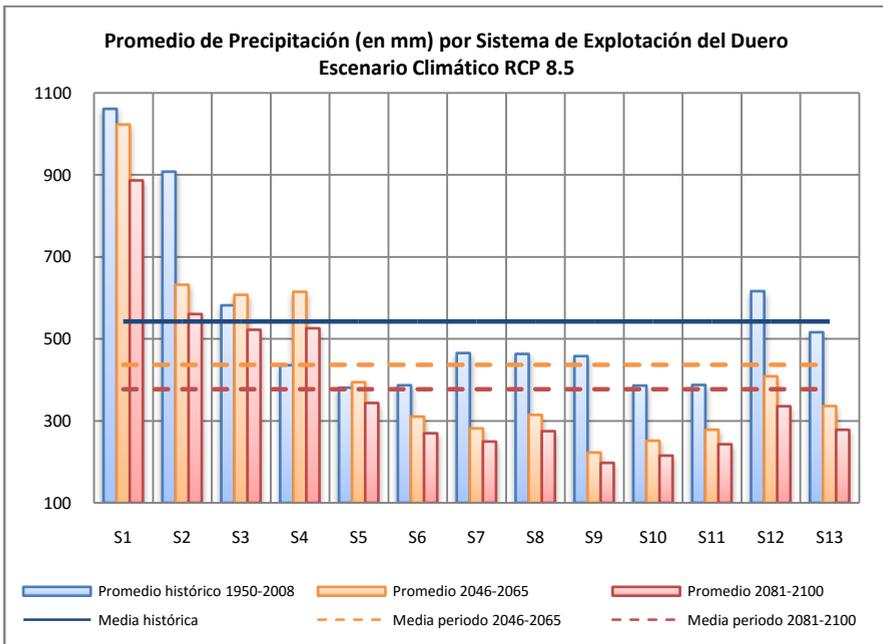
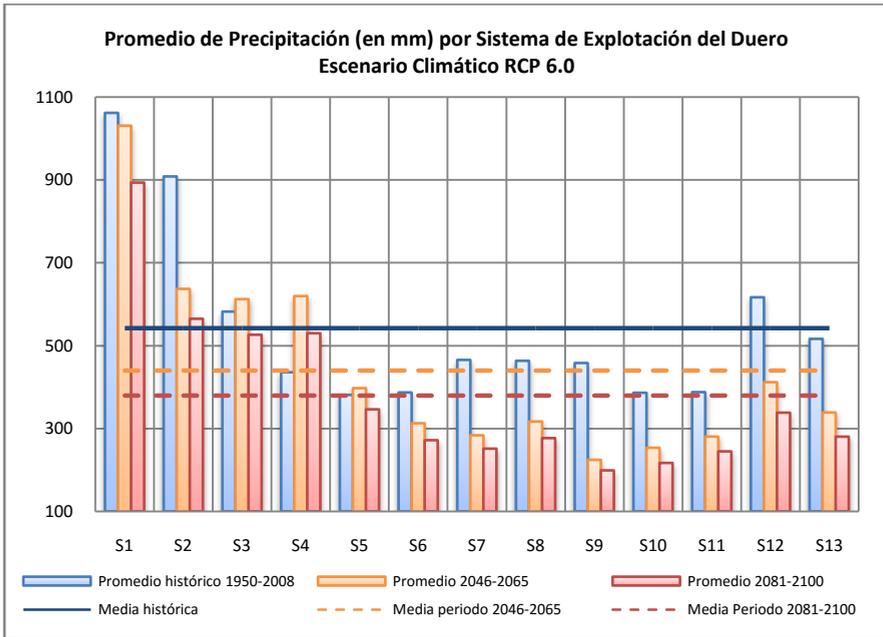


Figura A3.24a. Comparativa de precipitación promedio en sistemas de explotación del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.



Figuras A3.24b y A3.24c. Comparativa de precipitación promedio en sistemas de explotación del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.

A manera de resumen, en la Tabla A3.15 se muestran los promedios de variación de Precipitación anual en los sistemas de explotación del Duero, para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, de las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100, comparados con el promedio histórico de Precipitación anual en cada sistema de explotación.

Tabla A3.15. Promedio de la Precipitación (mm) en los Sistemas de Explotación del Duero. Proyecciones climáticas RCP 4.5, 6.0 y 8.5

Periodo	Sistema de Explotación	Valor medio en la Cuenca												Variación (mm)	% de variación		
		Histórico	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11			S12	
1950-2008			1061.3	908.0	581.9	435.6	380.9	386.9	465.4	463.2	457.9	386.1	387.7	616.4	516.1	-	-
Proyección del RCP 4.5																	
2046-2065			1124.1	694.6	667.6	675.7	433.4	341.0	309.3	345.6	244.7	276.4	305.9	449.1	369.3	-146.9	-28.5
2081-2100			974.3	615.9	573.8	577.9	377.6	296.4	274.1	302.0	217.0	236.5	267.0	368.8	305.7	-210.4	-40.8
Proyección del RCP 6.0																	
2046-2065			1030.4	636.7	611.9	619.4	397.3	312.6	283.6	316.8	224.3	253.4	280.4	411.7	338.5	-177.7	-34.4
2081-2100			893.1	564.6	526.0	529.8	346.1	271.7	251.3	276.8	198.9	216.8	244.7	338.1	280.2	-235.9	-45.7
Proyección del RCP 8.5																	
2046-2065			1022.9	632.1	607.5	614.9	394.4	310.3	281.5	314.5	222.7	251.5	278.4	408.7	336.0	-180.1	-34.9
2081-2100			886.6	560.5	522.2	525.9	343.6	269.7	249.5	274.8	197.5	215.2	243.0	335.6	278.2	-238.0	-46.1

Finalmente, en las Figuras A3.25a, 3.25b y A3.26a, 3.26b se muestra la comparación de las temperaturas mínima y máxima, y de la precipitación histórica mensual en la Cuenca del Duero, respecto de las proyecciones de los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5, en las ventanas temporales 2046-2065 y 2081-2100.

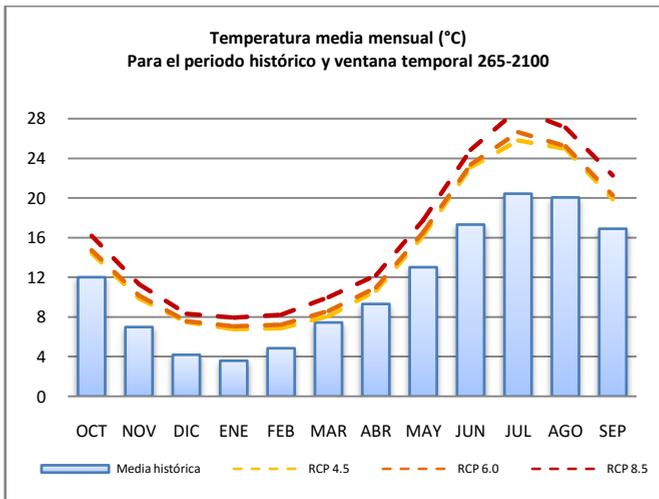
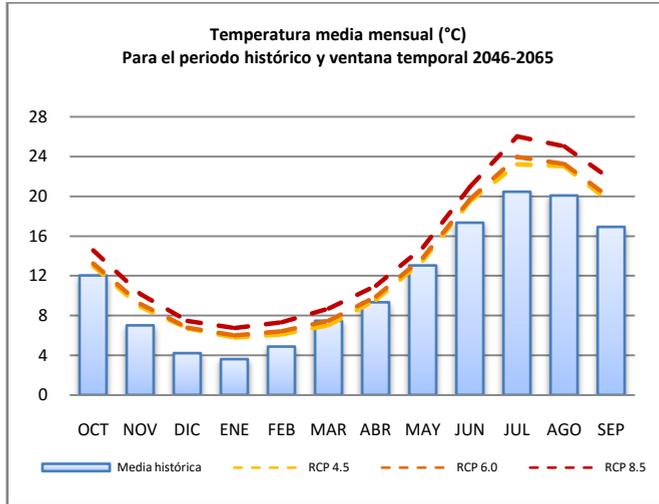


Figura A3.25a y 3.25b. Comparativa de Temperatura media mensual en la Cuenca del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.

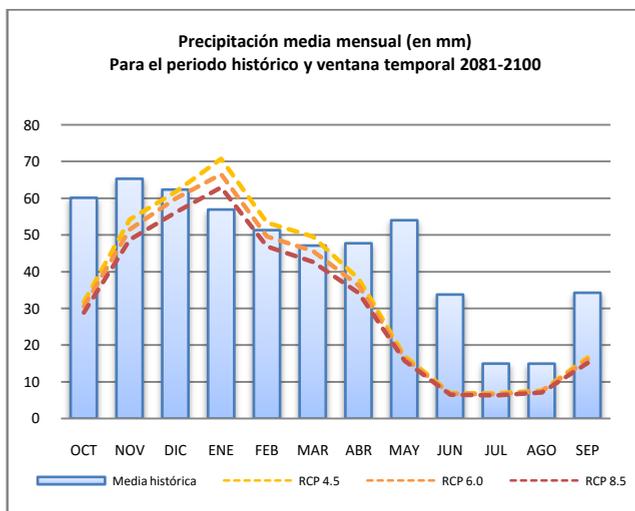
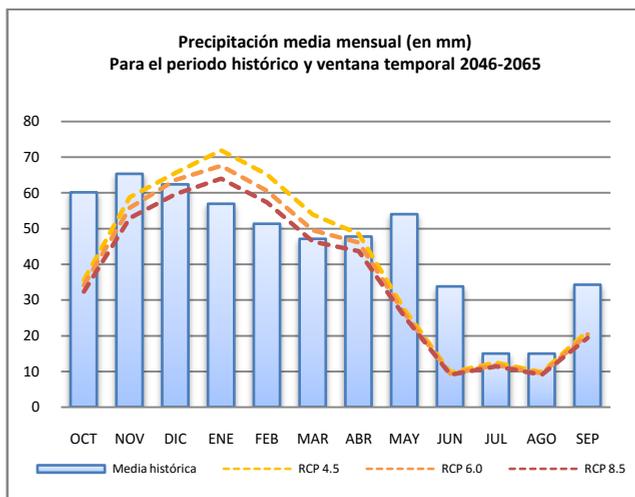


Figura A3.26a y 3.26b. Comparativa de Precipitación mensual en la Cuenca del Duero. Escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.

3.5. ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALIZADO SOBRE LA INFILTRACIÓN MEDIA EN LAS MASAS SUBTERRÁNEAS DEL DUERO

Para analizar el impacto del cambio climático regionalizado propuesto se siguieron los pasos descritos a continuación:

- i. Primero se presentan (a manera de ejemplo) los resultados de aportaciones e infiltración producto de la simulación de los modelos hidrológicos ya calibrados de los Sistemas de Explotación descritos en el Anejo 1 (subzonas de los sistemas Arlanza y Pisuerga).

Tesis Doctoral

- ii. Después, se presenta un resumen (por sistema de explotación), de la variación media de aportaciones e infiltración.
- iii. El resultado de los modelos hidrológicos superficiales (series de recarga por sistema de explotación) es integrado en el modelo de acuífero calibrado en régimen alterado.
- iv. Se compara el resultado de la simulación de distintas alternativas de gestión y funcionamiento del acuífero:
 - a. Comparación del funcionamiento a régimen natural y con las series de cambio climático regionalizado.
 - b. Comparación del funcionamiento a régimen alterado y con las series de cambio climático regionalizado.

De acuerdo a las proyecciones de la ventana temporal 2081-2100 para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5, los resultados de aportaciones (caudal circulante) e infiltración (recarga al acuífero) de las subzonas calibradas SbZ-3 (Castroviejo) y SbZ-1(Embalse de Cervera) de los Sistemas Arlanza y Pisuegra respectivamente, se presentan a continuación en las Figuras A3.27a, 3.27b y A3.28a, 3.28b.

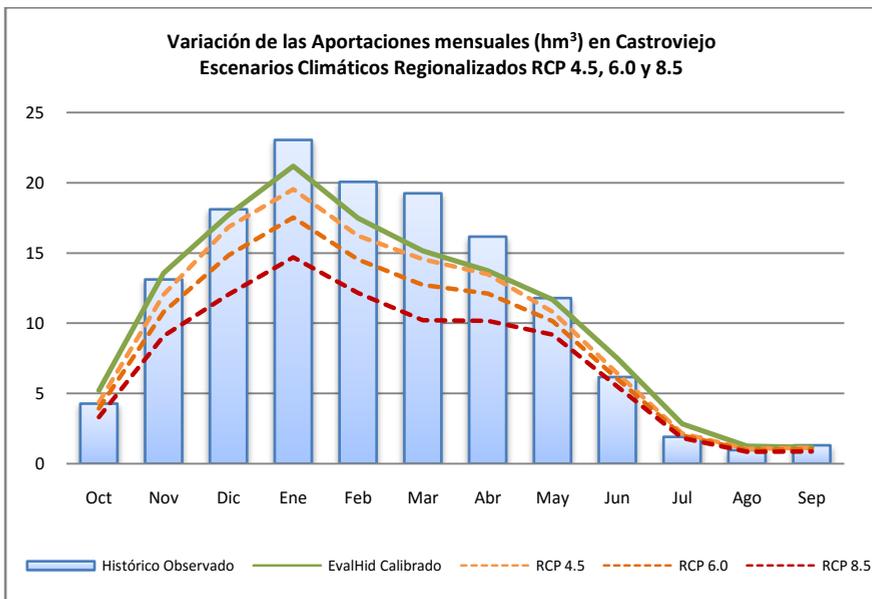


Figura A3.27a. Comparativa de Aportaciones mensuales en subzona de calibración Castroviejo (Sistema Arlanza). Fuente: Elaboración propia.

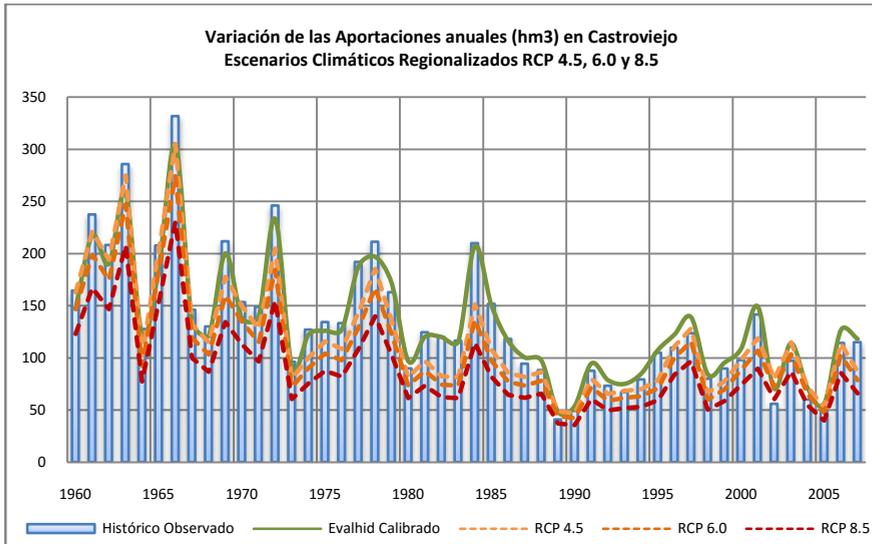


Figura A3.27b. Comparativa de Aportaciones anuales en subzona de calibración Castroviejo (Sistema Arlanza). Fuente: Elaboración propia.

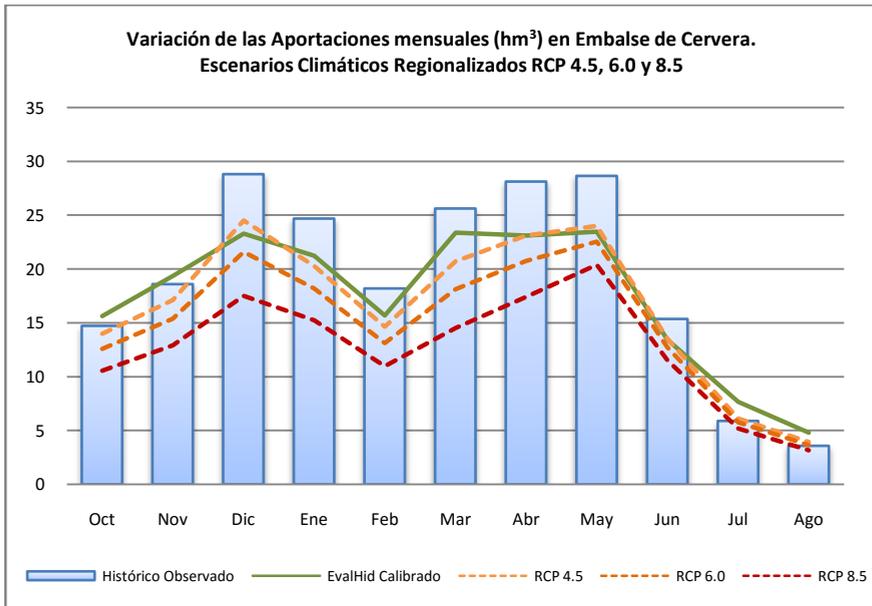


Figura A3.28a. Comparativa de Aportaciones mensuales en subzona de calibración Embalse de Cervera (Sistema Pisuerga). Fuente: Elaboración propia.

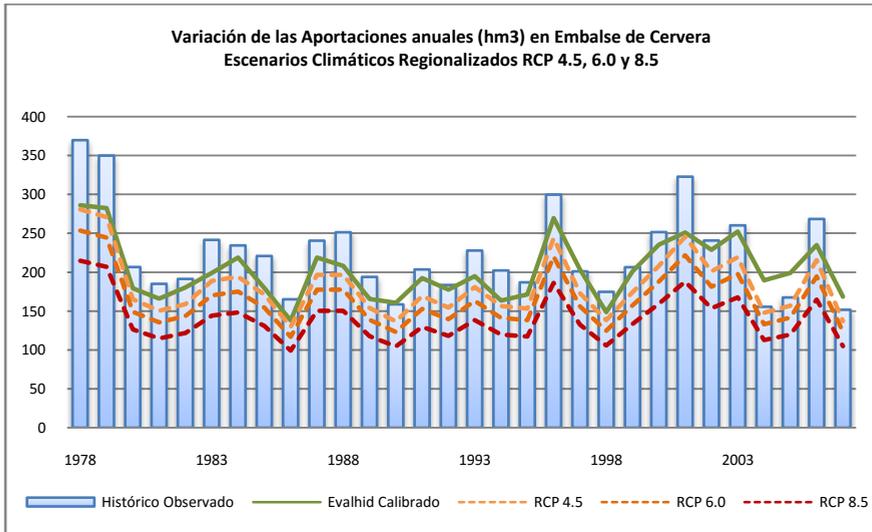


Figura A3.28a y 3.28b. Comparativa de Aportaciones mensuales y anuales en subzona de calibración Embalse de Cervera (Sistema Pisuerga). Fuente: Elaboración propia.

En valores medios, las aportaciones calculadas para la ventana temporal 2081-2100 en las subzonas de calibración, variarán en % de acuerdo a los datos de la Tabla A3.16.

Tabla A3.16. Valores medios de aportación (hm³) para las proyecciones de los Escenarios Climáticos analizados en las subzonas de calibración de los Sistemas Arlanza y Pisuerga

Tipo de	Histórica	Escenario Climático (2081-2100)			% de Variación		
Aportación	(1980-2008)	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Subzona 3. Castroviejo del Sistema Arlanza							
Anual	136.21	118.69	106.66	89.86	-12.9	-21.7	-34.0
Subzona 1. Embalse de Cervera del Sistema Pisuerga							
Anual	212.34	182.10	164.36	139.55	-14.2	-22.6	-34.3

Ahora bien, la recarga histórica (periodo 1980-2006) se ha repartido en el modelo de acuífero calibrado del Duero, de acuerdo a la distribución de la Figura A3.29, que considera 17 de las 38 Masas de Agua Subterránea (MAS) con que se cuenta en el sistema acuífero del Duero.

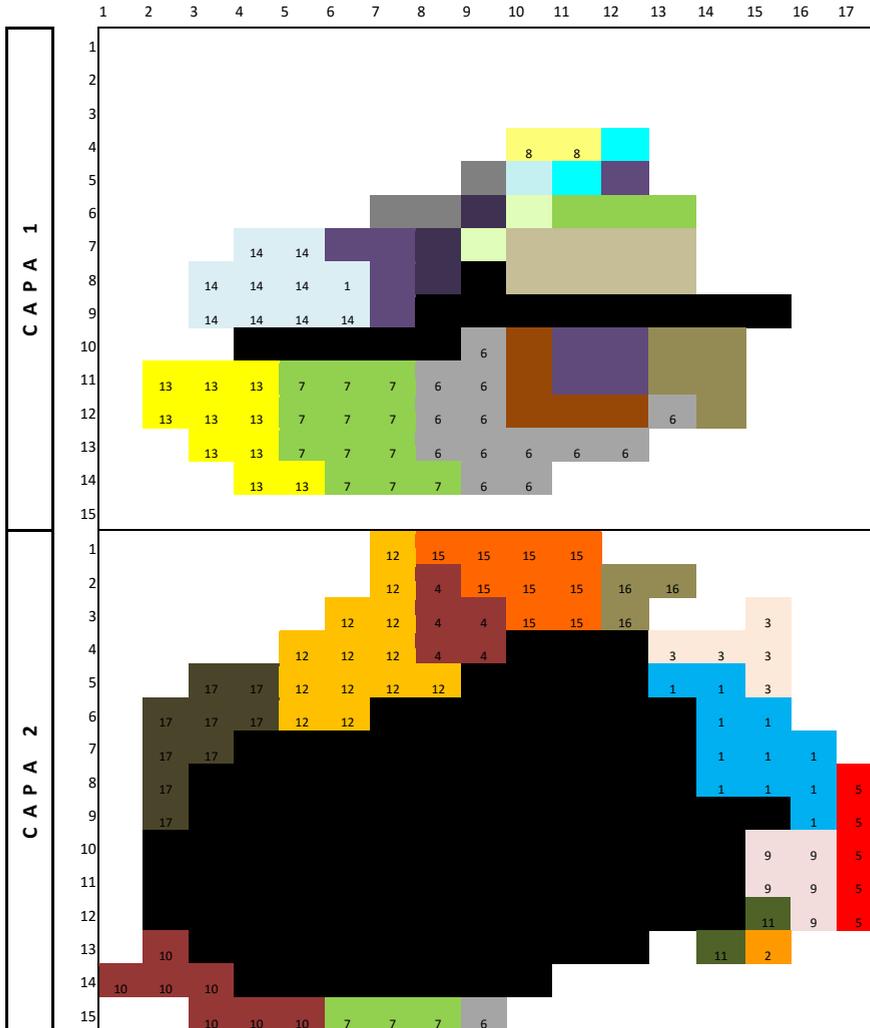


Figura A3.29. Masas Subterráneas del Acuífero del Duero (Capas 1 y 2) donde se reparte la recarga media anual. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos hidrológicos superficiales fueron simulados nuevamente para considerar el efecto de las anomalías climáticas sobre las aportaciones superficiales y subterráneas que estos generan. En particular, las subzonas de calibración con recarga selectiva a las MAS de análisis del acuífero del Duero, dieron como resultado la variación en la recarga media anual mostrada en la Tabla A3.17. Esta tabla resume y compara los valores de recarga media anual histórica de las MAS de interés, respecto de los valores de recarga asumidos por simulación de los modelos hidrológicos superficiales ya calibrados, para las ventanas temporales y los escenarios climáticos indicados.

Tabla A3.17. Recarga (hm^3) en MAS del Duero para el periodo histórico y los Escenarios Climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5. Fuente: Elaboración propia.

ID	Masa de Agua Subterránea (MAS)	Histórica	Ventana 2046-2065			Ventana 2081-2100		
			1980-2006	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 6.0
1	ARANDA DE DUERO	49.1	44.1	40.8	37.3	41.1	38.0	34.7
2	AYLLÓN	27.9	25.0	23.1	21.2	23.3	21.5	19.7
3	BURGOS	56.7	50.8	47.0	43.0	47.4	43.8	40.0
4	CARRIÓN	29.7	26.6	24.6	22.6	24.8	23.0	21.0
5	CUENCA DE ALMAZÁN	59.5	53.4	49.3	45.2	49.7	46.0	42.0
6	LOS ARENALES	19.8	17.8	16.5	15.1	16.6	15.3	14.0
7	MEDINA DEL CAMPO	29.9	26.8	24.8	22.7	25.0	23.1	21.1
8	PÁRAMO DE ASTUDILLO	5.0	4.5	4.2	3.8	4.2	3.9	3.5
9	RIAZA	23.6	21.2	19.6	17.9	19.7	18.2	16.6
10	SALAMANCA	40.9	36.7	33.9	31.1	34.2	31.6	28.9
11	SEPÚLVEDA	19.7	17.7	16.4	15.0	16.5	15.2	13.9
12	TIERRA DE CAMPOS	60.3	54.1	50.0	45.8	50.4	46.6	42.5
13	TIERRA DEL VINO	31.5	28.3	26.2	24.0	26.4	24.4	22.2
14	TORDESILLAS	15.3	13.7	12.7	11.6	12.8	11.8	10.8
15	VALDAVIA	88.0	78.9	73.0	66.9	73.6	68.0	62.1
16	VILLADIEGO	14.3	12.8	11.9	10.9	12.0	11.1	10.1
17	VILLAFÁFILA	18.8	16.9	15.6	14.3	15.7	14.5	13.3
Media de Recarga Total (hm^3):		590.0	529.3	489.5	448.2	493.4	456.0	416.3
% de Variación en la Recarga Total:		-	-10.3	-17.0	-24.0	-16.4	-22.7	-29.4

De la tabla anterior se resume que existirá una reducción significativa en la Recarga media anual del Acuífero del Duero (producto del impacto del cambio climático), oscilando entre un 10.3% y 29.4% menos del recurso histórico de recarga, pasando de los actuales $590\text{hm}^3/\text{año}$ de media de recarga hasta los posibles $416.3\text{hm}^3/\text{año}$ a largo plazo y el peor escenario de concentración de CO_2 en la atmósfera.

Finalmente, puesto que el objetivo de este anejo es presentar evaluación del impacto del cambio climático regionalizado sobre las MAS de interés simuladas en el modelo de Acuífero por Autovalores del Duero (resultados de la tabla anterior), la subsecuente evaluación del impacto climático regionalizado sobre niveles piezométricos, volúmenes de descarga y variación de almacenamiento en las masas subterráneas no es presentado en este anejo, dejándolo como línea futura de investigación y análisis de la zona de estudio.

