

ANÁLISIS DEL BALANCE DE RECURSOS EN EL ACUÍFERO TERCIARIO DE LA CUENCA DEL DUERO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

MÁSTER EN INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

ESPECIALIDAD: ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS



ELABORADO POR: CÉSAR JIMÉNEZ ALMENDROS

DIRECTOR: ABEL SOLERA SOLERA

VALENCIA, 2010

Dedicado a mi abuelo Ezequiel

Mi primer agradecimiento es a mis padres, Antonio y Angelita, que no tienen ni idea de lo que hago pero siempre confían en mí y les siento cerca, a mis abuelos, maestros de esa sabiduría que no se enseña en las universidades, y a mis hermanas, porque son especiales.

A mis amigos del agua; Gitano, Ángel, Marcela, Big Show, Angeleta, Boateng, Giamba... y tantos otros que me han acompañado en este camino.

A mi tutor, Abel Solera, por todo lo que me ha enseñado, el tiempo dedicado y la gran disponibilidad mostrada.

A las personas de la Oficina de Planificación del Duero y otros organismos que mostraron colaboración.

A todos los que no nombro y estuvieron ahí

Resumen

El agua es el elemento esencial para el desarrollo de la vida, y su correcto uso y gestión se antoja fundamental para garantizar su acceso en condiciones adecuadas a las generaciones presentes y futuras.

“En cualquier cuenca en que la hidrología subterránea constituya una parte significativa del ciclo total, resulta imposible planificar o decidir cuáles y cómo deberán ser en el futuro alguno de los elementos de regulación, o cómo deberán explotarse sin hacerlo simultáneamente sobre todo el conjunto” (A .Sánchez González,). En este sentido, la gestión de los recursos hídricos requiere de esfuerzos para profundizar en el conocimiento de las aguas superficiales y subterráneas como conjunto. Este conocimiento permitirá sentar las bases para elaboración de un modelo de gestión conjunta del sistema de recursos hídricos.

Los acuíferos en la cuenca del Duero han sido sometidos durante las últimas décadas a una explotación intensiva que ha provocado importantes descensos de niveles y otros efectos asociados, como disminución de la descarga a los ríos, contaminación, insatisfacción de demandas, etc.

El presente trabajo estudia el funcionamiento de las aguas subterráneas de la cuenca del Duero, más concretamente la situación actual derivada de la explotación histórica con el objeto de sentar las bases para definir un modelo de utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas del Duero.

En primera instancia se plantea una descripción general y se analizan los trabajos anteriores para posteriormente centrarse en el estudio de los datos disponibles (piezometría, infiltración, extracciones y aforos) de cara a comprender su funcionamiento actual y su evolución histórica. Se hace especial énfasis en las relaciones del acuífero con las aguas superficiales y el efecto de la explotación del acuífero sobre las mismas. Por último se plantea la discusión de los balances en régimen natural y régimen influenciado del acuífero, estudiando la contribución de cada uno de los términos.

El trabajo supone un importante esfuerzo de análisis, procesado y estudio conjunto de los datos disponibles, considerando en todo momento la incertidumbre asociada a los mismos y los posibles errores.

Entre otros aspectos, se pone de manifiesto la importancia del tramo final del río Duero en el funcionamiento general de la cuenca, y los efectos provocados por el desarrollo de las extracciones sobre éste.

Abstract

Water resources are essential for the development of life, and their proper use and management are necessary to guarantee their access to present and future generations in appropriate conditions.

"In any basin where groundwater constitutes a significant portion of the total cycle, it is impossible to know which will be the regulation elements and the way to operate them without doing it over the whole system simultaneously" (A. Sánchez González). On this regard, water resources management requires efforts to deepen the knowledge about surface water and groundwater functioning as a whole. This knowledge is the base for developing a conjunctive management model of water resources systems.

During the last decades, the Duero River basin aquifers have been subjected to intensive extractions. The effects of that are significant declines in groundwater and other related effects such as lowering of the discharge into rivers, pollution, unsatisfied demands, etc.

In this document we study the performance of Duero basin groundwater, in particular the current situation arising from the historical exploitation in order to define a conjunctive use model in Duero basin.

This study first presents a general description of the aquifer and analyzes the results of past studies. Then, it proceeds to analyze the available data (piezometric data, infiltration, pumping and streamgauges) to understand its current performance and its historical evolution, especially focusing on the surface and groundwater relationships, and the effect of aquifer exploitation. Finally, the discussion of the balances in the natural and influenced system is carried out, studying the contribution of each term.

The work represents an important effort of analysis, processing and study of the available data, considering the uncertainty associated with them and the possible errors.

Among other things, it highlights the importance of the final stretch of the River Duero in the basin overall functioning, and the effects caused on this river stretch by the development of extractions.

Resum

L'aigua és l'element essencial per al desenvolupament de la vida, i el seu correcte ús i gestió es preveu fonamental per a garantir el seu accés en condicions adequades a les generacions presents i futures.

“En qualsevol conca que la hidrologia subterrània constituïexca una part significativa del cicle total, resulta impossible planificar o decidir quins i com haurien de ser en el futur algun dels elements de regulació, o com haurien d'explotar-se sense fer-ho simultàniament sobretot el conjunt” (A .Sánchez González,). En aquest sentit, la gestió dels recursos hídrics requereix esforços per a aprofundir en el coneixement del funcionament de les aigües superficials i subterrànies com conjunt. Aquest coneixement permetrà assentar les bases per a l'elaboració d'un model de gestió conjunta del sistema de recursos hídrics.

Els aquífers en la conca del Duero han estat sotmesos durant les últimes dècades a una explotació intensiva que ha provocat importants descensos de nivells i altres efectes associats, com disminució de la descàrrega als rius, contaminació, insatisfacció de demandes, etc.

El present treball estudia el funcionament de les aigües subterrànies de la conca del Duero, més concretament la situació actual derivada de l'explotació històrica amb l'objecte d'assentar les bases per a definir un model d'utilització conjunta de les aigües superficials i subterrànies del Duero.

En primera instància es planteja una descripció general i s'analitzen els treballs anteriors per a posteriorment centrar-se en l'estudi de les dades disponibles (piezometria, infiltració, extraccions i aforaments) de cara a comprendre el seu funcionament actual i la seua evolució històrica. Es fa especial èmfasi en les relacions de l'aquífer amb les aigües superficials i l'efecte de l'explotació de l'aquífer sobre les mateixes. Finalment es planteja la discussió dels balanços en règim natural i règim influenciat de l'aquífer, estudiant la contribució de cadascun dels termes.

El treball suposa un important esforç d'anàlisi, processat i estudi conjunt de les dades disponibles, considerant en tot moment la incertesa associada als mateixos i els possibles errors.

Entre altres aspectes, es posa de manifest la importància del tram final del riu Duero en el funcionament general de la conca, i els efectes provocats pel desenvolupament de les extraccions sobre aquest.

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos	1
2. Antecedentes	3
3. Estudio de datos	7
3.1. Geología	7
3.1.1. Génesis y Litología de la cuenca del Duero	7
3.1.2. Hidrogeología:	11
3.2. Piezometría	16
3.2.1. Introducción	16
3.2.2. Objetivo	16
3.2.3. Datos y procedimiento	17
3.2.4. Limitaciones del análisis	20
3.2.5. Resultados	22
3.2.6. Análisis de Flujo Vertical	73
3.3. Infiltración	77
3.3.1. Introducción	77
3.3.2. Descripción situación actual	77
3.3.3. Infiltración en la zona de estudio	79
3.3.4. El modelo SIMPA	88
3.4. Extracciones	93
3.4.1. Introducción	93
3.4.2. Datos disponibles	93
3.4.3. Situación actual: CHD 2009	94
3.4.4. Extracciones sobre la zona de balance	104
3.4.5. Evolución Histórica de las extracciones	107
3.4.6. Limitaciones	111
3.5. Análisis de Aforos	115
3.5.1. Introducción	115
3.5.2. Objetivo	115
3.5.3. Procedimiento de trabajo	115
3.5.4. Limitaciones del método	117
3.5.5. Identificación de tramos	121
3.5.6. Resultados por tramos	122
4. Balance del Acuífero	198
4.1. Introducción	198
4.2. Régimen natural de acuífero	204

4.2.1.	<i>Relaciones río-acuífero</i>	204
4.2.2.	<i>Balance en régimen natural</i>	207
4.2.3.	<i>Discusión</i>	210
4.3.	Régimen influenciado por los bombeos	213
4.3.1.	<i>Introducción</i>	213
4.3.2.	<i>Bombeos</i>	213
4.3.3.	<i>Evolución del acuífero</i>	216
4.3.4.	<i>Interpretación de la variación de la descarga</i>	225
4.4.	Situación actual y previsión futura	229
4.4.1.	<i>Introducción</i>	229
4.4.2.	<i>Planteamiento del balance</i>	229
4.4.3.	<i>Discusión y previsión futura</i>	232
5.	Conclusiones	235
6.	Líneas de trabajo futuras	239
7.	Bibliografía	241
8.	Índices	242
	Índice de Ilustraciones	242
9.	Anexos	254

1. Introducción y objetivos.

Justificación del trabajo

El estudio que se presenta supone el Trabajo Final del Máster de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (en la especialidad de “Análisis de Sistemas de Recursos Hídricos”), enmarcado dentro del programa oficial de posgrado con doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Valencia.

Introducción y objetivos

La unicidad del ciclo hidrológico obliga al tratamiento simultáneo de las fases superficial y subterránea del mismo, y a la permanente consideración de los intercambios de masa entre ambas fases, tanto en el estado natural, como en el artificialmente creado por la utilización de infraestructuras de aprovechamiento... (A. Sánchez González).

En la cuenca del Duero, el principal dominio hidrogeológico está formado por un enorme agregado de materiales sedimentarios de origen terciario que rellena una gran depresión formada por materiales impermeables. Su extensión ocupa casi la totalidad de la cuenca, y su espesor medio oscila en torno a los 1.000 metros, alcanzando los 4.000 metros en algunas zonas. En este sentido, la consideración de las aguas subterráneas y sus relaciones con las aguas superficiales se antoja fundamental para abordar con éxito cualquier política de gestión en la cuenca del Duero.

Por otro lado, los acuíferos en la cuenca del Duero han sido sometidos durante las últimas décadas a una explotación intensiva como respuesta al desarrollo de la agricultura, principalmente. Las zonas donde la explotación de las aguas subterráneas ha sido mayor se ubica alrededor de los tramos medio y bajo del Duero, principalmente en su margen izquierda, en lo que se conoce como la Región de los Arenales.

Esta explotación intensiva ha resultado en una importante disminución del nivel freático, y otros efectos asociados como disminución de la descarga a los ríos, contaminación, insatisfacción de demandas, etc.

El objetivo fundamental del trabajo es estudiar el funcionamiento de las aguas subterráneas de la cuenca del Duero, más concretamente la situación actual derivada de la explotación histórica con el objeto de sentar las bases para definir un modelo de utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas del Duero.

Son numerosos los trabajos realizados acerca de las aguas subterráneas del Duero, principalmente centrados en aspectos hidrogeológicos, pero descuidando su relación con

los cauces superficiales. Dichos trabajos no abarcan la totalidad del sistema-acuífero y son incompletos para un análisis conjunto del sistema Duero, además se observa gran disparidad entre los balances proporcionados por cada uno de ellos. Por ello, la mejora en el conocimiento del acuífero es fundamental para diseñar adecuadamente un modelo de gestión conjunta del sistema de recursos hídricos.

En el presente trabajo se plantea una descripción general en base a la bibliografía existente y analiza los trabajos previos para posteriormente centrarse en el estudio de los datos disponibles (piezometría, infiltración, extracciones y aforos) de cara a comprender su funcionamiento actual y su evolución histórica. Se hace especial énfasis en las relaciones del acuífero con las aguas superficiales y el efecto de la explotación del acuífero sobre las mismas.

2. Antecedentes

En este apartado se citan aquellos trabajos y fuentes que de un modo u otro serán utilizados a lo largo del estudio. Se han utilizado varios trabajos que han resultado interesantes por varios aspectos:

- situarse como antecedentes en el estudio y modelación de los recursos hídricos en la zona de estudio o parte de ella.
- como fuentes de información de carácter descriptivo.
- como fuentes de datos (bombeos, infiltración...).
- como referencia de cara a la comparación con el presente trabajo.

A continuación se enumeran dichos trabajos y se exponen los aspectos a los que se hace referencia:

“Integración de las Masas de Agua Subterráneas en el Modelo de Gestión de la Cuenca Hidrográfica del Duero”, desarrollado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) para la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), 2007 (en adelante “CHD, 2007”).

Este trabajo pretende abordar la modelización de las MAS de la Cuenca del Duero para su integración en el modelo de gestión de la cuenca. Utiliza para la conceptualización de las MAS modelos pluricelulares (con coeficientes de recarga) o unicelulares en su caso, donde se considera la recarga como una tasa en función a la superficie, y la descarga subterránea en función a los coeficientes α y Q_0 . Las transferencias entre MAS se calculan como un porcentaje de la descarga, y considera que el resto de la descarga del acuífero se distribuye en los cauces.

Referencias en el estudio:

- En dicho trabajo aparece por primera vez el concepto de Unidad de Modelación que se utiliza en la actualidad en los modelos de Gestión de la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH), desarrollados con el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL DMA (Solera y otros, 2007), (SSD AQUATOOL DMA).
- Utiliza valores de infiltración procedentes del modelo de Precipitación-Aportación SIMPA (Cabezas et al., 2000; Ruiz, 2000; Estrela y Quintas, 1996), probablemente en su primera

versión, que han sido utilizados para su comparación con los actuales en el apartado de Infiltración.

“Modelación Hidrogeológica Esquemática de la Cuenca del Duero”, desarrollado por EPTISA S.A., para la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) en el año 2006 (en adelante “OPH. 2006”).

Este trabajo pretende “fabricar una herramienta de análisis global de la escorrentía subterránea de la cuenca que permita verificar la coherencia de los datos individuales (recargas, recursos, niveles, etc.) de distintas zonas dentro de un aparato matemático integrador”. Para conseguir dicho propósito se dispone a; establecer el modelo conceptual de funcionamiento asentado en la información disponible; obtener el balance hídrico de la unidad; y la realización de un modelo numérico de flujo que reprodujese y comprobase el modelo conceptual de funcionamiento.

Finalmente se apunta en la memoria de dicho trabajo que “el modelo numérico de flujo realizado en el marco del presente estudio ha tenido un marcado carácter interpretativo. En este sentido, ha pretendido mejorar el conocimiento de los parámetros y factores que controlan el movimiento del agua subterránea en la cuenca del Duero, al establecer un marco de referencia donde integrar y organizar los datos de campo y permitir, así, formular y contrastar hipótesis sobre los aspectos menos conocidos de la dinámica del sistema”.

El modelo fue realizado con el software Visual Modflow en 2006, y está compuesto por 11 capas con 215 columnas y 135 filas cada una, celdas de 2 km por 2 km. Se lleva a cabo la simulación en régimen permanente para un año. La simulación se hace en ausencia de bombeos, con recarga y parámetros hidrodinámicos constantes para las Unidades Hydroestratigráficas definidas.

Referencias en el estudio:

- El trabajo lleva a cabo una completa descripción de la génesis y litología de la cuenca del Duero (basado en el “Mapa Geológico de Síntesis de la Cuenca del Duero”, a escala 1/500.000, realizado por Pineda, Nozal, Montes, López-Olmedo y Martín-Serrano, 2006) que se utiliza en el apartado de descripción de la geología.
- Descripción de la variabilidad de los espesores de los materiales (batimetría) y parámetros hidrogeológicos de referencia.

- Conceptualización de la conectividad entre las aguas superficiales y subterráneas.
- El mapa con la piezometría correspondiente al Modelo del trabajo es muy gráfico, y se adivina de forma muy intuitiva el comportamiento regional del flujo de la cuenca.

“Estudio del Sistema de Utilización Conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de las cuencas del Cega-Pirón y Adaja-Eresma”, desarrollado por PROINTEC S.A. para la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, (DGOHCA) en el año 2002 (en adelante “DGOHCA, 2002”).

El estudio se finaliza en 2002, y tiene como objetivo “analizar las posibilidades de utilización conjunta de los recursos hídricos superficiales y subterráneos para mejorar el estado piezométrico de los acuíferos en la comarca de Los Arenales y recuperar, en la medida de lo posible, el drenaje natural a los cauces superficiales”.

Se busca analizar las posibilidades de la gestión integrada de los recursos hídricos en orden a conseguir una mejora de la situación. Se proponen y contrastan alternativas de utilización de las aguas subterráneas y superficiales de la zona (que en la actualidad no se utilizan por inexistencia de regulación). El planteamiento de movilizar los recursos superficiales considera dos posibles vías de acceso: la disminución de la extracción de aguas subterráneas por sustitución de aguas superficiales para riego, y la recarga artificial del acuífero con aguas superficiales reguladas.

Para abordar dicho objetivo se analizan los aspectos relacionados con la hidrogeología de la zona (precipitación, piezometría, hidrología, extracciones...) para, entre otros trabajos, confeccionar el modelo de flujo de la U.H. Hidrogeológica de Los Arenales. Se trata de un modelo tridimensional de flujo con 4 capas, 53 filas y 70 columnas, celdas de 2 km por 2 km. Los parámetros hidrogeológicos son variables según grupos de celdas y la capa del modelo. La recarga se obtiene del modelo SIMPA, y la conectividad superficial-subterránea se define en función a la piezometría y a otros trabajos anteriores. Considera únicamente las extracciones destinadas a regadío. Se simula el periodo 1940-1999.

Referencias en el estudio:

- De cara a la posible realización de un futuro modelo de utilización conjunta, en el estudio se pueden encontrar datos acerca de los parámetros hidrodinámicos, aparte de los calibrados, que pueden servir como referencia para su comparación.

- En el apartado de “Usos y Demandas de Agua” se lleva a cabo una recopilación de datos a través de la cual se estima la evolución de las extracciones en el periodo 1940-1999. Dicha evolución sirve como referencia para la estimación de la evolución de las extracciones hasta la actualidad, incorporando los datos actuales disponibles.
- En el apartado de Hidrología se tratan las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas. En base a los trabajos anteriores y a análisis de piezometría se estima la evolución del comportamiento de los ríos comparando los periodos 1940 y 1999. Se utilizará esta definición para comparar con los resultados obtenidos del presente trabajo.
- Del mismo modo que se compara desde el punto de vista cualitativo, como en el caso anterior, también se lleva a cabo la comparación de la descarga de los ríos desde el punto de vista cuantitativo, y en última instancia se comparan los balances que presenta el estudio con los de este trabajo.
- Aparte de lo anterior, el estudio lleva a cabo una recopilación de información de otros aspectos relacionados con los recursos hídricos de la zona.

Oficina de Planificación de la Confederación Hidrográfica del Duero.

El presente trabajo ha sido desarrollado en colaboración con la OPH, y se ha dispuesto de información todavía no publicada, suministrada directamente por la CHD, principalmente los datos de Infiltración de la versión actual de SIMPA, y los datos de extracciones a fecha de 2009. (Referencia “CHD, 2009”)

Además se ha utilizado la información disponible en la página web de la CHD (<http://www.chduero.es/>), donde se ha hecho uso de la Memoria del actual Plan Hidrológico de Cuenca (PHC, 2009), del año 2009, así como de sus diversos anexos.

En el sistema de información de la CHD (http://www.mirame.chduero.es/DMADuero_09/index.faces), MIRAME, se adquirieron datos relacionados con la hidrogeología de la cuenca (contactos y flujos entre MAS, parámetros hidrodinámicos...).

Por otro lado, la empresa TRAGSATEC S.A., en colaboración con la OPH, proporcionó la base de datos de piezometría, así como otros documentos de importancia (Referencia “TRAGSATEC-OPH, 2009”).

3. Estudio de datos

3.1. Geología

3.1.1. Génesis y Litología de la cuenca del Duero

La cuenca del Duero se ubica en la submeseta norte peninsular, ocupándola casi en su totalidad. El origen geológico de esta superficie responde a la formación y relleno de la denominada “Depresión del Duero”, localizada al Este del Macizo Hespérico.

Formación de la depresión

La formación de dicha depresión se explica por la deformación del basamento de la cuenca a lo largo de las orogenias hercínica y alpina. La orogenia hercínica se manifiesta sobre los materiales del macizo hespérico (pizarras, granitos y cuarcitas fundamentalmente, de edad paleozoica y precámbrica) en varias fases de plegamiento y posteriores esfuerzos compresivos, denominados tardihercínicos, que fracturan la corteza.

No obstante, es la orogenia alpina la que otorga esa disposición final en forma de “cubeta” por medio de los levantamientos de las cadenas montañosas que la delimitan. Durante dicha orogenia, la deformación de los materiales del Mesozoico levanta las cordilleras Cantábrica al norte, Ibérica al Este y el Sistema Central al sur. Así, las cuencas cenozoicas se van formando como respuesta a estos esfuerzos compresivos y reactivaciones del relieve que a su vez van rellenando las mismas.

Los materiales mesozoicos preexistentes son mayoritariamente calizas, dolomías y areniscas originados por las diversas transgresiones marinas desde el Este, y desarrollados en dos ciclos tectónicos ocurridos en el Triásico-Jurásico y en el Cretácico. Durante el primero se forman cuencas principalmente independientes, limitadas por fallas. En el segundo predomina el hundimiento general del conjunto, con el consecuente recubrimiento de las cuencas por depósitos de origen marino.

Relleno endorreico

Con la llegada de la era Cenozoica en la cuenca del Duero se considera el comienzo de la historia geológica de la misma. El grosor de la depresión se verá rellenado por materiales sedimentarios terciarios, sobre los cuales se asentarán los materiales cuaternarios en sucesivos episodios sedimentarios, con potencias mucho menores.

El comienzo del relleno está datado de finales del Cretácico, tras la alteración del Macizo Hespérico por el clima tropical existente, coincidente con la retirada del mar de hacia el Este, que deja depósitos sedimentarios potentes hasta el Paleógeno.

Durante esta etapa, las sucesiones paleógenas principales en todos los bordes no solo muestran diferencias en lo concerniente a su litología, además los espesores de las series son variables, siguiendo una tendencia ascendente hacia el Norte y el Este (Véase Figura 1) Esto es debido a que en los márgenes Sur y Oeste se producen fenómenos de subsidencia a favor de los sistemas de fallas en forma de escalonamiento en bloques (generando contactos discordantes bruscos con el relleno terciario), mientras que en los bordes Este y Norte se dan fracturas de gran salto (discordancias progresivas), favoreciendo el hundimiento del fondo de la depresión hacia el Noreste.

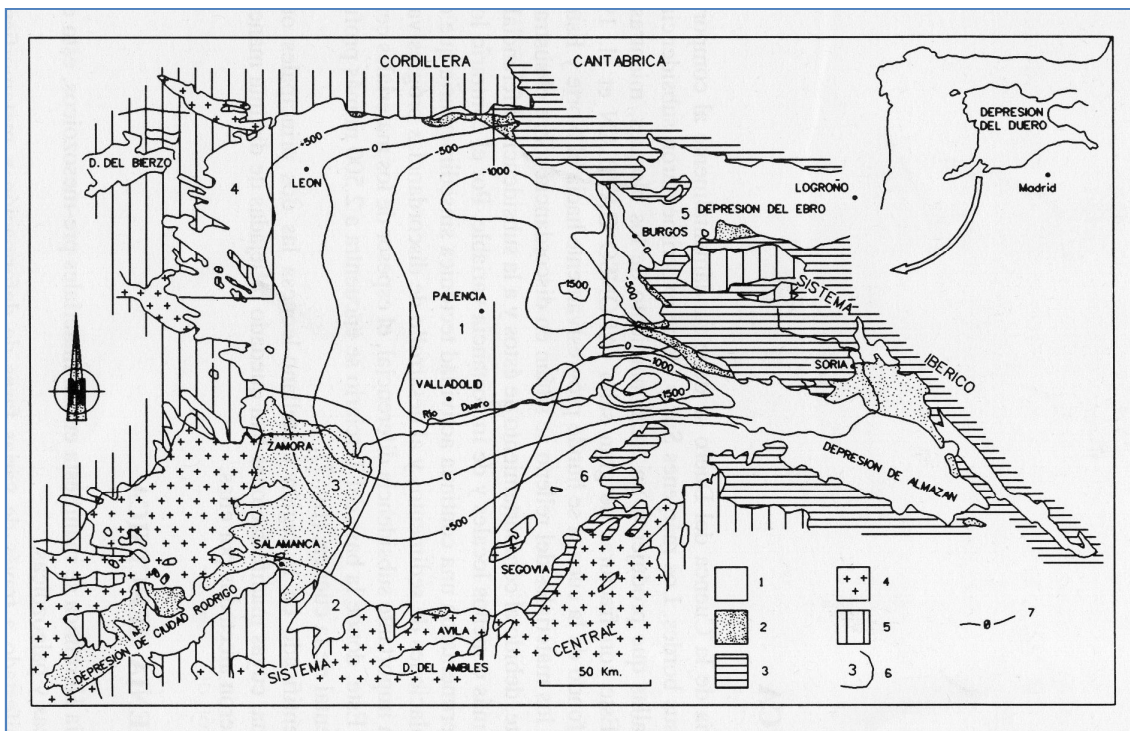


Figura 1: Mapa de isobatas del Terciario de la Cuenca del Duero. 1) Neógeno y Cuaternario. 2) Paleógeno. 3) Mesozoico. 4) Rocas plutónicas y metamórficas. 5) Paleozoico y Precámbrico. 6) Principales áreas investigadas. 7) Isobatas (en m). ALONSO GAVILÁN, G. et al (1983).

El relleno continua en un ambiente continental. La formación de la depresión favoreció el relleno de forma centrípeta, en el cual los cursos de agua y sedimentos fluían de los bordes hacia el centro de la misma, para acabar en un sistema lacustre somero. Esta disposición ¹ facilita un proceso erosivo que, junto con los ciclos sedimentarios y las litologías de los diversos bordes de la depresión, explica la naturaleza de los materiales de relleno. Así en

¹ Esta disposición de Cubeta cerrada que facilita el relleno centrípeta se sabe que no es constante, ya que se conoce la conexión entre la cuenca del Duero y la del Ebro en la zona de La Bureda en el Neógeno.

los bordes Norte y Oeste predominan materiales silíceos, en el borde Este materiales fundamentalmente calcáreos, y en el borde Suroccidental materiales arcósicos, en todos ellos con granulometrías decrecientes según nos alejamos de los bordes.

Ciclos sedimentarios

Los ciclos sedimentarios responden a variaciones en el equilibrio entre el sistema lacustre central y los bordes de la depresión, correspondiéndose con expansiones/detracciones del primero, o elevaciones de los segundos. Analizando la serie estratigráfica se pueden distinguir varios ciclos sedimentarios correspondientes a alteraciones de la disposición normal de la misma, generando discordancias en algunos casos (ver Figura 2):

El primero de los ciclos se ubica probablemente entre el Oligoceno superior y el Mioceno Inferior, con representación sólo en el sector más oriental. Este ciclo, conocido como Ciclo Langa, se reconoce con facilidad en la Cubeta de Almazán, y finaliza con margas y calizas subordinadas.

El Ciclo Dueñas es el primero con representación mayoritaria en toda la cuenca, salvo en el sector noroeste. Esta fase de plegamiento sucede durante el Mioceno Inferior-medio y deja arcosas en el Suroeste (facies Pedraja de Portillo), detríticos coronados por margas y calizas subordinadas en el centro y noroeste, y formaciones conglomeráticas equivalentes en los bordes.

A techo de las anteriores formaciones, ubicadas en el Mioceno medio, se encuentran los materiales del Ciclo Tierra de Campos (facies de Tierra de Campos y unidades equivalentes). Los materiales de este ciclo afloran en toda la depresión dejando facies arcósicas en el suroeste y areno-limosas en el resto, con materiales conglomeráticos equivalentes en los bordes, y caliza del páramo coronando los sectores orientales.

Al ciclo anterior le sigue una fase de relativa estabilidad tectónica durante el Mioceno superior denominada Ciclo Cuestas o Páramo Inferior, por las litologías que arroja, típicas de los sectores central y nororiental. Se trata fundamentalmente de depósitos de margas yesíferas de la Facies de las Cuestas. Estos depósitos pasan lateralmente hacia el Noroeste a facies fluviales terrígenas, y a arcósicas hacia el Sur.

El último de los ciclos sedimentarios registrados es denominado Ciclo Páramo Superior, y rompe con la estabilidad del ciclo anterior dejando delgados depósitos detríticos coronados por calizas (Calizas del Páramo superior), con representación en los sectores central, nororiental y oriental durante el Mioceno superior. Estas calizas del páramo (superior e inferior) forman un relieve de cerros aislados.

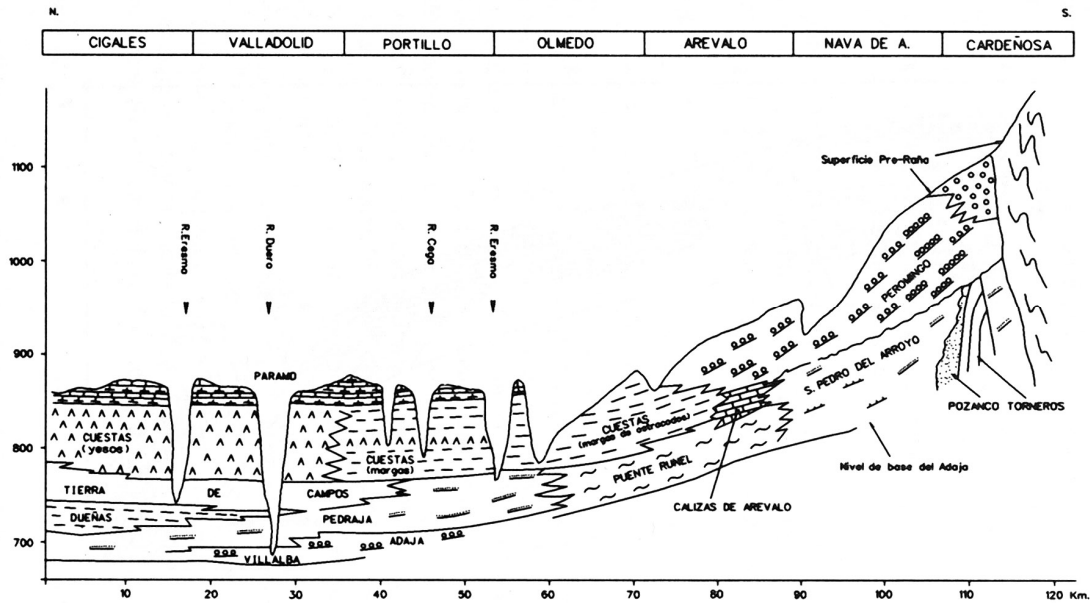


Figura 2: Esquema estratigráfico de las facies miocenas (DEL OLMO, P. y PORTERO, J.M.; RÍOS, 1982).

Los ciclos sedimentarios constituyen la etapa de apilamiento endorreico de la depresión. A continuación los procesos fluviales se encargarán de modelar el relleno existente mediante un proceso de vaciado exorreico que comienza en el cuaternario y dura hasta nuestros días.

Vaciado Exorreico

El hecho que marca el fin del relleno y el comienzo del vaciado es la apertura de la cuenca al Atlántico, posible consecuencia del basculamiento de la meseta y/o la captura de la depresión por la red atlántica, cuando el río Duero en su tramo más oriental contacta por erosión remontante con la depresión.

Los primeros depósitos cuaternarios en formarse son las rañas, no uniformes en toda la cuenca y con espesores variables entre los 2 y los 30 metros. Éstos están sucedidos por los primeros niveles de terraza de los cursos fluviales actuales, que encajan formando plataformas de aluviones paralelas a los cauces de los ríos de mayor entidad. Aparecen también otro tipo de superficies como los glacis, depósitos aluviales de fondo de valle, depósitos aluviales lacustres, etc. Cabe destacar también la formación de depósitos de arenas de origen principalmente arcósico en las zonas Sur y Oeste como resultado de la erosión del viento.

3.1.2. Hidrogeología:

Las formaciones acuíferas de la cuenca del Duero se pueden clasificar de diversas maneras. En el trabajo “Mapa Hidrogeológico de CyL (Junta Castilla y León)” se clasifican estas formaciones en acuíferos permeables por porosidad o acuíferos permeables por fisuración/karstificación. En la cuenca del Duero se distinguen tres tipos de acuíferos (Figura 3); el gran acuífero terciario compuesto casi en su totalidad por materiales terciarios con permeabilidad por porosidad; los acuíferos superficiales que se apoyan sobre el anterior (páramos calizos con permeabilidad por fisuración/karstificación, y rañas y aluviales con permeabilidad por porosidad; y por último los acuíferos mesozoicos en los bordes de la cuenca, con materiales y comportamiento mixto.

Las rocas ígneas y metamórficas ubicadas al exterior de la cuenca pueden constituir acuíferos importantes localmente, pero no sistemas acuíferos de importancia regional.

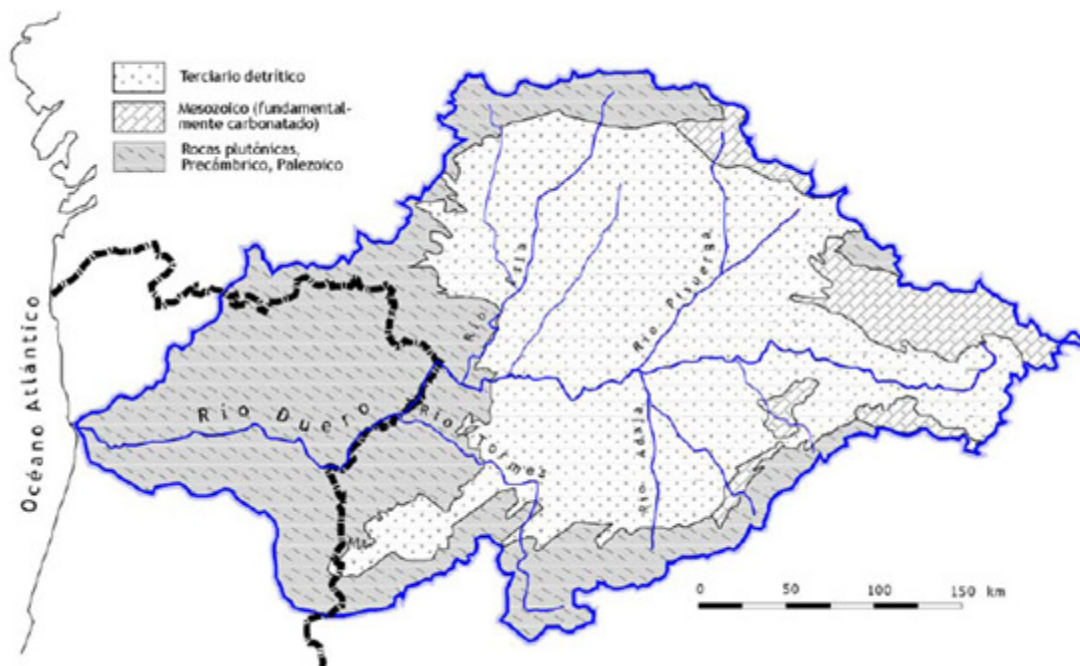


Figura 3: Esquema geológico de la cuenca del Duero. (Fuente: “Los Grandes Acuíferos de la Cuenca del Duero”, F. J. Sánchez San Román, en adelante Sánchez San Román)

Otro criterio en la clasificación de los acuíferos en esta región es su profundidad y espesores, pudiendo encontrar acuíferos superficiales y acuíferos profundos. Los primeros de ellos se corresponden con los depósitos cuaternarios de arenas, rañas y los correspondientes a los páramos, de carácter libre y espesores pequeños. Los acuíferos profundos están formados por los materiales del Terciario detrítico que rellenan la depresión, y que se comportan como una sola unidad acuífero, con homogeneidad y condiciones de confinamiento variables por zonas de la cuenca.

A continuación se muestran las características hidrogeológicas de las principales formaciones de la cuenca:

Las primeras formaciones de interés desde el punto de vista acuífero están compuestas por materiales mesozoicos, y se sitúan principalmente en la región oriental. Alberga acuíferos desarrollados fundamentalmente sobre materiales calcáreos karstificados, en algunas zonas englobados por formaciones detríticas. Se comportan generalmente como acuíferos libres, aunque por zonas pueden estar confinados y semiconfinados, con valores de transmisividad variables entre los 20 y los 3000 m²/día (mayores incluso en las zonas de máximo espesor) y coeficientes de almacenamiento muy variables entre 0.01 y 0.0006.

La recarga tiene lugar por infiltración de agua de lluvia y escorrentía de relieves adyacentes. Estas formaciones se prolongan en profundidad hacia el centro de la cuenca, bajo el acuífero terciario, al que ceden recurso recargado en sus zonas aflorantes periféricas. Las extracciones de la zona suponen en general muy poca cantidad de recurso.

Como se comentó en el apartado anterior, las formaciones ubicadas al exterior, principalmente en la zona occidental, forman una banda de materiales hercínicos. La baja permeabilidad de estos materiales limita su capacidad de almacenamiento y transporte de agua, por lo que solo cabe esperar la presencia de ciertos acuíferos de carácter local en la zona más superficial, expuesta a la alteración, o formaciones locales con permeabilidad asociada a fracturación.

El terciario es la era con mayor representatividad e importancia de la zona, pues es cuando se depositan los materiales detríticos que guardan el mayor potencial de almacenamiento y transporte de agua, dadas su extensión y potencia. Todo el relleno de la depresión del Duero se compone de materiales terciarios detríticos que se comportan como una sola unidad heterogénea y anisótropa.

La unidad más representativa del terciario es el acuífero detrítico profundo, no obstante existen materiales de finales del terciario que componen otras unidades superficiales como son los páramos, ubicadas sobre el anterior. Estas unidades se explican conjuntamente con los denominados acuíferos detríticos superficiales.

Acuífero detrítico profundo

El acuífero detrítico profundo está compuesto por lentejones de arenas y gravas de escasa continuidad lateral procedentes de los bordes, envueltos en una matriz limo-arcillosa de comportamiento acuitardo. Su extensión ronda los 43.000 km² y el espesor medio es aproximadamente de unos 1000 m, siendo creciente hacia el cauce del río y hacia el Este, con espesores superiores a 3.000 m en la zona de Aranda de Duero. Los valores de

transmisividad son muy variables, oscilan entre 5 y 100 m²/día, con valores de hasta 500m²/día en algunas zonas puntuales.

La variedad de su litología y sus complejas relaciones tanto horizontales como verticales dotan al acuífero de un comportamiento hidráulico muy diverso, con apariciones de estratos confinantes discontinuos a modo de acuitardos. Todo ello lo convierte en un gran acuífero heterogéneo y anisótropo, confinado o semiconfinado según zonas, con una complicada distribución del flujo tridimensional. La dimensión vertical del flujo tiene su origen en el escaso encajamiento de los cauces superficiales.

El flujo regional, representado en el acuífero profundo, sigue aproximadamente una distribución de los bordes hacia el centro de la cuenca y tramos finales del río Duero (ver Figura 4). La propia morfología de la cubeta tiene es muy determinante en el funcionamiento hidrogeológico del acuífero, ya que se origina una zona de descarga preferencial en la zona donde contactan los materiales impermeables y los sedimentarios. En esta zona se encuentra el punto de drenaje subterráneo más bajo de la cuenca, a cota 630 (situado en torno a Zamora).

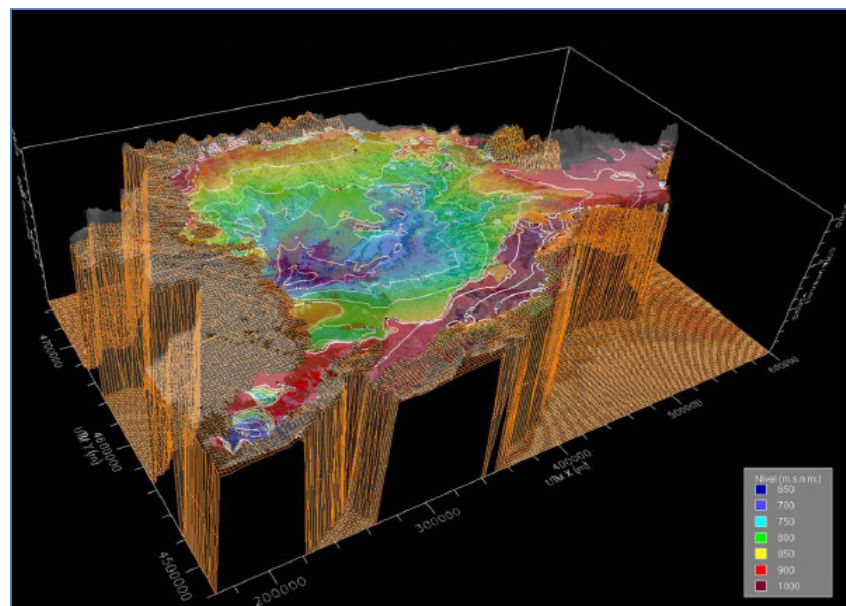


Figura 4: Esquema general de flujo subterráneo en la cuenca del Duero (Fuente: OPH, 2009)

La recarga se produce por infiltración del agua de lluvia (en ocasiones a través de las unidades superficiales), por entradas laterales desde otras unidades, y por retornos de riego. Las descargas se producen por drenaje a los ríos y por extracciones.

Acuíferos detríticos superficiales

Los acuíferos detríticos denominados superficiales son los formados en los páramos calcáreos, en los depósitos cuaternarios de arenas, en las rañas y en los aluviales de los ríos.

Los acuíferos carbonatados de los páramos se asientan sobre los sedimentos detríticos y se componen de una facies margo-yesífera coronada por una facies calcárea. La facies margo-yesífera es la de mayor espesor y aísla la facies calcárea de los acuíferos detríticos.

El espesor saturado es variable en los diferentes páramos; entre 5 y 15 m en el páramo de Torozos; alrededor de 35 m de espesor medio en el páramo de Cuellar... En todos los casos con espesores medios inferiores a 10 metros.

La disposición estructural de estos acuíferos condiciona su funcionamiento hidráulico, de régimen libre con recarga por infiltración de agua de lluvia y descarga por los canales kársticos que desembocan en manantiales dispuestos radialmente en la periferia del páramo. En algunos de los páramos es de señalar que además de las salidas por manantiales se dan extracciones someras que en ocasiones han provocado pequeños descensos de niveles.

Aparte de los páramos calcáreos (situados en la zona centro-oriental de la cuenca del Duero), son importantes las formaciones acuíferas que se dan en los depósitos de arenas cuaternarias, que cubren el terciario y que en la zona Sur dan nombre a la región de Los Arenales. Se trata de unos depósitos de considerable extensión y reducido espesor (5-15 m), que se comportan como acuífero libre recibiendo agua por infiltración de agua de lluvia, reteniéndola, y cediéndola posteriormente a las formaciones terciarias subyacentes, reduciendo la escorrentía superficial y favoreciendo la recarga de las mismas. La transmisividad oscila entre 10 y 100 m²/día y la capacidad de regulación de estos arenales es pequeña.

Las rañas son depósitos de cantos y bolos de material fundamentalmente cuarcítico, que se sitúan principalmente en la mitad Norte de la depresión, en los interfluvios Órbigo-Esla y Esla-Cea y en la margen derecha del río Carrión. Los espesores medios varían de Norte (hasta 30 m) a Sur (5 metros).

Constituyen un acuífero libre con escaso potencial de explotación a gran escala. La transmisividad es pequeña, inferior a 10 m²/día, y los caudales también.

En última instancia se encuentran los depósitos aluviales de los ríos y niveles de terrazas adyacentes. La entidad de estos depósitos es muy reducida por contar con pequeños espesores saturados, ya que el encajamiento de los ríos y su consecuente vaciado erosivo fueron muy escasos.

Estas formaciones tienen un papel de regulación en la relación entre los ríos y el acuífero terciario detrítico subyacente, intermediando en la ganancia/perdida de agua. Por otro lado, ese papel conector puede dotar a estas formaciones de considerables posibilidades de explotación. Las formaciones más destacables en la zona de estudio se localizan en los aluviales del río Duero, con caudales de hasta 15 l/s.

3.2. Piezometría

3.2.1. Introducción

La bibliografía existente y los trabajos realizados con anterioridad en la Región de los Arenales² hablan de un sistema acuífero muy complejo confinado o semiconfinado según zonas, heterogéneo y anisótropo.

En el presente apartado del trabajo se pretende analizar el acuífero en base a la piezometría, estudiando el estado y la evolución de los niveles piezométricos hasta la actualidad. La finalidad última es la integración de los resultados con el resto de los análisis para la comprensión global del funcionamiento del acuífero.

3.2.2. Objetivo

El análisis de la piezometría del acuífero pretende determinar el estado actual y la evolución de los niveles piezométricos, intentando buscar la relación entre el comportamiento de la piezometría y los patrones que la rigen. Se pretende llevar a cabo un análisis espacial trabajando con grupos de piezómetros según la cota del pozo y a la profundidad del mismo.

Lo ideal tras la realización del análisis piezométrico sería poder agrupar zonas según un comportamiento relativamente homogéneo en cuanto a nivel piezométrico y tendencia general.

Además, consecuencia del estudio se pretende poder dar respuesta a los saltos bruscos y puntos de inflexión que presentan algunos piezómetros, descartar aquellos piezómetros anómalos cuyo registro carezca de lógica, etc.

Más adelante, y en base a los resultados del resto de análisis, se pretende que las conclusiones ayuden en la definición de un modelo simplificado de flujo para su integración en el modelo de utilización conjunta del sistema.

² Región de Los Arenales, antigua unidad hidrogeológica 02.17, según nomenclatura del utilizada antes de la implantación de DMA. Se corresponde con las MAS 45, 47 y 48.

3.2.3. Datos y procedimiento

Datos disponibles

Se dispone de una base de datos de piezometría proporcionada por la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) de la CHD en Diciembre de 2009, que consta de 55.413 registros procedentes de piezómetros de la cuenca del Duero, y otros datos asociados a los mismos como coordenadas, profundidad, cota...

Se trata de una recopilación de datos de piezometría de diversas fuentes: CHD, Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino (MARM), IGME, Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) y el hoy extinto Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP).

Los datos disponibles son series temporales de nivel, que han sido transformadas a nivel piezométrico. La serie más larga disponible para esta zona data de 1966, no obstante las series con comienzo en ese año cuentan con muy pocos datos hasta 1972. 1972 es el año con mayor número mediciones de todos. Por otro lado, para muchos de los piezómetros cuya serie comienza en 1972 la serie termina en 2001, por lo que a partir de 2001 el número de piezómetros de que se disponen datos es menor, aunque con una frecuencia mayor.

Por todo lo anterior se ha dividido la serie temporal en tres periodos; el periodo A que incluye desde los años 1966 hasta 1972, el periodo B desde 1972 hasta 1999, y el periodo C desde 1999 hasta 2009.

Para facilitar el tratamiento y operación de los datos se ha procedido inicialmente a un filtrado de la base de datos eliminando los piezómetros fuera de la zona de estudio, aquellos con un número de registros inferior a 10 o que éstos estuvieran dispersos en el tiempo, por considerarse dudosa la fiabilidad de una serie tan corta. Dado que el principal objetivo es analizar la evolución de la piezometría se requieren series de la mayor longitud posible. La base de datos filtrada consta de 33.560 registros.

Es importante apuntar que los datos de que se dispone no tienen una frecuencia temporal definida y común, pues son mediciones de campañas y fuentes diferentes. De la mayoría de los piezómetros se dispone de un par de mediciones anuales, de algunos sólo de una o ninguna, y en otros casos, a partir del año 2004 hasta la actualidad, se dispone de registro mensual. En las zonas de especial interés (la Región de Los Arenales, donde se trabaja con unidades de Modelación), se trabajará considerando las mediciones mensuales. En el resto de zonas se trabaja con el valor medio anual del nivel, que permite distinguir la tendencia con mayor claridad.

Por último, a la hora de representar los gráficos, y para hacerlos más visibles, se han seleccionado los piezómetros representativos de la tendencia de un grupo de éstos, eliminando en ocasiones otros que no arrojan información suplementaria.

Unidad de análisis

El análisis será llevado a cabo para las MAS que serán incluidas en el balance del acuífero³. En la Región de los Arenales los piezómetros se agrupan de un modo diferente en superficies llamadas unidades de modelación. El término unidad de modelación (Umod) es el utilizado actualmente por la Oficina de Planificación Hidrológica de la CHD en los modelos de gestión de recursos hídricos desarrollados con la herramienta SSD AQUATOOL DMA, y está basado en una clasificación de la zona anterior al concepto de MAS como se conoce hoy a raíz de la Directiva Marco del Agua (DMA) Esta división en unidades de modelación pretendía dividir la antigua unidad hidrogeológica 02.17, Región de los Arenales, en zonas más pequeñas, para una mejor caracterización.

La correspondencia entre las Umod y las MAS en la Región de los Arenales se puede visualizar en el mapa de la Figura 5 y se detalla en Tabla 1.



Figura 5: Mapa de la Región de Los Arenales con la correspondencia entre las Masas de Agua Subterránea (negro) y las Unidades de Modelación (rojo).

³ La selección de la zona del balance se lleva a cabo en el apartado "Balance del acuífero". Las MAS seleccionadas se muestran en la Figura 158.

Las unidades de modelación se representan con el fondo rallado y el nombre en cursiva, las MAS con el nombre en letra mayúscula.

	MAS	45	47	48
Umod		LOS ARENALES	MEDINA DEL CAMPO	TIERRA DEL VINO
08.14	Arenales Esgueva-Cega	100.00%	0.00%	0.00%
08.15	Arenales Adaja-Zapardiel	16.04%	83.96%	0.00%
08.16	Arenales Guareña-Trabancos	0.00%	41.26%	58.74%

Tabla 1: Correspondencia entre las Masas de Agua Superficial y las Unidades de Modelación en la Región de los Arenales.

Representación de los piezómetros y otras consideraciones

Los resultados se presentan en gráficos, con sus mapas asociados para la correcta ubicación de los piezómetros. En el eje y se representa el nivel piezométrico y en el x el tiempo. La leyenda está ubicada en la parte derecha, y en ella figuran el nombre del piezómetro, y pueden hacerlo también otros datos como la profundidad y la cota de los piezómetros.

Como se comentó anteriormente, se va a trabajar con grupos de piezómetros según la cota del pozo y a la profundidad del mismo.

Los rangos altitudinales se elegirán en cada caso según los datos disponibles, ya que el gran número de piezómetros de algunas zonas obliga a la separación de los mismos en gráficos diferentes para la correcta visualización del mismo.

La determinación de los rangos en profundidad es bastante compleja dada la ausencia de límites físicos (geológicos) que dividan el acuífero. Para ello se recurre a la bibliografía existente.

El estudio “ DGOHCA, 2002” implementa un modelo de flujo para la Región de los Arenales dividiendo el acuífero en profundidad en cuatro capas, cuyos rangos de profundidad van desde la superficie hasta 50 metros, 50-100, 100-200 y más de 200 metros.

Por otro lado, según datos de la CHD se pueden diferenciar dos comportamientos dentro del acuífero terciario, uno entre 40 y 100 metros y el otro a partir de 200 metros. Los límites en profundidad son en todo caso difusos, aunque de estos dos rangos se interpreta que por encima de 40 metros es donde pueden encontrarse los depósitos cuaternarios u otras formaciones que se comportan como acuíferos libres, y que en el rango entre 100 y

200 metros la piezometría se comporta como en la parte superficial o bien como la profunda.

Se optó finalmente por comenzar a trabajar dividiendo los piezómetros en superficiales y profundos según un límite a 200 metros de profundidad. La idea es basarse principalmente en las tendencias de los piezómetros e intentar explicar el funcionamiento dadas la cota, ubicación y profundidad de cada uno.

En determinadas zonas de especial interés por su problemática como en la Región de Los Arenales se ha trabajado puntualmente dividiendo el bloque superficial en dos, 0-100 y 100-200.

3.2.4. Limitaciones del análisis

El principal condicionante para el análisis de la piezometría es la heterogeneidad de los datos y su incertidumbre asociada.

Como se comentó anteriormente, la base de datos con que se trabaja procede de una recopilación con datos de fuentes diferentes, por lo que en muchos casos los datos no disponen de una frecuencia temporal similar, o los registros pertenecen a periodos diferentes por lo que no son comparables...en definitiva, se trata de datos bastante heterogéneos.

Por otro lado, de cara al objetivo del presente trabajo, los datos disponibles son en ocasiones insuficientes para una correcta interpretación del comportamiento del acuífero, como por ejemplo para analizar lo ocurrido en las última décadas, ya que la mayoría de los registros finaliza en el año 2001. Además, la propia heterogeneidad de los materiales obliga a disponer de muchos datos, ya que se necesitan piezómetros a diferentes profundidades y con series de datos de la mayor longitud posible (al menos para diferenciar los escenarios anterior y posterior a las afecciones).

Además de la heterogeneidad de los datos, el principal inconveniente es la incertidumbre asociada a los mismos, ya que en muchas ocasiones se carece de información acerca del estado de los piezómetros que toman los registros, de si se trata de piezómetros, sondeos, pozos...

Igualmente, en muchas ocasiones los registros disponibles pertenecen a piezómetros en mal estado, bien porque no se perforaron debidamente, porque no han recibido el mantenimiento adecuado, o porque directamente se desconoce el estado del mismo...Es probable que bastante de los piezómetros que miden a grandes profundidades estén

registrando en realidad el nivel piezométrico correspondiente a una profundidad menor, por no estar bien cerrados.

En definitiva, si bien no son escasos los registros piezométricos de que se dispone, la incertidumbre asociada a los mismos invita a ser cauteloso con las interpretaciones de las series. La confección de una red piezométrico completa, homogénea y fiable es fundamental para este tipo de análisis, más aún si cabe en acuíferos de estas características. Por otro lado, la necesidad de disponer de series de datos de la mayor longitud posible invita no solo a la implantación de nuevos piezómetros, sino a la revisión de los existentes, de cara a seleccionar aquellos válidos y poder así conservar series de datos largas.

3.2.5. Resultados

Arenales Guareña

Periodo 1972 -1999

Profundidad inferior a 100 metros

Para profundidades inferiores a 100 metros la tendencia es estable en todos los piezómetros, no obstante en algunos de ellos se pueden intuir pequeños descensos de 5 metros de magnitud. Las diferentes alturas que miden los piezómetros tienen su origen en la diferente localización de los mismos. Se muestran los registros de los piezómetros divididos en dos grupos según su cota.

Los piezómetros ubicados a cota superior de 900 m.s.n.m se muestran en el Anexo 1. El único el piezómetro con una serie continua y larga de datos, 151960001, muestra una tendencia en general estable con pequeñas oscilaciones.

En la Figura 6 (piezómetros ubicados a una cota menor de 900 m.s.n.m) la mayoría de los piezómetros presentan oscilaciones suaves a las cuales es complicado atribuir alguna acción externa tipo recarga o bombeo.

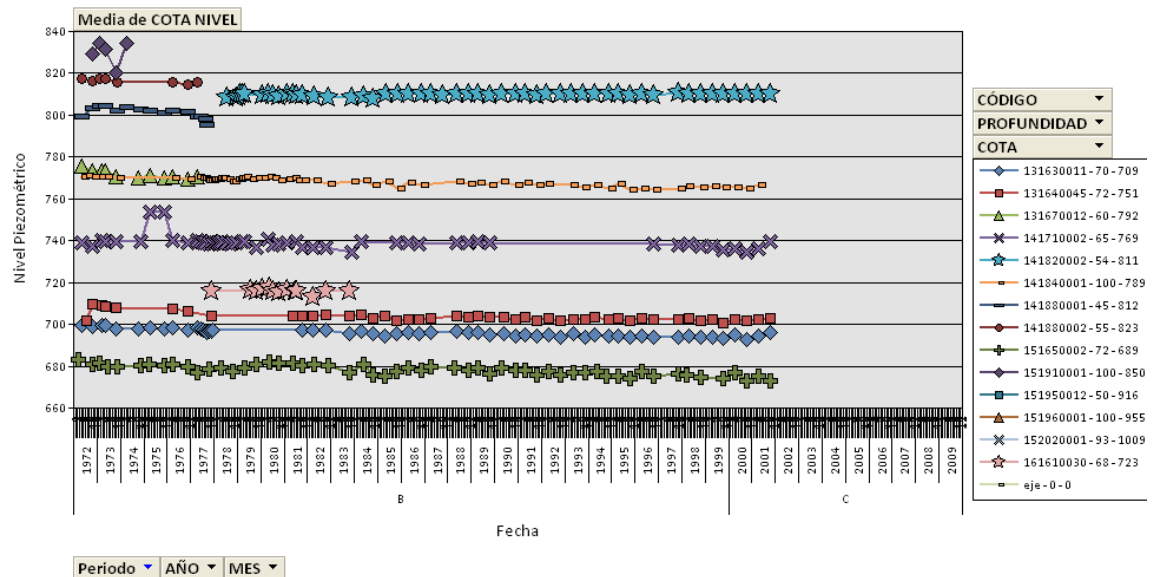


Figura 6: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad menor de 100 metros con nivel piezométrico inferior a 850 m.s.n.m.

De estos piezómetros, la mayoría marca a lo largo de la serie un descenso de entre 4 y 7 metros, véase piezómetros 151650002, 131630011, 131640045, 141710002 y 141840001 (señalados en azul en la Figura 7). Es importante señalar que todos los

piezómetros superan los 60 metros de profundidad, límite a partir del cual parecen comenzar los mayores descensos.

Hay también varios piezómetros con series cortas de las cuales apenas se puede sacar conclusiones, y hay alguno que apenas varía el nivel en toda la serie (141820002, marcado en amarillo en la Figura 7), comportamiento realmente extraño y a analizar para su posible descarte.

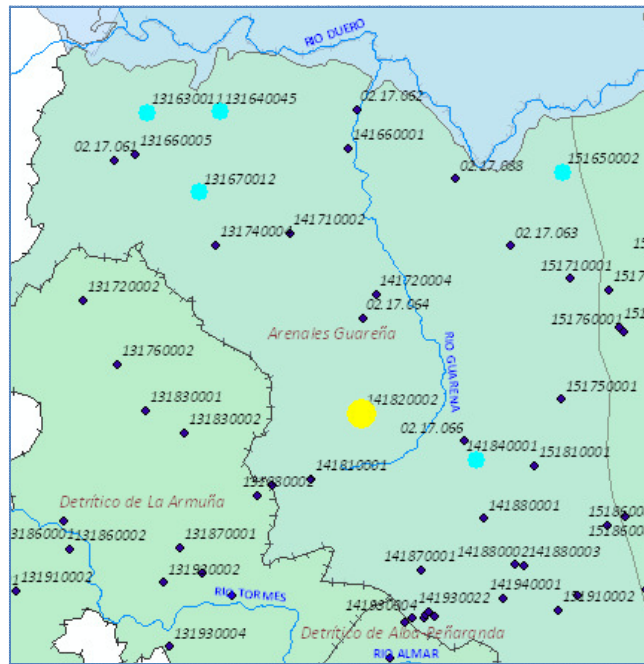


Figura 7: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 6 en azul. En amarillo el piezómetro 141820002.

Profundidades entre 100 y 200:

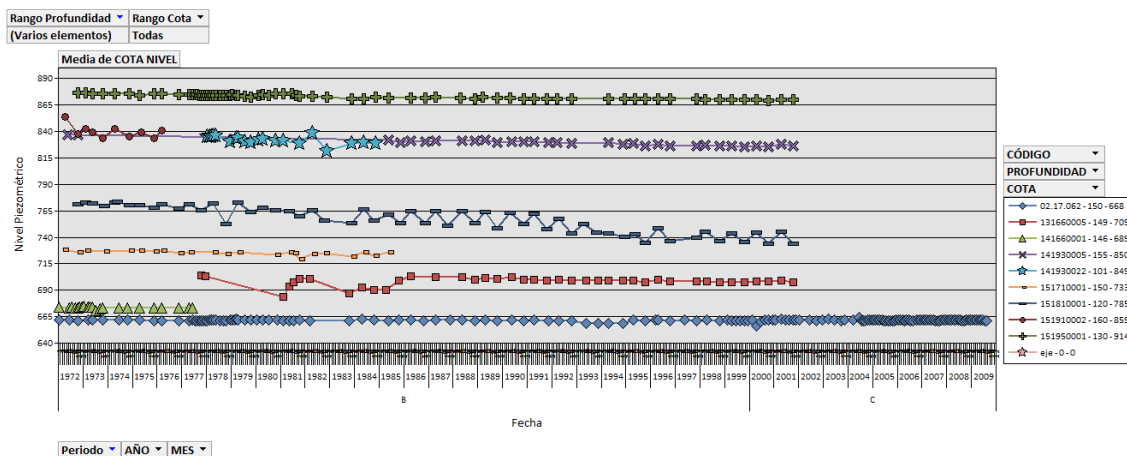


Figura 8: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.

No se puede hablar de un patrón de comportamiento similar, no obstante ya se atisba el descenso de niveles en la mayoría de los piezómetros. Este descenso es de unos 5-8 metros, en líneas generales (151950001, 131660005 y 141930005) aunque en el caso del piezómetro 151810001 el descenso es de hasta 28 metros (Figura 8). El piezómetro 02.17.62 se muestra invariable prácticamente toda la serie.

La Figura 9 muestra la ubicación en la zona de los tres piezómetros en los que se aprecia un descenso en torno de 5-8 metros (151950001, 131660005 y 141930005) con un punto azul, y el piezómetro 02.17.62 con un punto amarillo.

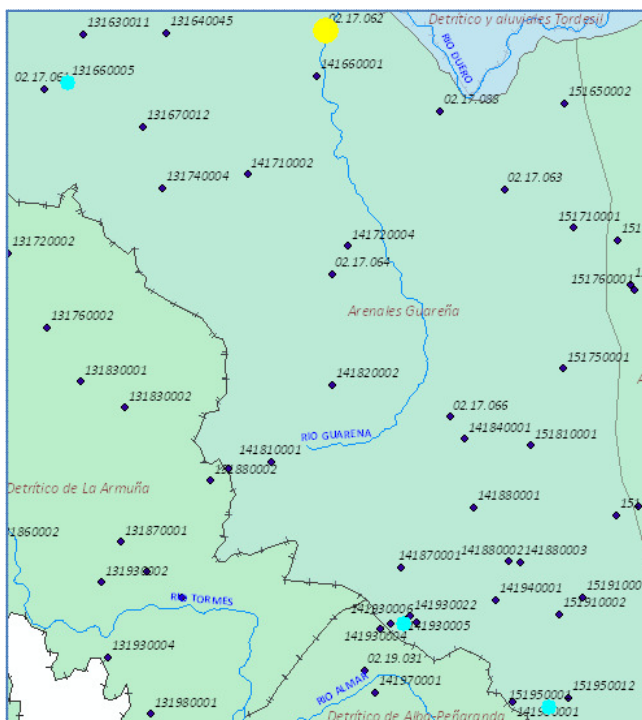


Figura 9: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 8 en azul. En amarillo el piezómetro 02.17.62.

El origen del diferente comportamiento de los piezómetros en el rango 100-200 metros puede estar debido a su ubicación con respecto a las extracciones más intensas, lo cual parece claro en el caso del 151810001.

Posteriormente se incluyeron en el análisis los piezómetros hasta 250 metros de profundidad para buscar comportamientos similares, y se observa cómo no siguen la misma tendencia.

Profundidad superior a 200 metros

En líneas generales se aprecia un claro descenso en los niveles registrados por la mayoría de los piezómetros. No obstante, no todos ellos descienden en igual magnitud, y se puede diferenciar entre un grupo principal con descensos totales entre los 20 y los 40 metros (Figura 10), otro grupo compuesto por tres piezómetros con descensos menores en torno a los 10 metros (Figura 11), y un último grupo con tendencia estable, quizás anómala.

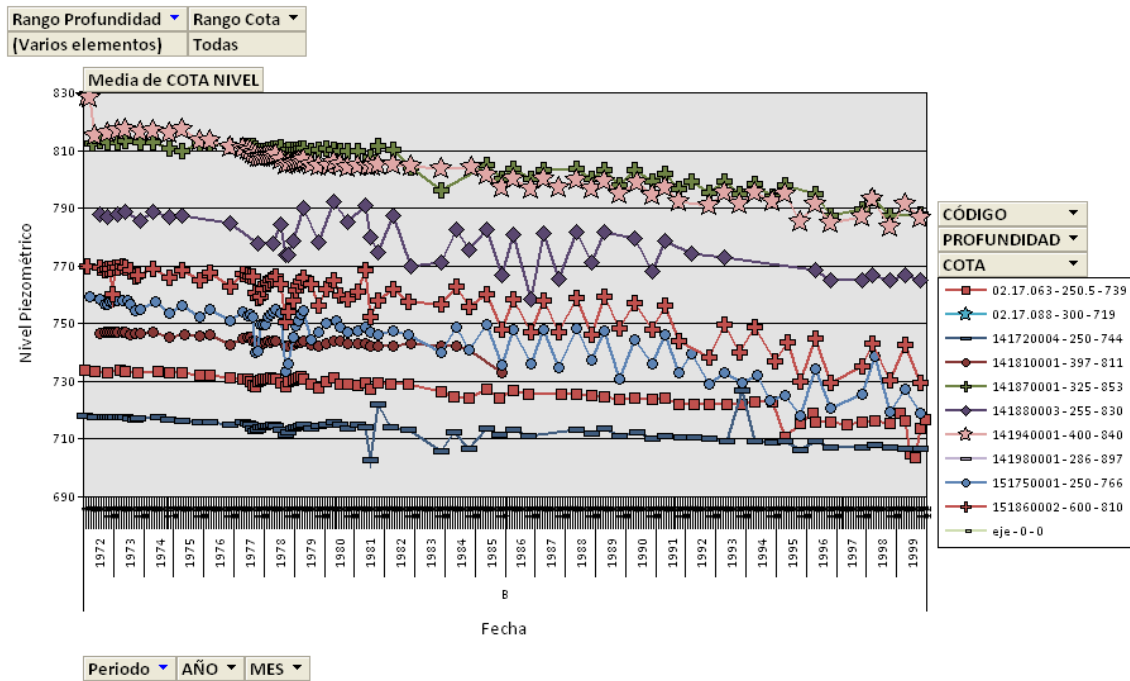


Figura 10: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

En el gráfico de la Figura 10 donde se muestran los piezómetros que registran mayores descensos, se aprecia cómo, además de la relativa coincidencia en la magnitud de los descensos, parecen responder en el tiempo de igual manera a los ascensos y descensos más bruscos, si bien presentan oscilaciones de magnitud diferente, cuyo origen habrá que analizar más adelante. Existe además otra serie de piezómetros que muestran la misma evolución al comienzo de la serie (primeros diez años) pero luego se deja de tener registro de ellos, por lo que no se han tenido en cuenta. Los piezómetros mostrados toman agua de profundidades desde 227 metros hasta 600.

En el gráfico de la Figura 11 se aprecian los registros del segundo grupo compuesto por los tres piezómetros que marcan un descenso total en torno a 11 metros, y cuyo comportamiento entre ellos es análogo, únicamente marcando niveles diferentes por la diferente ubicación.

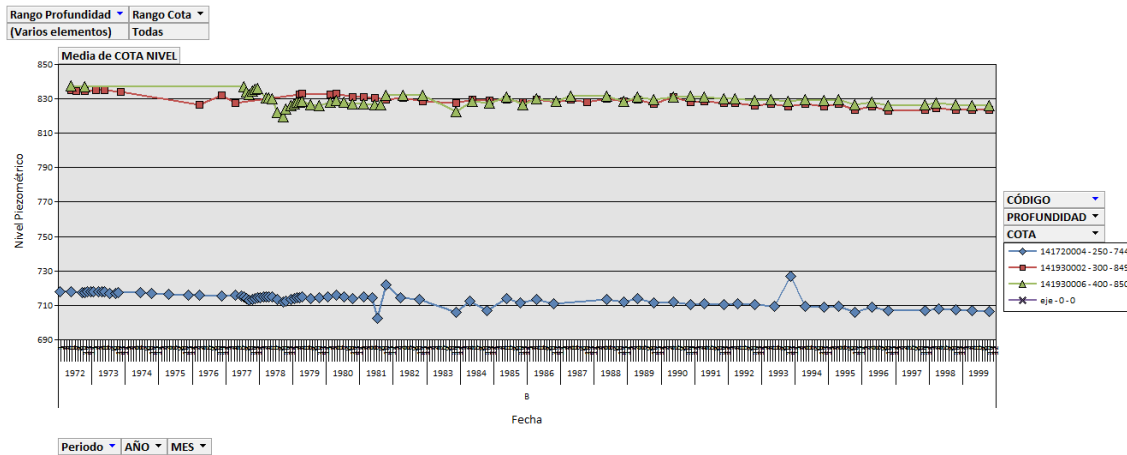


Figura 11: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

A falta de un estudio de localización de las extracciones, parece ésta la causa más probable del descenso, ya que dada su profundidad parecen quedar fuera de la influencia de los ríos cercanos (ubicación en Figura 12). Dicha figura muestra en azul los piezómetros a profundidad mayor de 200 metros, y en amarillo los representados en la figura de arriba.

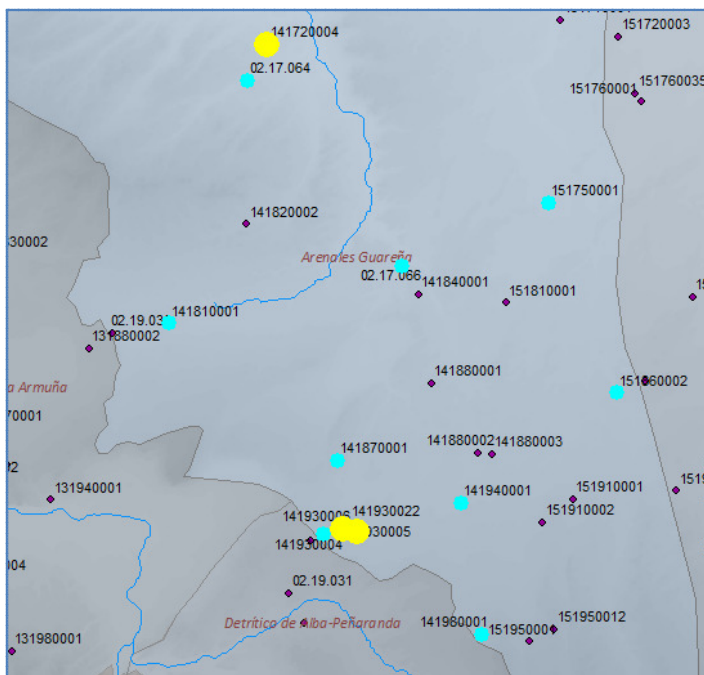


Figura 12: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 10 en azul y de la Figura 11 en amarillo.

Además, existe una serie de piezómetros que no sigue ninguna de las dos tendencias anteriormente comentadas, como son los 02.17.061, 02.17.066, 141930004 y 141980001. Todos ellos tienden a la estabilidad en el

periodo de tiempo considerado. No obstante, el segundo y el tercero lo hacen de forma constante, el primero baja 15 metros para subir luego 20 metros, ambos de forma brusca, y el cuarto de ellos parece responder de forma natural a entradas y salidas, dada su oscilación constante y su ciclicidad anual (también termina el periodo con mayores niveles que al inicio).

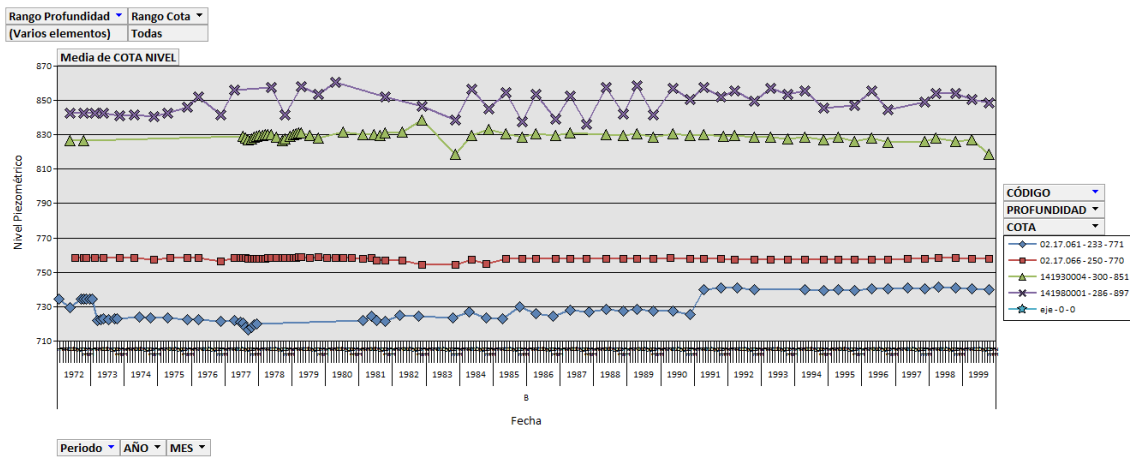


Figura 13: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

Los piezómetros de este último grupo (Figura 13) se localizan en rango de profundidad entre 200 y 300 metros, pero son dispares en cuanto a su ubicación (mapa de la Figura 14), por lo que no parecen ser representativos de un comportamiento tipo de la zona, y sí responder a causas particulares en cada caso.

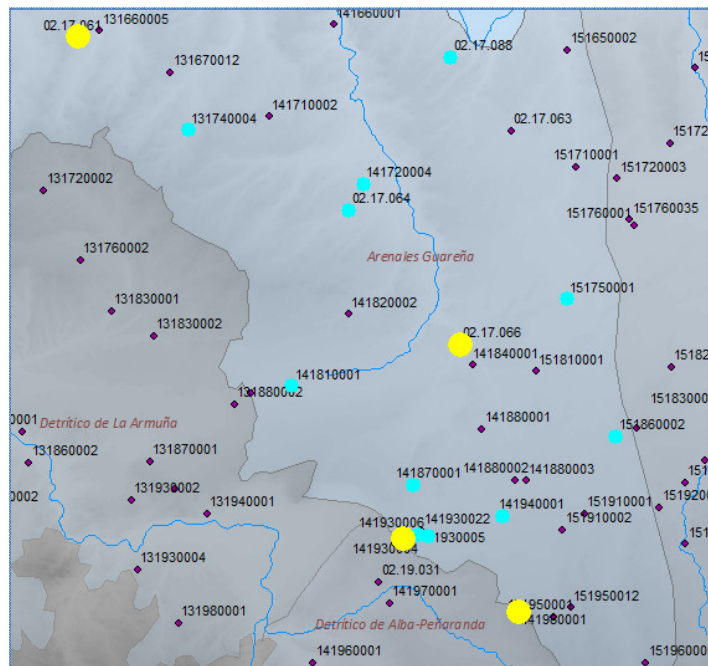


Figura 14: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 13 en amarillo.

Periodo 1999-2009

El gráfico de la Figura 15 muestra las series de los piezómetros para el periodo 1999-2009.

Si bien no se dispone de la misma cantidad de datos que en el periodo anterior, el final de las series pasadas que se muestran en los años 2000 y 2001, así como las existentes de ahí en adelante marcan la misma tendencia a la estabilidad para todas las profundidades de que se dispone información, que abarcan todo el rango de profundidades posibles (Figura 15).

Lo más destacable de la Figura 15 datos son las diferentes oscilaciones que muestran los piezómetros a diferentes profundidades, generalmente mayores en profundidad.

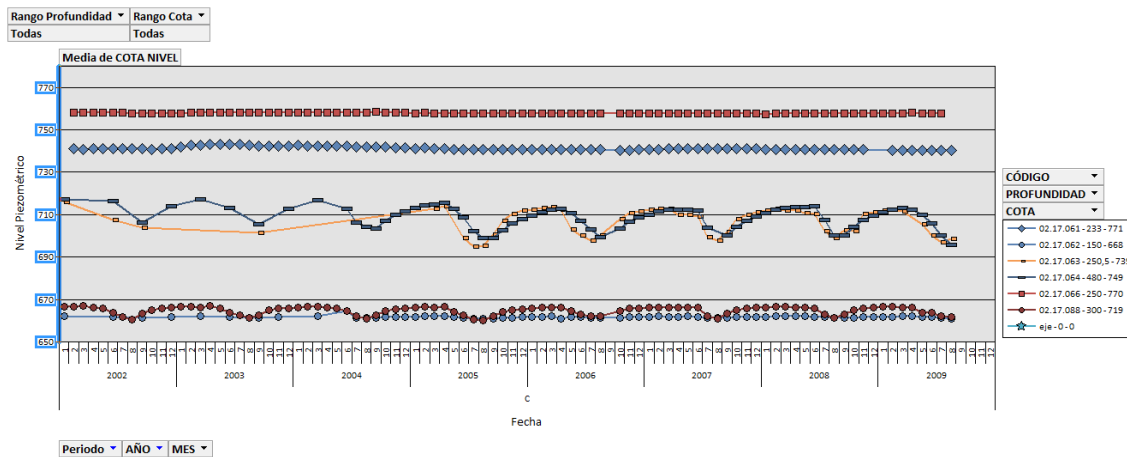


Figura 15: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para el periodo de tiempo 1999-2009

Como ocurría con la serie anterior, los piezómetros 02.17.61, 02.17.62 y 02.17.66 se muestran invariables en su registro a lo largo de toda la serie. El comportamiento actual de la zona de estudio ha variado con respecto a lo comentado anteriormente en el periodo pasado, ya que la principal característica es la estabilidad general.

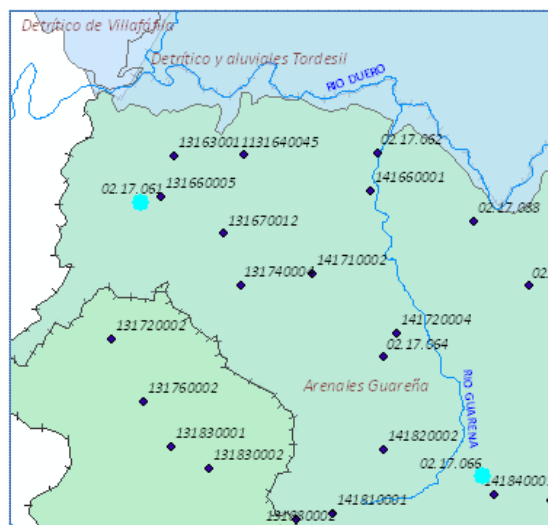


Figura 16: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros 02.17.61 y 02.17.66 en azul.

Arenales Adaja-Zapardiel

Periodo 1972-1999

Profundidad inferior a 100 metros

En la Figura 17 se representan aquellos piezómetros de profundidad inferior o igual a 100 metros.

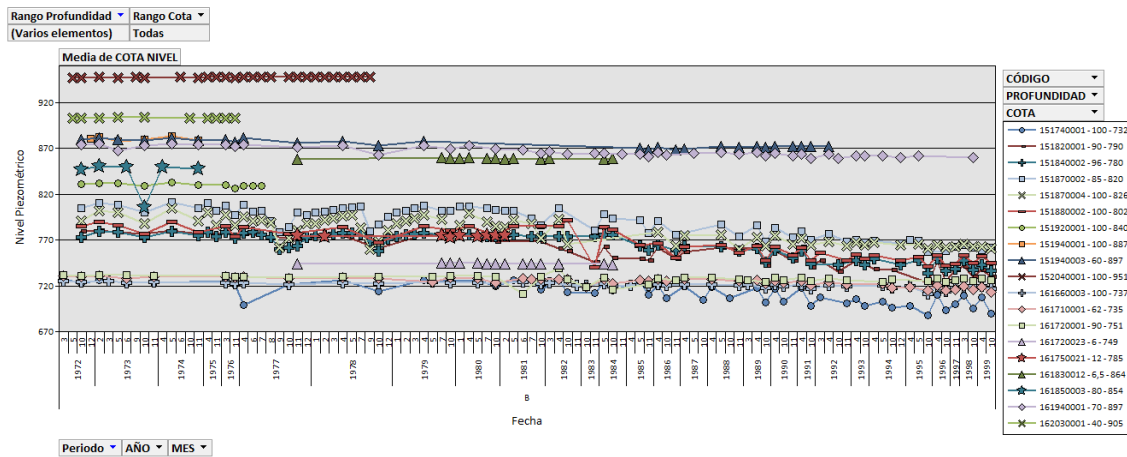


Figura 17: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.

Aparentemente existen dos tipos de comportamientos, uno estable en el que no existe variación de niveles, y otro en el que los niveles descienden.

El en Anexo 1 se muestran aquellos piezómetros con tendencia estable, muchos de los cuales constan de una serie de datos muy corta

Dentro del grupo en el que los piezómetros marcan niveles descendentes (Figura 18), se podría diferenciar a su vez dos grupos. En el primero de ellos los descensos oscilan entre 7 y 15 metros a lo largo del periodo (ubicación en Figura 19)

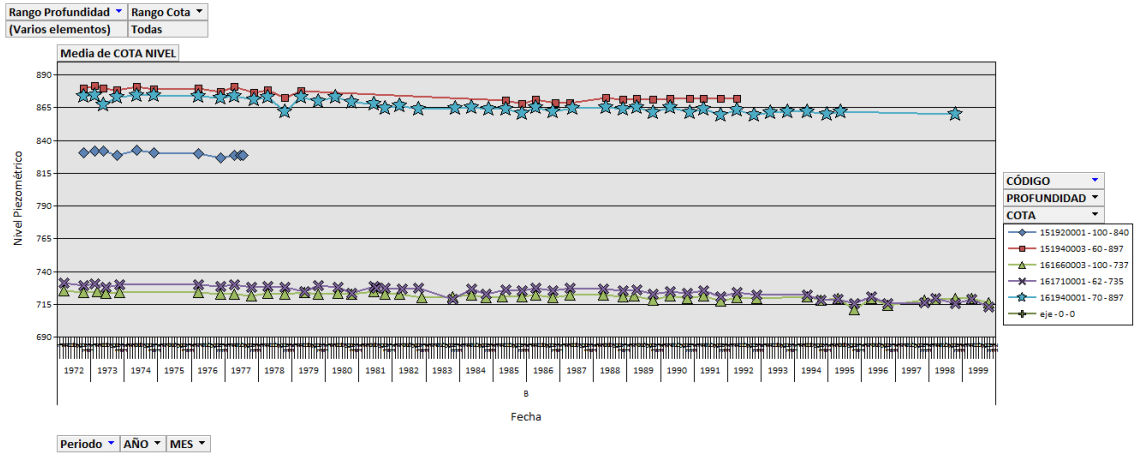


Figura 18: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.

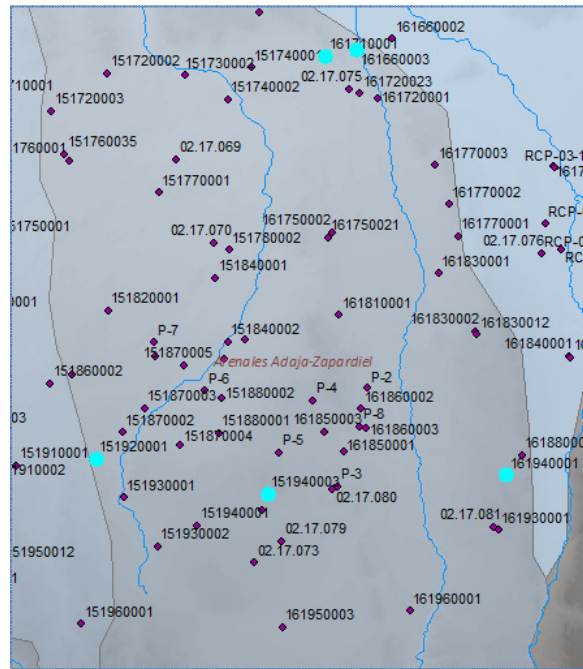


Figura 19: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 18 en azul.

Por otro lado, la Figura 20 muestra el registro de los piezómetros con niveles descendentes más pronunciados, todos los piezómetros están por debajo de los 85 metros de profundidad (rango 85-100). En este grupo los descensos que acontecen llegan a los 50 metros, y son como mínimo de 35 metros. (ubicación en Figura 21)

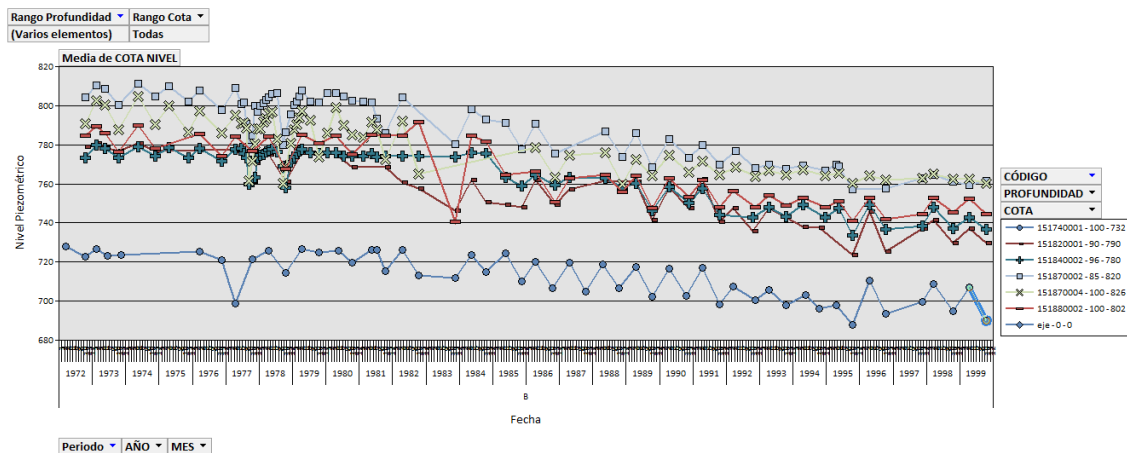


Figura 20: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.

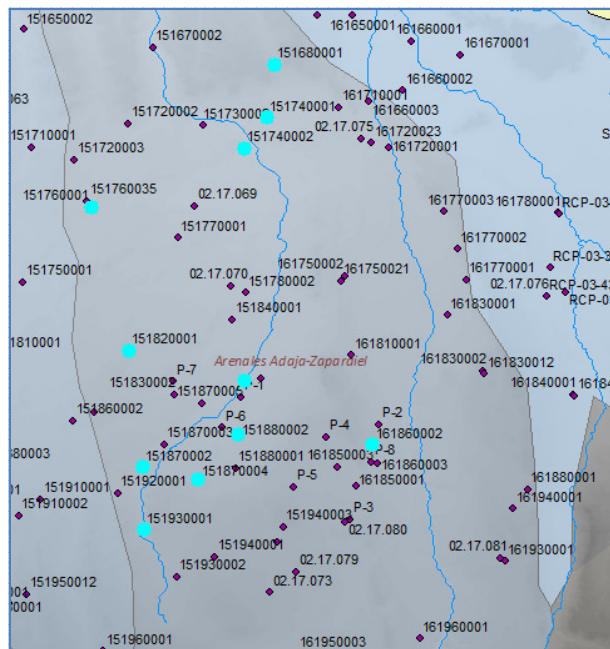


Figura 21: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 20 en azul.

Visto el análisis en la zona Arenales-Guareña, quizás el comportamiento esperado sería de estabilidad general en los primeros 100 metros para empezar a encontrar descensos a partir de esa profundidad. No obstante, la figura anterior indica que es a partir de 85 metros donde comienzan los descensos. Por ello, se analizó la existencia de tendencias similares en el siguiente rango de profundidad, hasta 150 metros. En análisis se muestra en el Anexo 1.

Se apreció que no todos los piezómetros en este intervalo de profundidad siguen la misma tendencia. Así, el intervalo 100-150 de profundidad marca, al igual que lo hacía el 0-100,

otra serie de piezómetros con descensos menores de entre 12 y 20 metros. Esto último es un ejemplo claro de la irregularidad en el comportamiento del nivel freático en profundidad.

Profundidad entre 100 y 150 metros.

En el análisis de los piezómetros entre 100 y 150 metros de profundidad se observan las dos tendencias ya vistas en otras zonas y para otros rangos: nivel constante y descenso de niveles, esta última en dos magnitudes diferentes (12-18 metros y más de 30 metros).

El primer grupo de piezómetros, aquellos con tendencia estable, se representa en el Anexo 1. El más representativo de todos ellos es el 161880001.

Del segundo de los grupos, los piezómetros que indican un descenso de niveles de rango 12-17 metros se muestran en la Figura 22. (ubicación en la Figura 23)

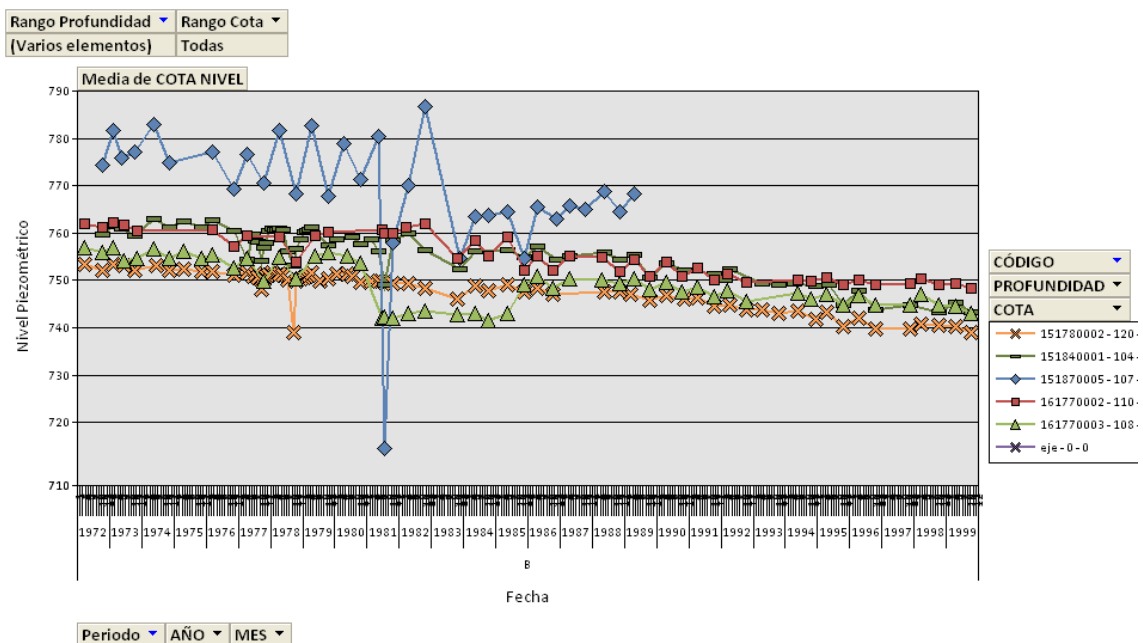


Figura 22: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-150 metros.

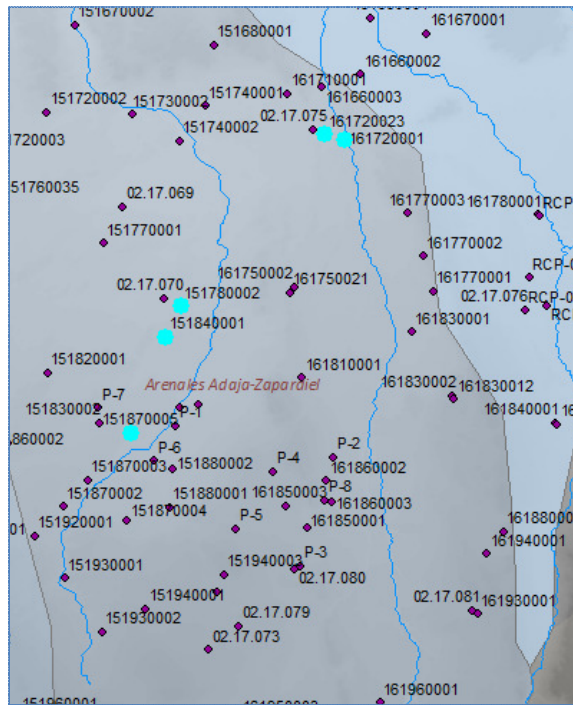


Figura 23: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 22 en azul

Y aquellos con mayores descensos, con descensos de hasta 50 metros, representados en la Figura 24. (ubicación en la Figura 25)

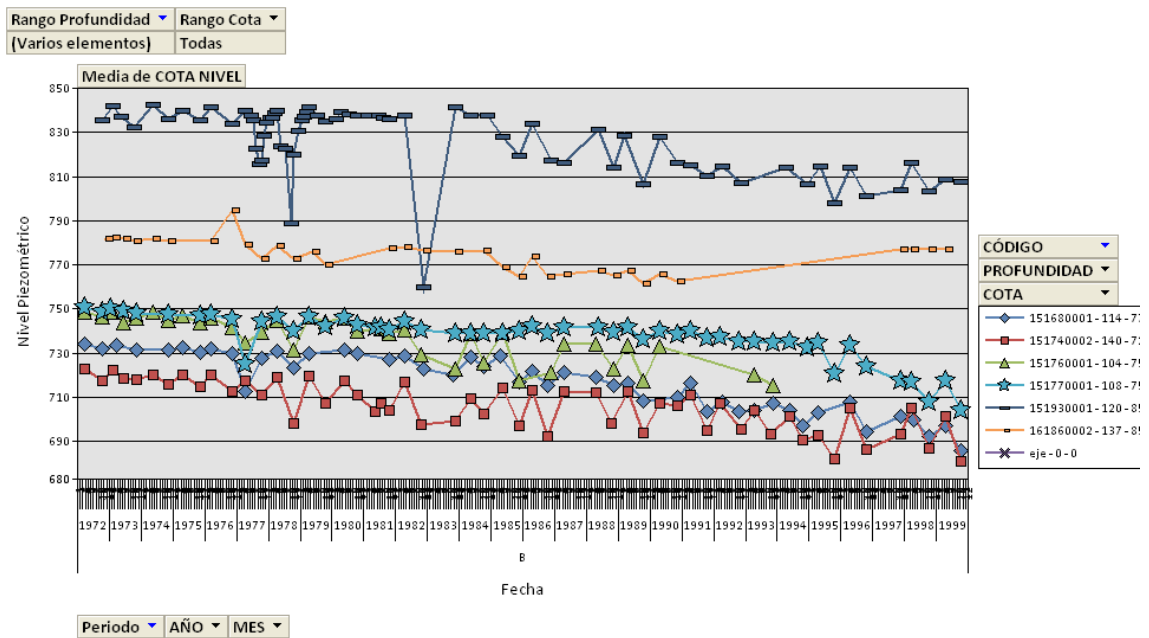


Figura 24: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-150 metros.

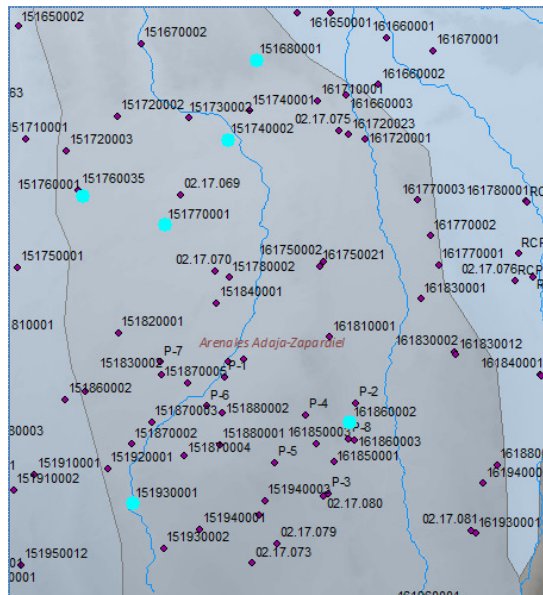


Figura 25: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 24 en azul

Profundidad entre 150 y 200 metros.

En este caso, al analizar los piezómetros ubicados a profundidad 150-200, todos ellos marcan una tendencia descendente, con valores totales de descenso en este periodo 1972-1999 de 20, 14, 18 y 23 metros para los piezómetros 151630001 y 151670002, 02.17.75, 161860003, y 02.17.72 y 02.17.79, respectivamente, en orden ascendente de cota. (véase gráfico de la Figura 26, ubicación en la Figura 27)

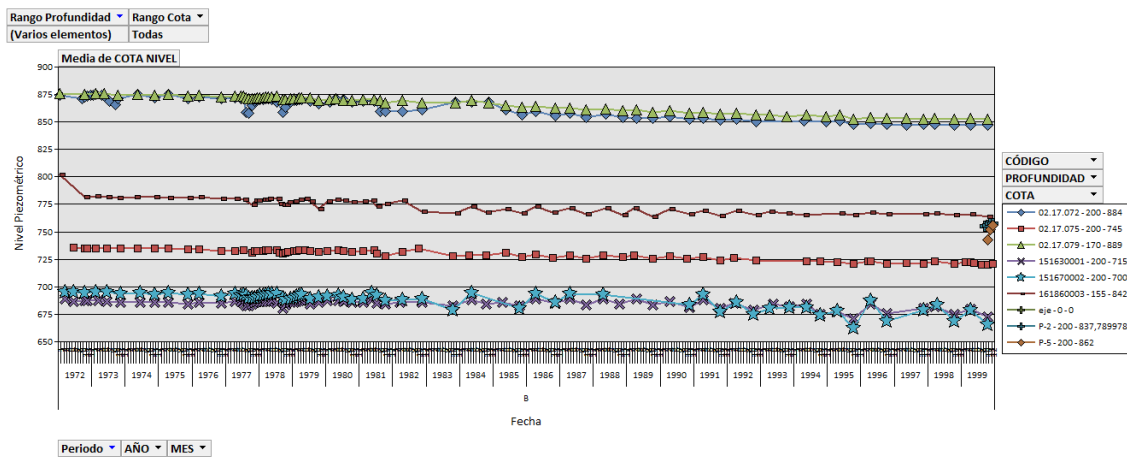


Figura 26: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 150-200 metros.

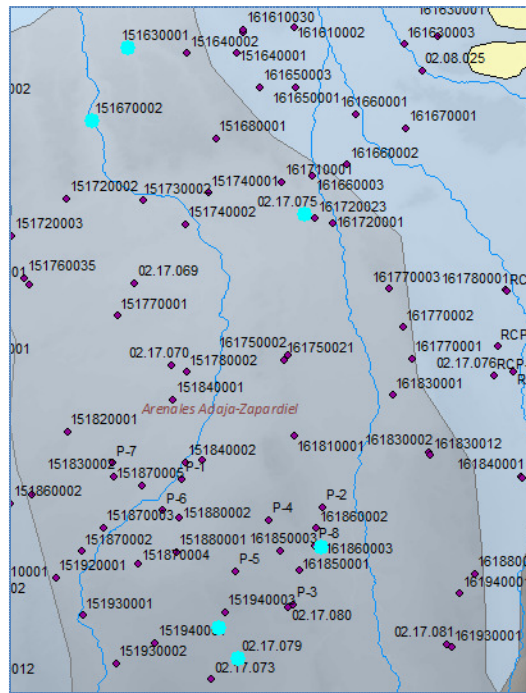


Figura 27: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 26 en azul.

Profundidad mayor de 200 metros

La tendencia general es al descenso, en magnitud incluso superior a 30 metros en alguno de los piezómetros. Los gráficos de las figuras 35 y 36 muestran los niveles registrados por los piezómetros de esta zona. Se han dividido en dos gráficos para aumentar la percepción de los descensos aumentando la resolución del eje.

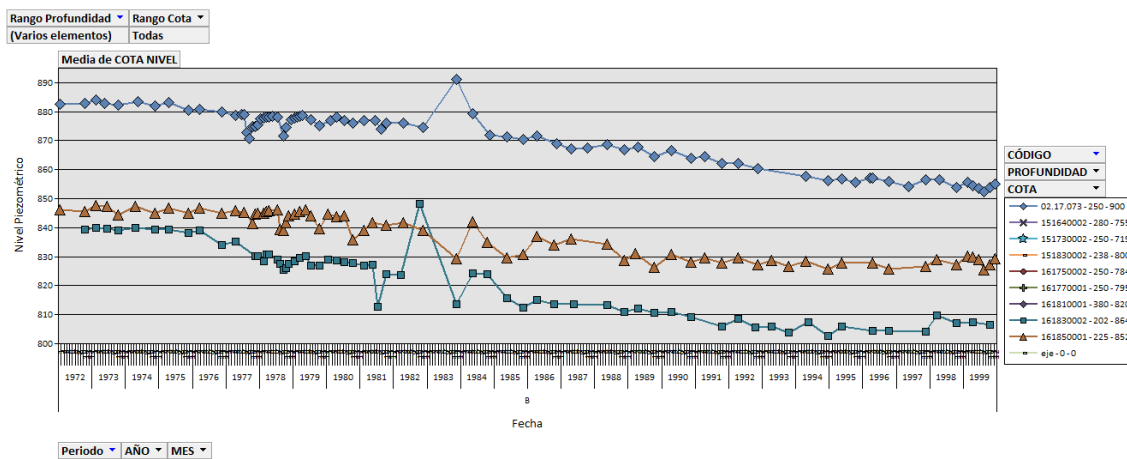


Figura 28: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

Este primer gráfico (Figura 28) muestra como los piezómetros además de coincidir en magnitud en cuanto al descenso de nivel, responden del mismo modo con subidas y bajadas bruscas de nivel coincidentes.

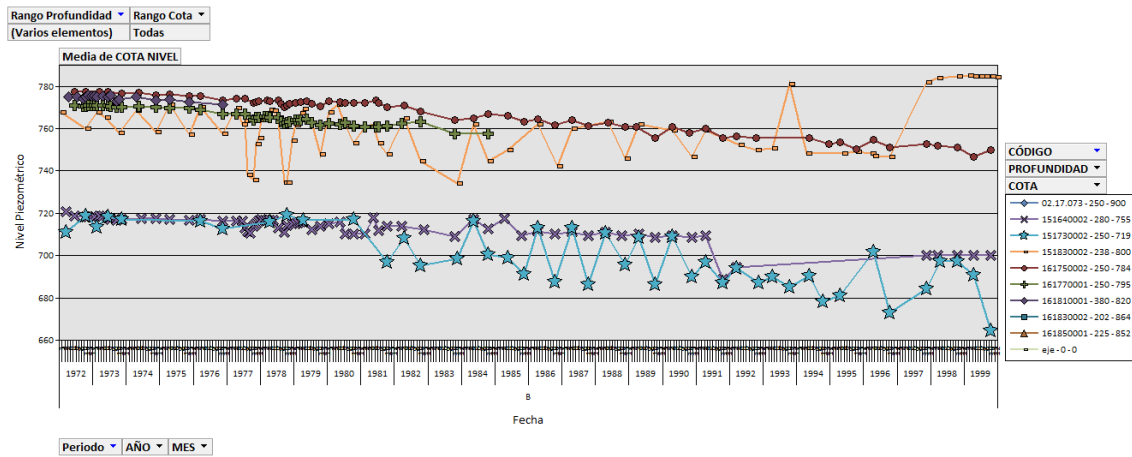


Figura 29: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

En este segundo gráfico (Figura 29) la magnitud del descenso es similar al anterior, no obstante el comportamiento no lo es tanto, presentando unos rangos de oscilación diferente que pueden indicar una diferente afección externa. Los piezómetros 151730002 y 151830002 muestran mayor oscilación anual que los otros dos. El 151830002 muestra una serie de datos poco regular, con una subida de niveles final de difícil explicación que sería conveniente analizar.

La Figura 30 muestra con un punto amarillo la ubicación de los tres piezómetros correspondientes al gráfico superior, y en azul los del gráfico anterior a la misma figura.

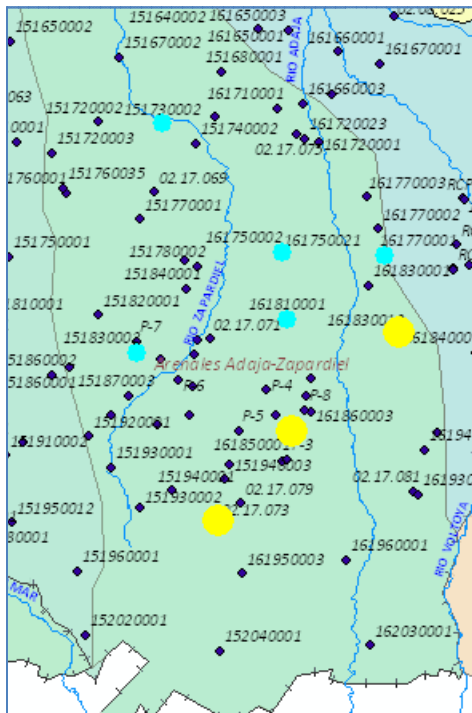


Figura 30: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 28 en amarillo y los de la Figura 29 en azul.

Los piezómetros que no se han representado en los gráficos anteriores se muestran en el Anexo 1. En la mayoría de ellos la serie es demasiado corta para averiguar una tendencia de forma fiable, en otros en cambio se aprecia estabilidad en los niveles, 151930002 o 161930001, no obstante la serie es corta igualmente.

Periodo 1999-2009

La Figura 31 muestra el registro completo de datos en este periodo de tiempo. Sirve como ejemplo para entender la necesidad de dividir en grupos de cara a una correcta visualización de los resultados.

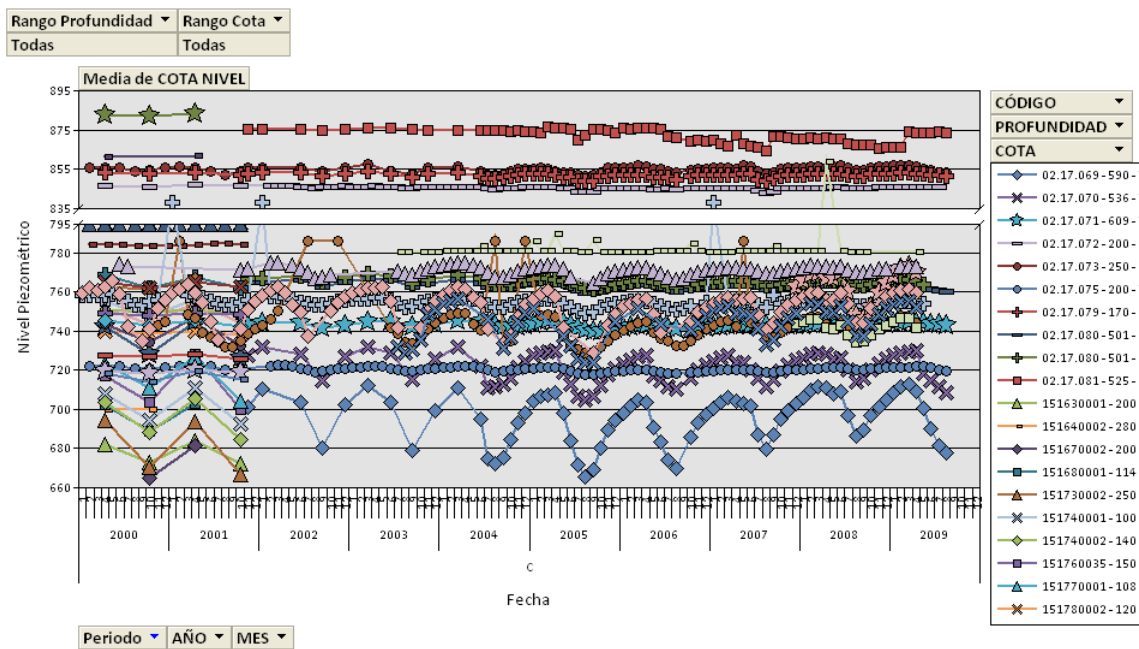


Figura 31: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para el periodo de tiempo 1999-2009.

Para facilitar el análisis se procede a eliminar los años 2000 y 2001, dado que muchos de los piezómetros dejan de tomar mediciones a final de 2001, y también a que en aquellos donde la serie continúa la tendencia se mantiene en los dos o tres años siguientes, por lo que no se pierde información. Además, se dividirá el gráfico en dos para representar los piezómetros ubicados a cotas mayores de forma independiente.

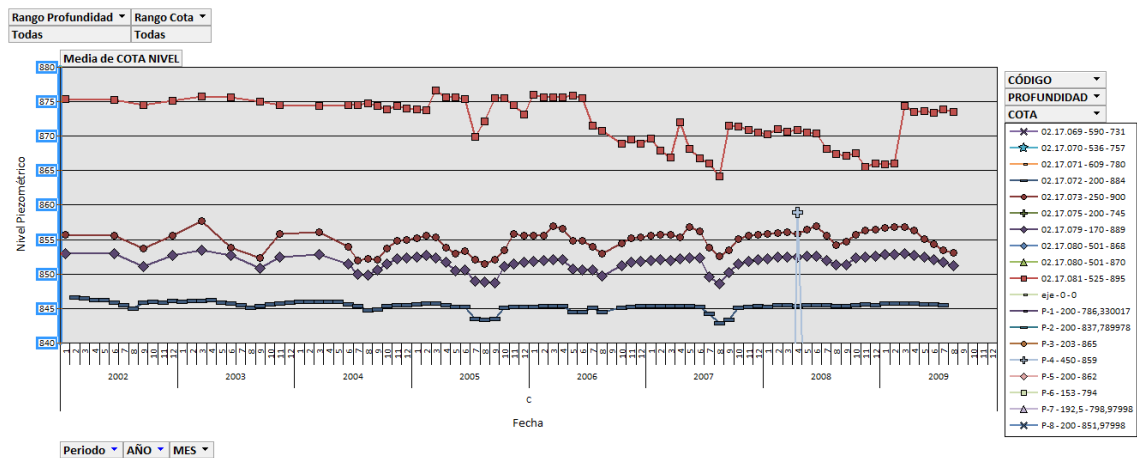


Figura 32: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados con nivel piezométrico superior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.

En cotas altas (mayor de 800 m.s.n.m, Figura 32) la oscilación anual en los piezómetros es de baja magnitud, no llega a 5 metros. Es también destacable la presencia de un piezómetro de comportamiento extraño, con bajadas graduales y subidas bruscas, sin regularidad alguna ni explicación aparente, por lo que sería necesario un análisis más profundo del mismo, o bien su eliminación por tratarse de un piezómetro defectuoso.

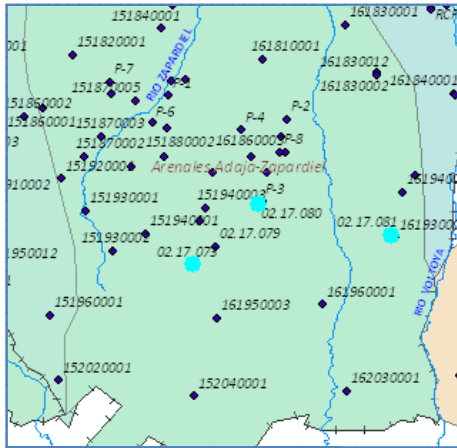


Figura 33: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 32 en azul.

En la Figura 33 se muestra el mapa con los tres piezómetros de tendencia regular en color azul.

A cotas inferiores a 800 m.s.n.m. existe un gran número de piezómetros, los cuales se dividirán en dos grupos según el rango de oscilación anual del nivel.

Mayor rango (hasta 20-25 metros, Figura 34)

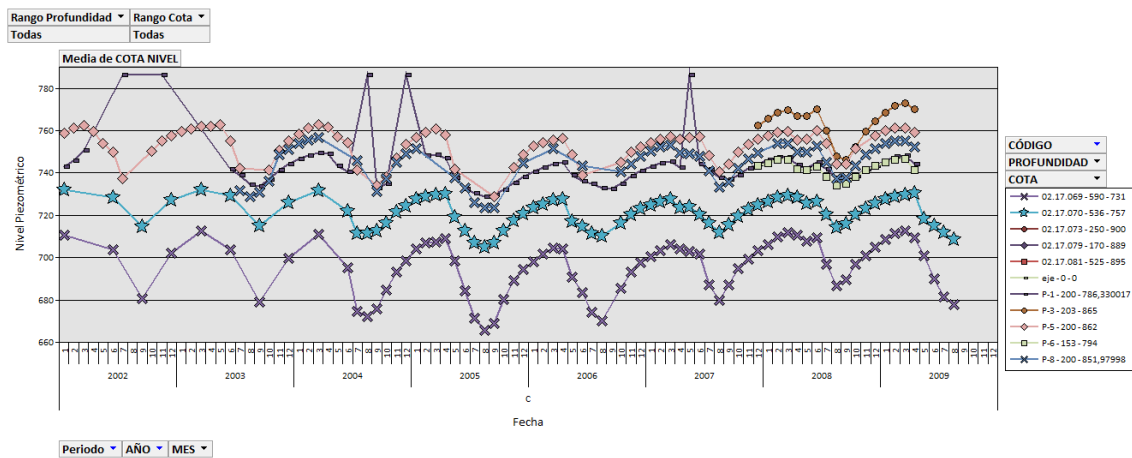


Figura 34: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.

Esta oscilación responde claramente extracciones, de ciclo anual, con mínimo al final de la época seca y recuperación al final de la época de lluvias, descenso brusco y ascenso gradual asintótico. El rango se atribuye a la magnitud de las extracciones y cercanía a las mismas.

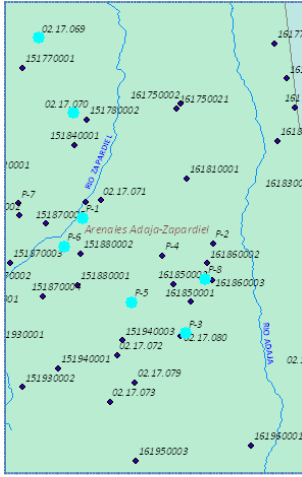


Figura 35: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 34 en azul.

En este último gráfico de la Figura 34 se puede apreciar también la tendencia ascendente que reflejan algunos piezómetros desde al año 2005, de hasta 20 metros en algunas zonas.

La Figura 35 muestra la localización de los piezómetros.

Rango hasta 9 metros (Figura 36)

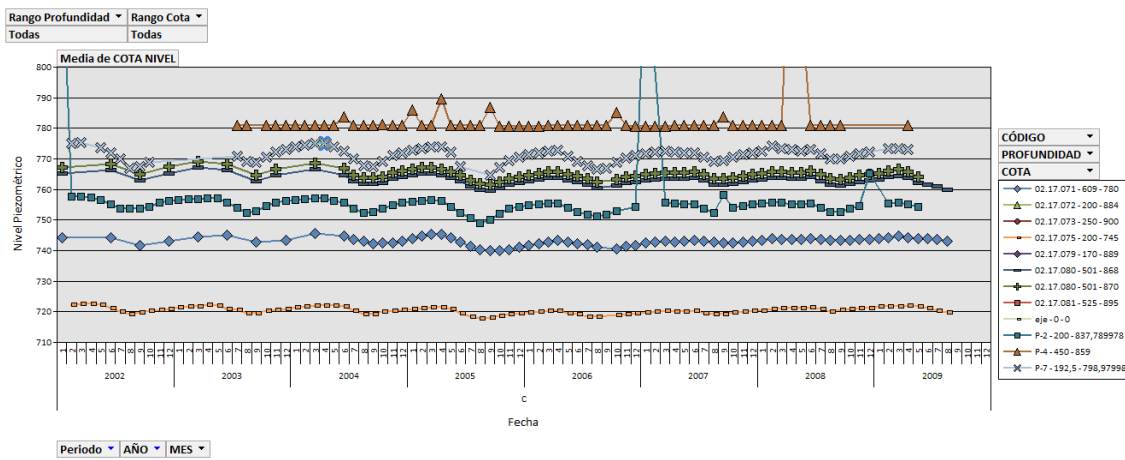


Figura 36: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.

En este caso la oscilación anual es más moderada, y los rangos no superan en ningún caso los 10 metros.

El motivo de que unos piezómetros tengan una oscilación anual mayor que otros parece estar en las extracciones, tanto en la cercanía como en la magnitud de las mismas, ya que en ambos gráficos los piezómetros se ubican en todas las profundidades, y se localizan mezclados unos con otros (Figura 37).

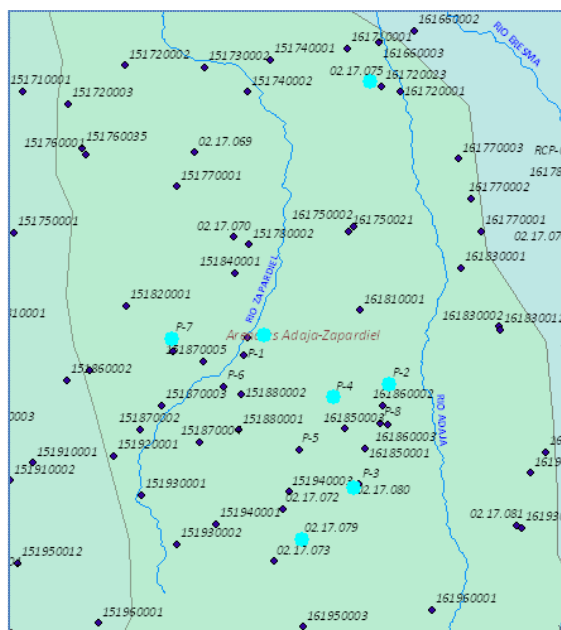


Figura 37: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 36 en azul.

Arenales Eresma-Cega

Periodo 1972-1999

Hasta 100 metros de profundidad (Figura 38)

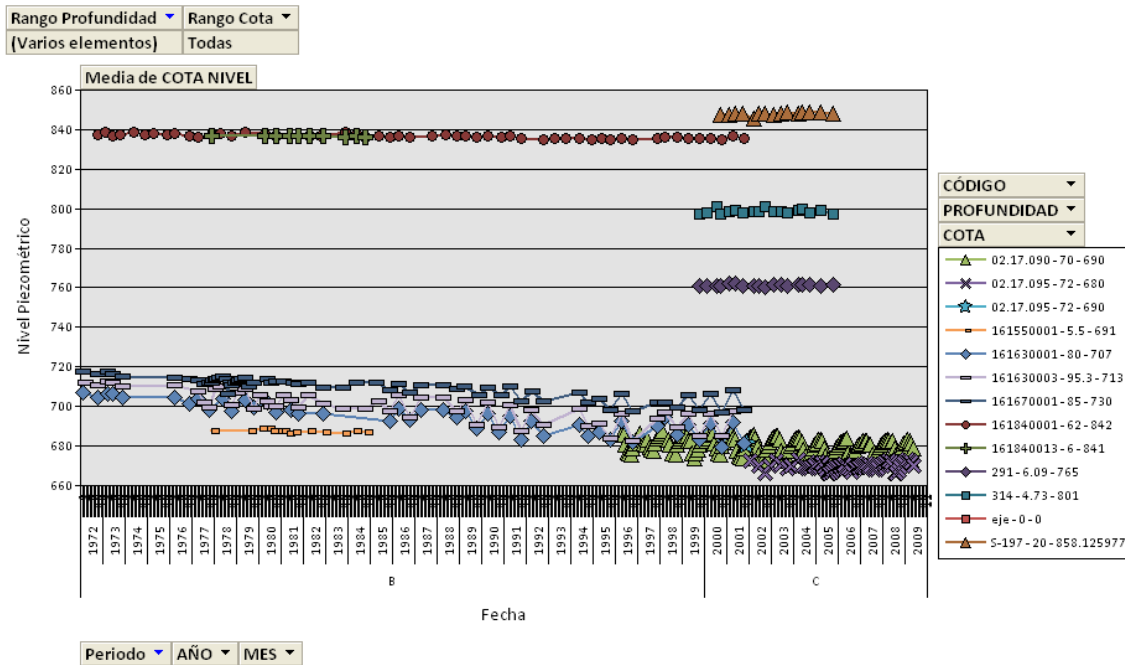


Figura 38: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.

Se aprecian a primera vista dos tendencias; una estable en cotas mayores y una descendente entre 660 y 720 metros. Se divide el gráfico en dos para aumentar la resolución del eje.

En el Anexo 1 se muestran los piezómetros ubicados a cotas mayores. Todos ellos, salvo el 161840001, están a profundidades inferiores a 25 metros.

La explicación del comportamiento de estos piezómetros parece estar en que miden el nivel de los depósitos cuaternarios superficiales (aluviales y arenales en este caso). Dichos depósitos se caracterizan por ser muy transmisivos y con poca capacidad de almacenamiento, pero de poco espesor, por lo que la oscilación de niveles tampoco puede ser grande. Por ello no se reflejan las entradas ni las salidas con grandes ascensos y descensos.

En el gráfico (Figura 39) que sigue se muestra la evolución de los piezómetros a menor cota. Todos ellos, salvo el 161550001 marcan tendencia descendente y se ubican a profundidades superiores a los 70 metros. El piezómetro 161550001 se comporta como los piezómetros representados en el gráfico anterior.

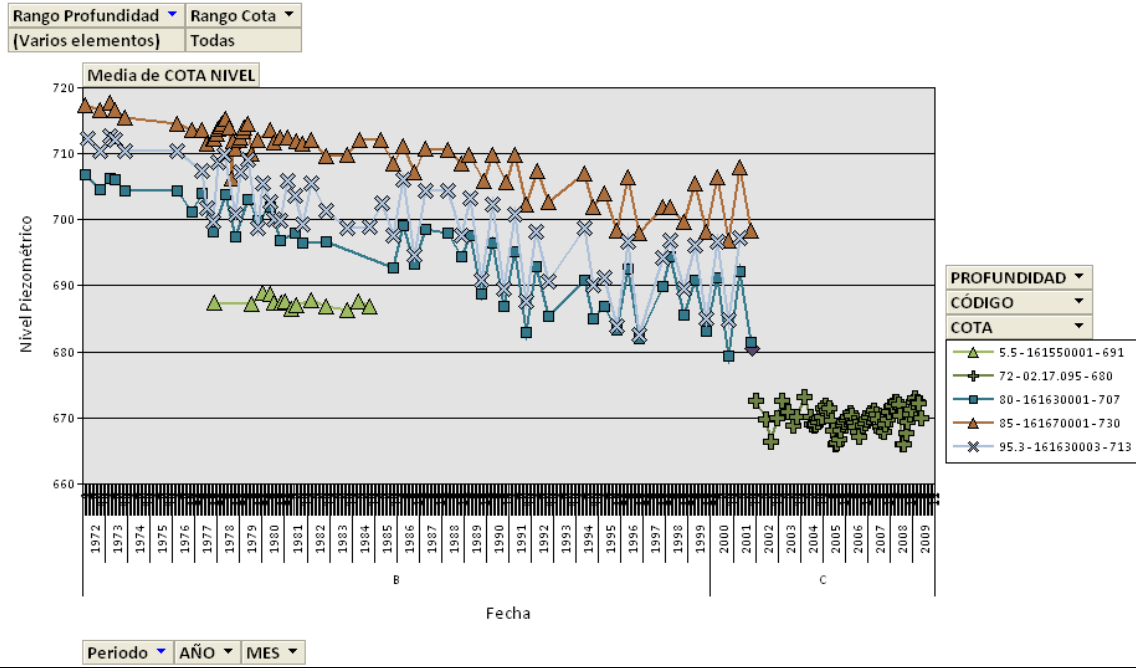


Figura 39: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros y nivel piezométrico inferior a 750 m.s.n.m.

Para el resto los descensos están entre 15 y 25 metros, dependiendo del piezómetro y el momento del año. Los rangos anuales oscilan entre 10 y 15 metros, y se acentúan en la serie a partir del año 1985 más o menos.

En la Figura 40 se muestra su ubicación en azul.

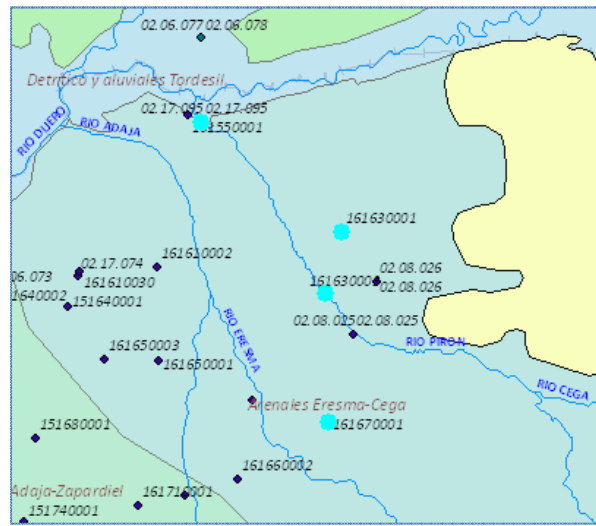


Figura 40: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 39 en azul.

Rango de profundidad 100-200 metros

Los piezómetros en este rango de profundidad se representan en la Figura 41, que se muestra a continuación:

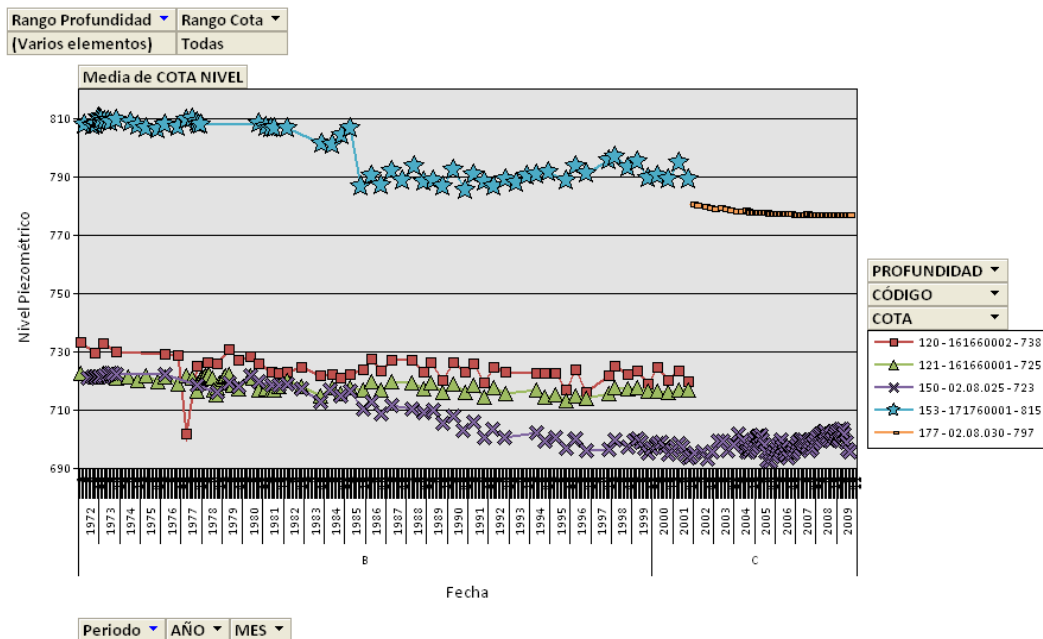


Figura 41: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.

El piezómetro 171760001 muestra un descenso brusco en torno al año 1985, se muestra al detalle en el Anexo 1.

Analizando los otros piezómetros, ubicados a cotas más bajas, se observa una tendencia claramente descendente en los tres existentes, pero con magnitud diferente, 5, 15 y 25 metros de media para los piezómetros 161660001, 161660002 y 02.08.25, respectivamente (Figura 42).

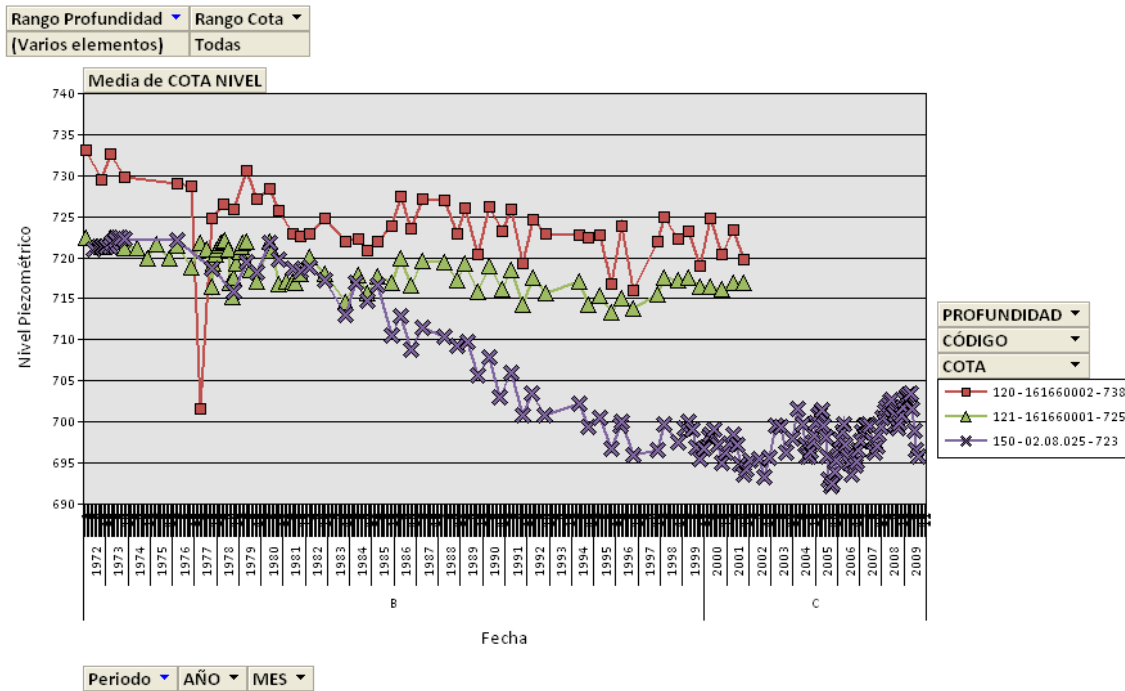


Figura 42: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.

Las principales diferencias entre estos piezómetros es su ubicación (Figura 43).

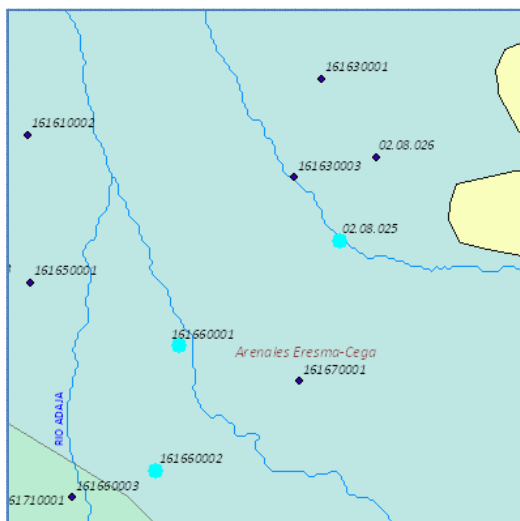


Figura 43: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 42 en azul.

El principal patrón del diferente comportamiento parece ser más bien el primero, ya que el descenso registrado por el piezómetro 02.08.25 es del orden de magnitud del registrado por sus piezómetros cercanos ubicados a diferente profundidad.

Más de 200 metros de profundidad

El gráfico de la Figura 44 muestra las mediciones de los piezómetros de más de 200 metros de profundidad:

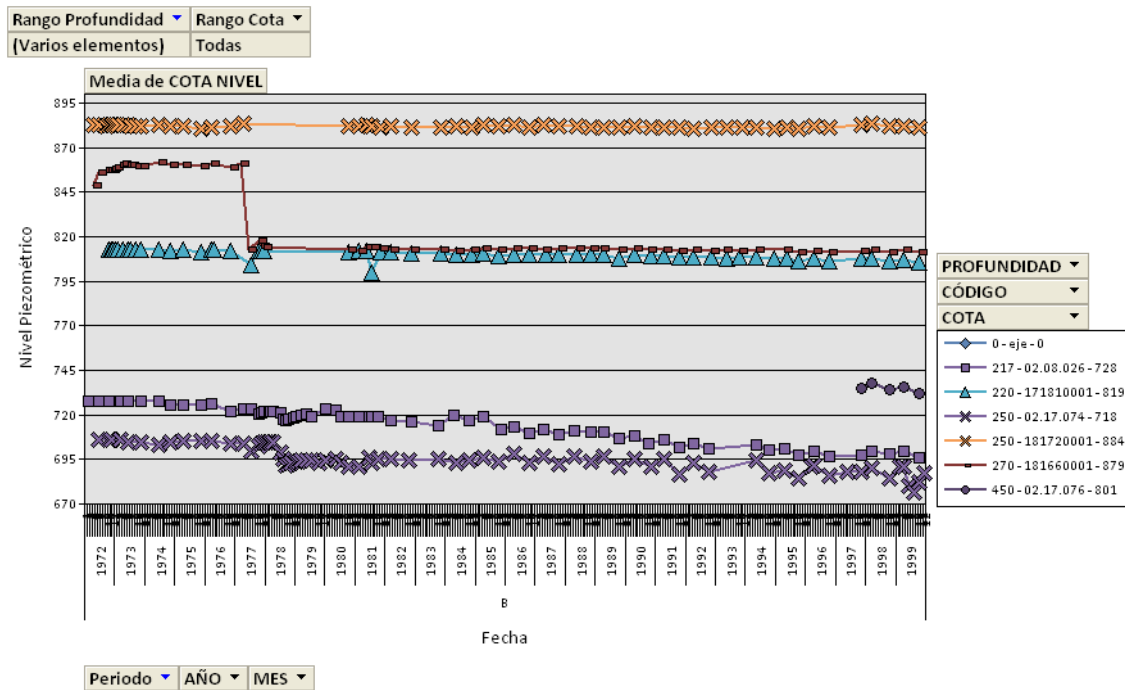


Figura 44: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

Aparte de los descensos de más de 30 metros del piezómetro 02.08.026, el piezómetro 02.17.074 registra un descenso en torno a los 20 metros, con una oscilación anual que aumenta el año 1985 (5 metros) y luego lo hace de nuevo a partir de 1999 (10 metros). Dicho piezómetro registra un descenso brusco de casi 15 metros el año 1978 que habría que estudiar. Este piezómetro está localizado en una zona de grandes bombeos, cercano a la desembocadura del río Adaja en el Duero. (ver Figura 45)

El resto de piezómetros siguen un comportamiento ligeramente descendente (5 metros) para 171810001, estable para otros. Se ubican en el sureste de la unidad, a cotas 820 y 880. Uno de ellos, el 181660001, parece tener registros defectuosos, por el descenso brusco que se aprecia en el año 1977.

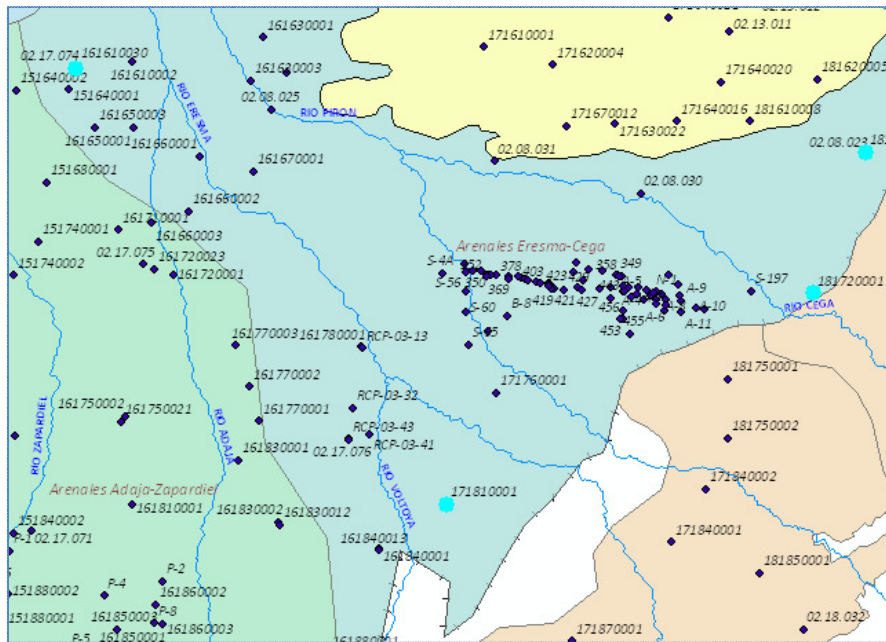


Figura 45: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 44 en azul.

Los piezómetros muestran además una baja oscilación anual, que se presenta solamente a partir de finales de los años 90, y se aprecia más claramente gracias al mayor número de datos de la última década.

Periodo 1999-2009

La Figura 46 muestra los registros piezométricos para todas las profundidades.

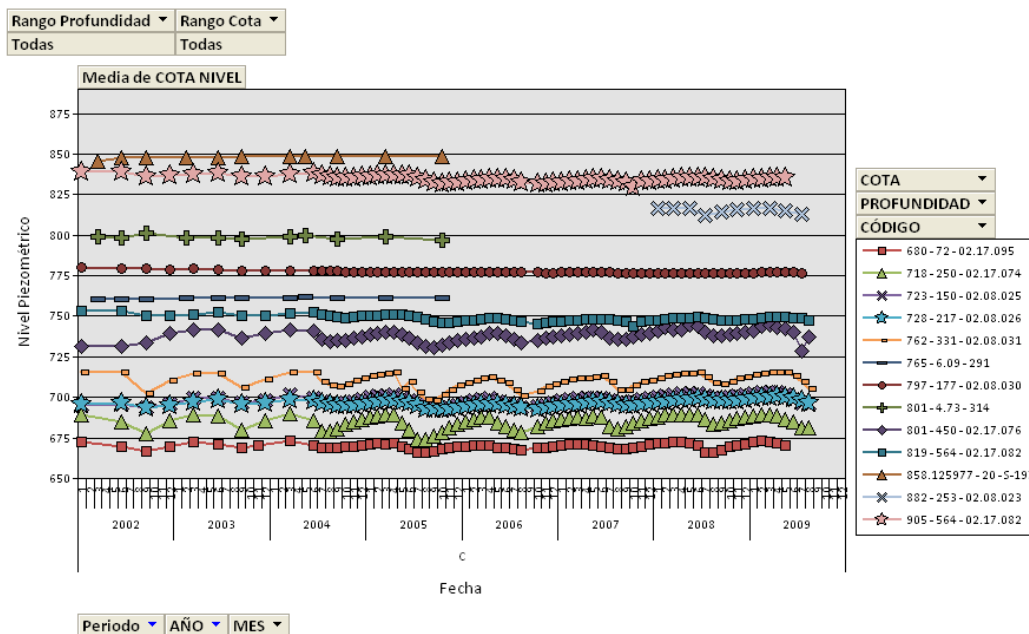


Figura 46: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para el periodo 1999-2009.

Se puede apreciar que no en todos los casos los piezómetros se distribuyen de menor a mayor nivel piezométrico según sus cotas como cabría esperar, ya que en el caso de los piezómetros más someros (hasta 20 50 metros de profundidad), a igual cota registran un nivel mayor (ver piezómetros 291, 314...). También parece que en el caso de los piezómetros más profundos (más de 200 metros) para la misma situación marcan menores niveles (observar comparación entre 02.17.86 y 02.17.82).

Además llama la atención la tendencia marcada por el piezómetro 02.08.030, de serie constante. El motivo aparente es su cercanía al río Cega que invita a pensar en una fuerte influencia.

Por lo demás, la oscilación anual parece depender de la ubicación, es generalmente creciente en profundidad. En la Figura 47 se muestra con un punto azul la ubicación de los piezómetros anteriores.

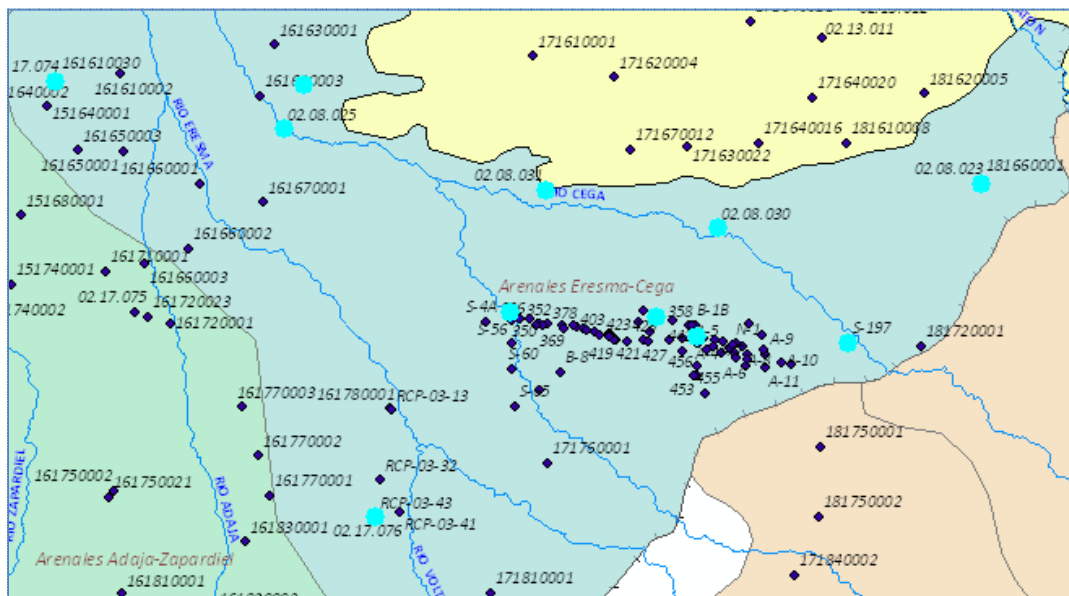


Figura 47: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 46 en azul.

Zona de los Páramos⁴

Dentro de esta delimitación se incluyen varias MAS, que se corresponden con formaciones de funcionamiento muy diferente. Por encima de 200 metros aproximadamente, se ubican las MAS que se corresponden con páramos, a profundidades mayores se encuentran los materiales del acuífero terciario, confinados por un paquete de margas, que se corresponden con la MAS 67, Terciario Detrítico.

Profundidad inferior a 200 metros

La Figura 48 muestra los piezómetros ubicados a profundidades inferiores a 200 metros. Éstos se representan en color amarillo en el mapa de la Figura 50.

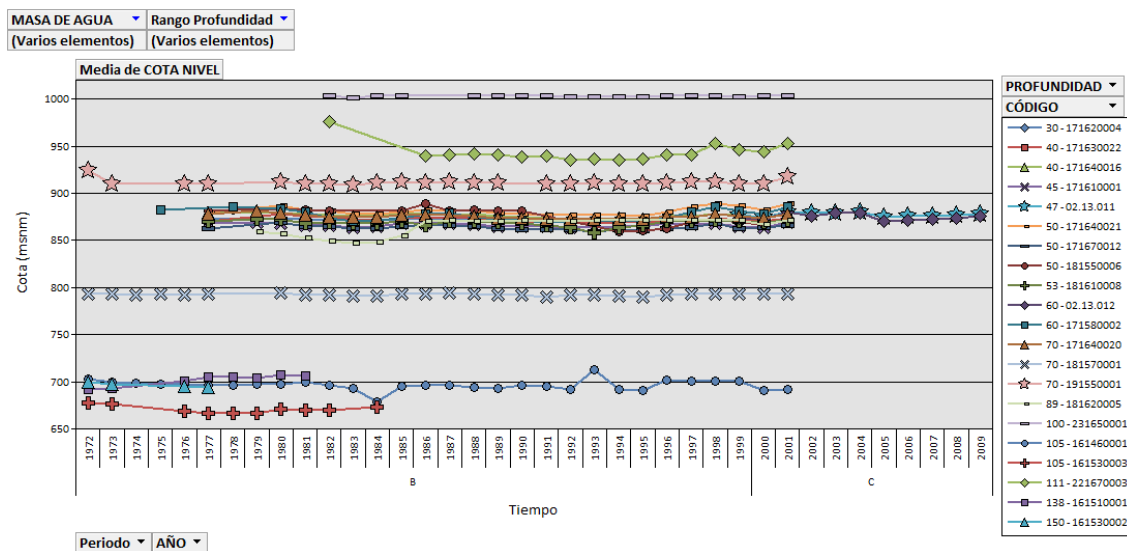


Figura 48: Series de nivel piezométrico anual medio en la Zona de los Páramos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.

En todos los casos se aprecia como la tendencia es estable a lo largo de toda la serie. Alguno de los piezómetros presenta oscilaciones descendentes y ascendentes, siempre inferiores a 10 metros.

Nótese que se está trabajando a escala anual, por lo que el valor que se representa en la gráfica es el promedio de las mediciones anuales de cada año. Esto es así porque en este caso no interesa conocer la ciclicidad anual del nivel, sino la evolución general a lo largo del tiempo.

⁴ La Zona de los Páramos se corresponde con las MAS 25 (Páramo de Astudillo),29 (Páramo de Esgueva),32 (Páramo de Torozos), 43 (Páramo de Cuéllar), 44 (Páramo de Corcos), y por debajo de éstas la MAS 67, (Terciario detrítico.).

Profundidad superior a 200 metros

Los piezómetros ubicados a partir de 200 metros de profundidad se muestran en la Figura 49. Están representados en el mapa de la Figura 50 en color azul.

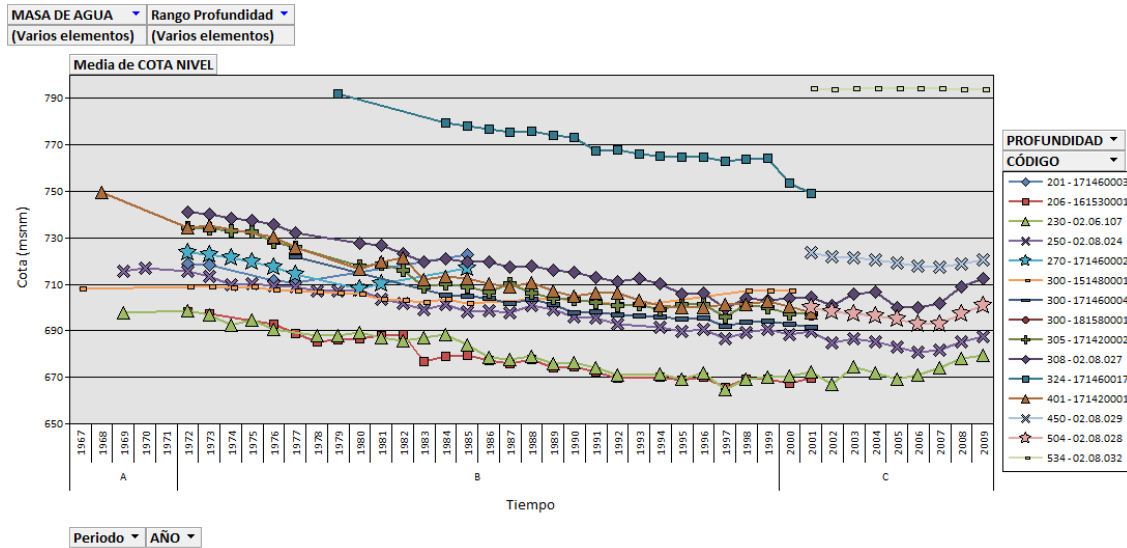


Figura 49: Series de nivel piezométrico anual medio en la Zona de los Páramos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

La respuesta de estos piezómetros es prácticamente idéntica en todos los casos. Las diferencias de nivel entre ambos tienen origen en su diferente localización, pero la tendencia es la misma y consta de dos fases; una descendente desde el comienzo de la serie en 1972 hasta 1997 aproximadamente, con descensos entre 25 y 40 m; y una etapa de estabilización a partir de este año, con una pequeña recuperación de niveles (hasta 10 metros) a partir de 2005.

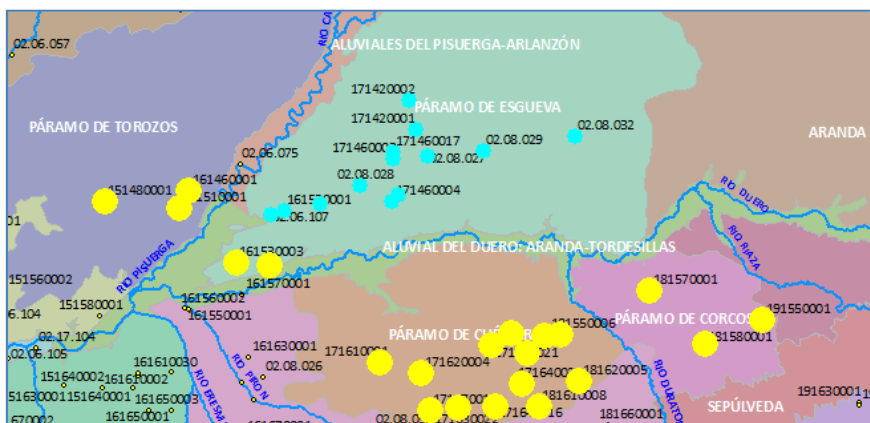


Figura 50: Mapa de la Zona de los Páramos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 48 en amarillo y los de la Figura 49 en azul.

MAS Villafáfila

Profundidad inferior a 200 metros

En la Figura 51 se muestran los piezómetros de profundidad inferior a 200 m. Se representan en color amarillo en el mapa de la Figura 53.

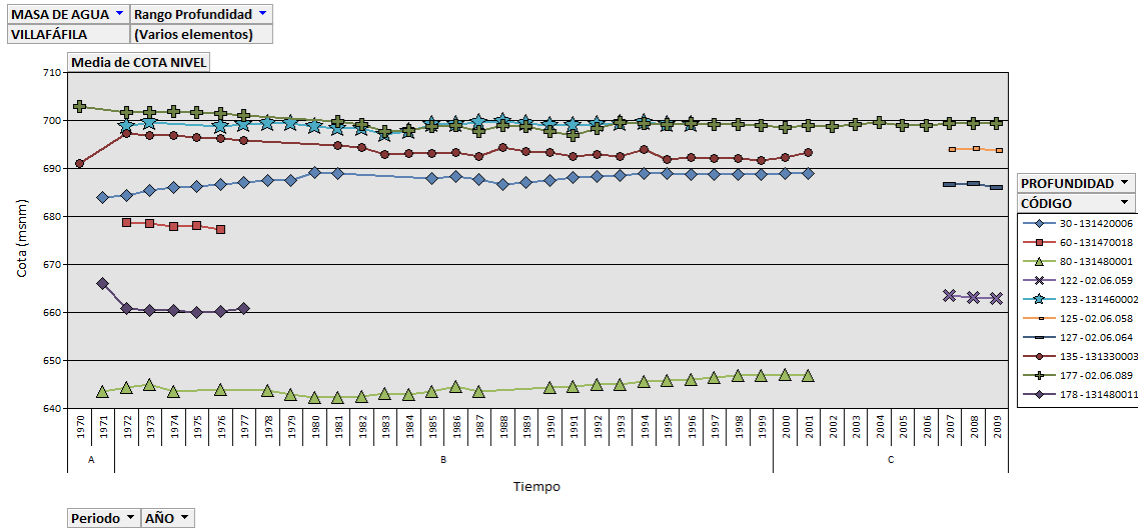


Figura 51: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Villafáfila para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.

En líneas generales la tendencia es estable, si bien existe algún piezómetro como el 131330003 y el 02.06.089 que insinúan descensos. También algún otro como el 131480001 registra un ascenso en el periodo 1982-2001. En cualquiera de los dos casos las variaciones tienen lugar de un modo muy suave.

Profundidad superior a 200 metros

A profundidad superior a 200 m solo existe registro de dos piezómetros, cuya serie se representa en la Figura 52, y están representados en color azul en el mapa de la Figura 53.

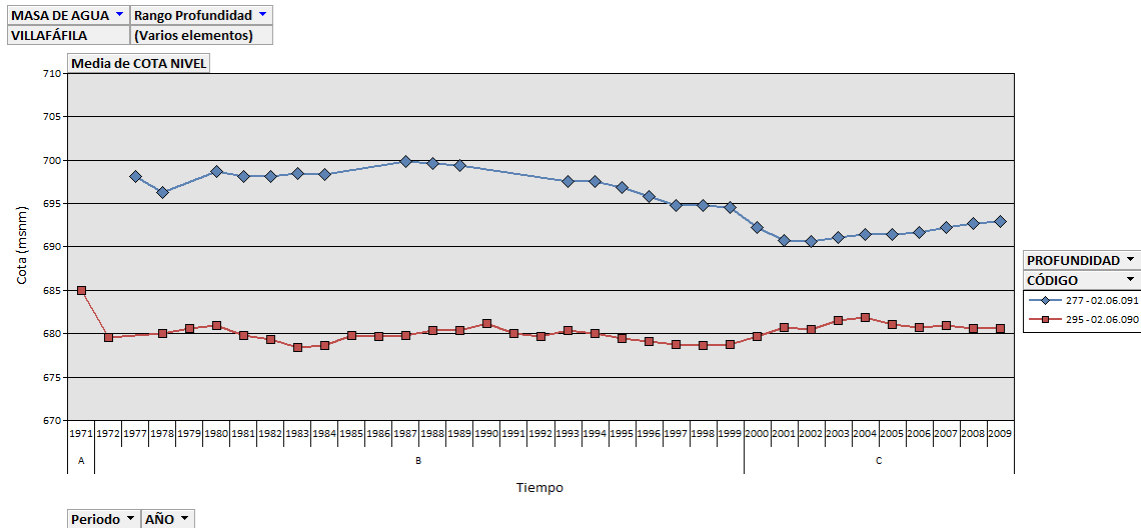


Figura 52: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Villafáfila para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

El piezómetro 02.06.090 muestra una tendencia estable con ligeras oscilaciones ascendentes y descendentes en torno a la cota 680 m.s.n.m. El otro, 02.06.091, muestra un descenso entre 5 y 10 metros hasta el año 2001, cuando comienza una etapa de recuperación suave hasta la actualidad (3-4 metros).

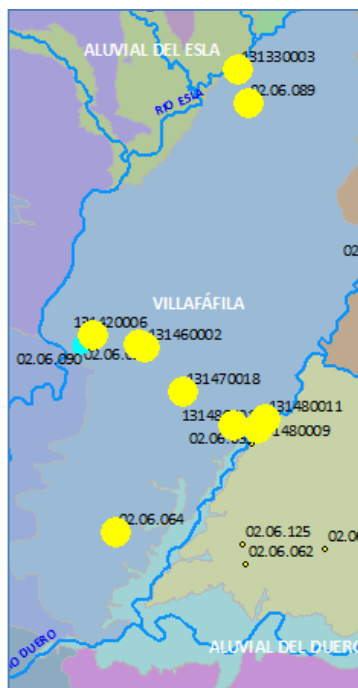


Figura 53: Mapa de la MAS Villafáfila con la ubicación de los piezómetros de la Figura 51 en amarillo y los de la Figura 52 en azul.

MAS Carrión

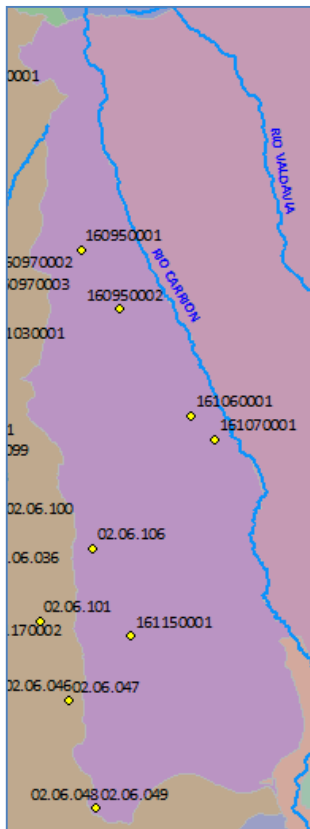


Figura 54: Mapa de la MAS Carrión con la ubicación de los piezómetros de la Figura 55

En la MAS Carrión todos los piezómetros muestran una tendencia muy similar, independientemente de la profundidad a la que se encuentren. La tendencia a lo largo de la serie es estable, como se aprecia en la Figura 55. Tan solo se sale de esta tendencia el piezómetro 160950002, el cual registra un ascenso en torno a 10 m.

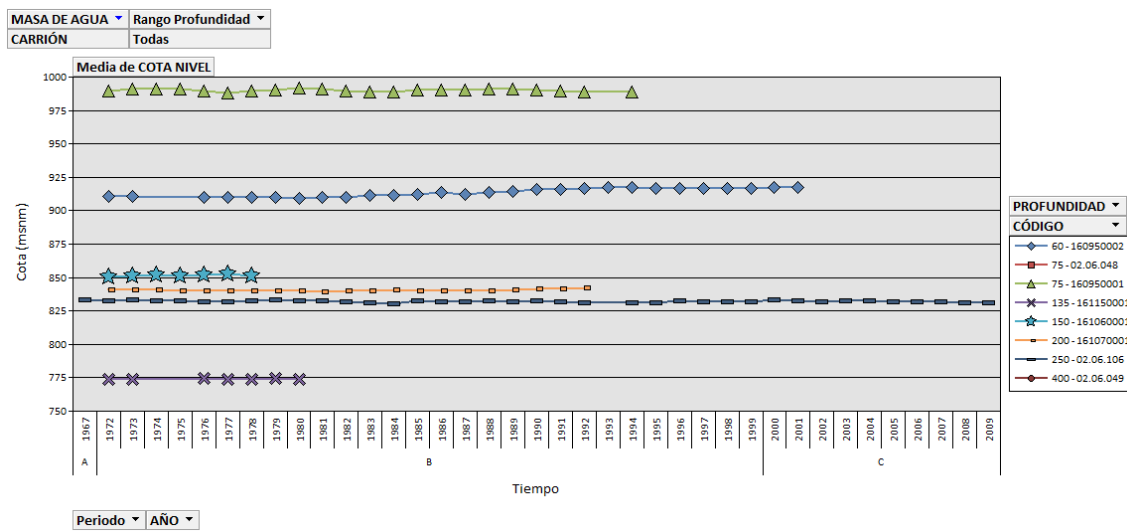


Figura 55: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Carrión.

MAS Tierra de Campos

Profundidad inferior a 200 metros

Par el análisis de los piezómetros de profundidad inferior a 200 metros se hecho una división en dos grupos según la cota para una correcta visualización de los gráficos.

La Figura 56 muestra los piezómetros cuyo registro está por encima de 735 m.s.n.m. Existen aparentemente dos tendencias; una estable en la que el nivel se mantiene constante a lo largo de la serie (151060001, 02.06.100, 151170002, 161310001, 151160001 y 141320001); y otra en la que los piezómetros registran descensos de entre 5 metros (151260001) y 15 metros (151230001), el resto de los piezómetros con registro descendente son el 151320001 y 02.06.101.

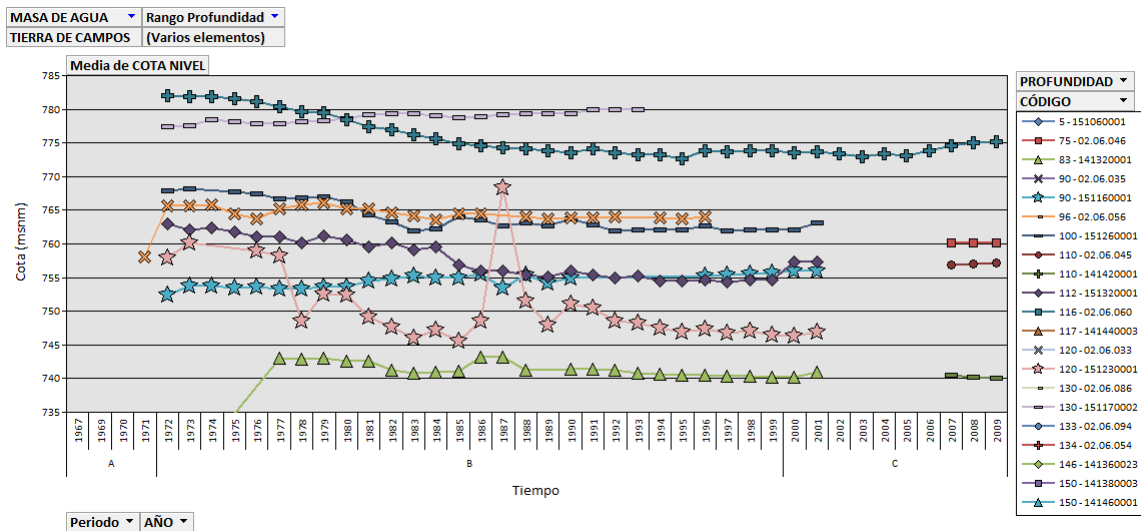


Figura 56: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros y nivel piezométrico superior a 735 m.s.n.m.

El mapa de la Figura 57 muestra la ubicación los piezómetros cuyo registro está por encima de 735 m.s.n.m... En color azul los que tienen tendencia estable y en amarillo los de tendencia descendente.

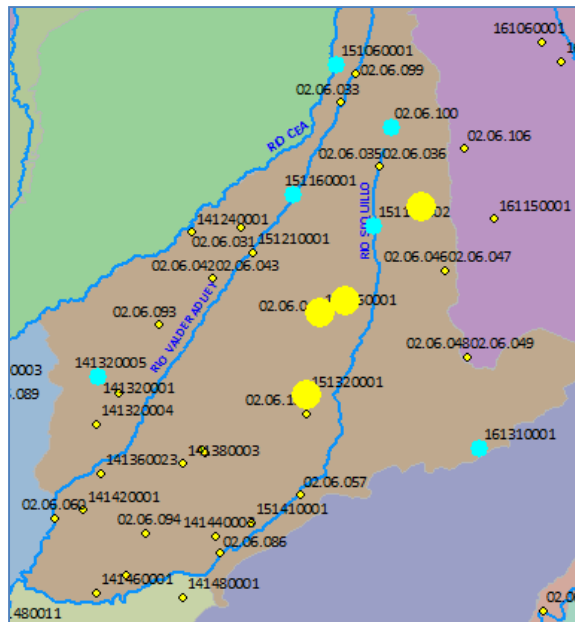


Figura 57: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 56. En color azul los que tienen tendencia estable y en amarillo los de tendencia descendente.

Por debajo de 735 m.s.n.m. (Figura 58, ubicación en Figura 59) la tendencia es siempre descendente, oscilando entre 5 y 15 metros en todos ellos hasta el año 2001 en el que terminan la mayoría de las series. El piezómetro 02.06.094 registra datos hasta el año 2008 y la tendencia es descendente hasta dicho año, por lo que quizás en muchos de los otros se podría dar el mismo fenómeno y los descensos serían mayores.

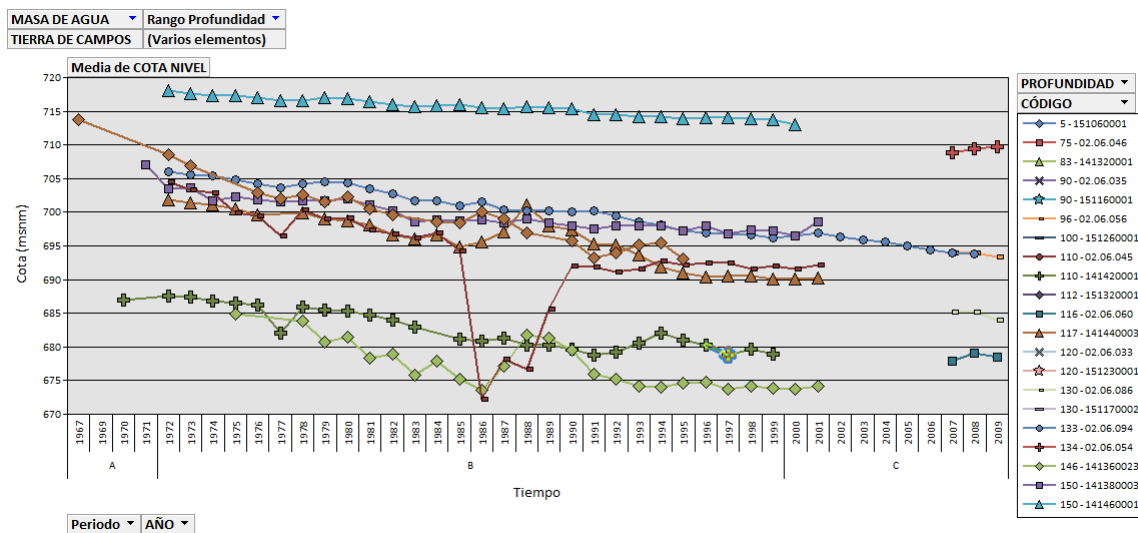


Figura 58: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros y nivel piezométrico inferior a 735 m.s.n.m.

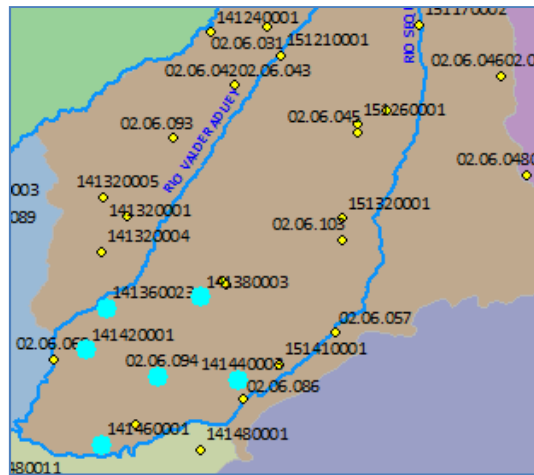


Figura 59: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 58.

Vistas las tendencias y la ubicación de los piezómetros de profundidad inferior a 200 metros, parece claro que por debajo de una determinada cota, 735 m.s.n.m., los descensos son constantes y homogéneos en prácticamente todos los piezómetros. Esto último es lógico también, pues estas zonas ubicadas a cotas menores están más cercanas a zonas donde las extracciones subterráneas y los descensos de niveles están muy desarrollados, como la MAS Tordesillas.

Profundidad superior a 200 metros

Para el estudio de los piezómetros profundos también se han dividido éstos en dos según su cota. El primer grupo, representado en la Figura 60, se han representado aquellos piezómetros cuyo registro es superior a 745 m.s.n.m.

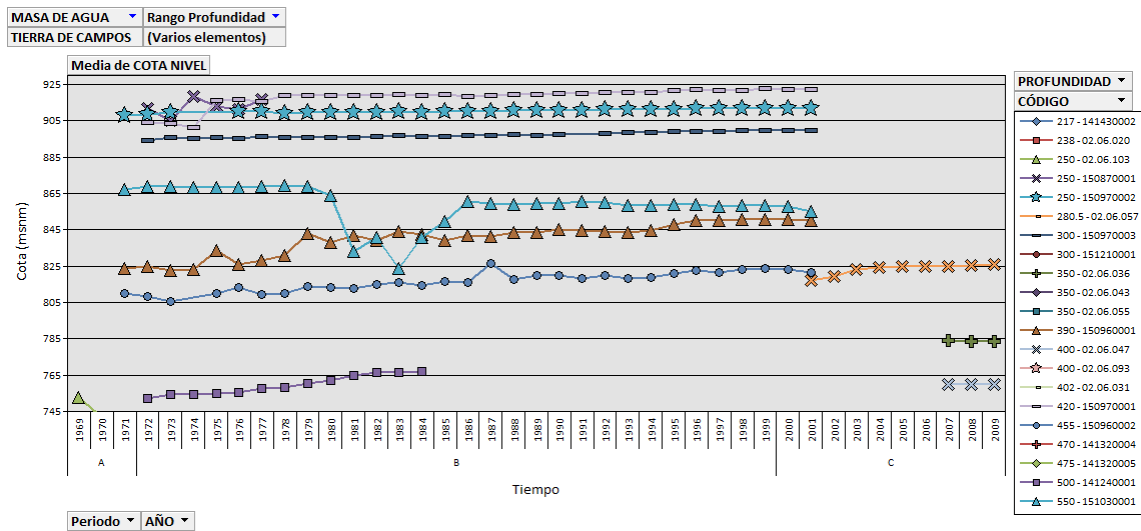


Figura 60: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros y nivel piezométrico superior a 745 m.s.n.m.

La tendencia general de los piezómetros a lo largo de la serie es ascendente, con valores entre 5 y 10 metros los tres piezómetros cuyo registro está por encima de 890 m.s.n.m. ubicados a cotas más altas (150970001, 150970002 y 150970003, en color azul en el mapa de la Figura 61) y valores de entre 15 y 25 metros de ascenso para los piezómetros entre 740 y 850 m.s.n.m. (141240001, 150960001 y 150960002, en color amarillo en el mapa de la Figura 61).

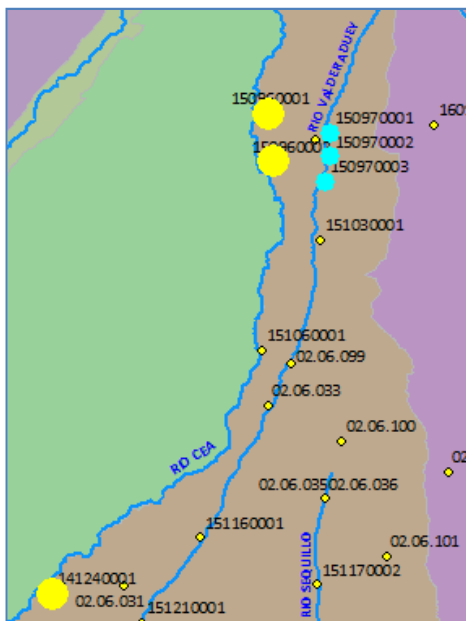


Figura 61: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 60. En azul aquellos cuyo registro es superior a 890 m.s.n.m.

También se aprecia en la Figura 60 el comportamiento algo extraño del piezómetro 151030001, el mantiene un nivel constante a lo largo de la serie excepto en el periodo 1980-1985 donde sufre un descenso y recuperación bruscos.

La Figura 62 muestra aquellos piezómetros ubicados en cotas inferiores a 740 metros. En este caso la tendencia es claramente descendente en todos los casos

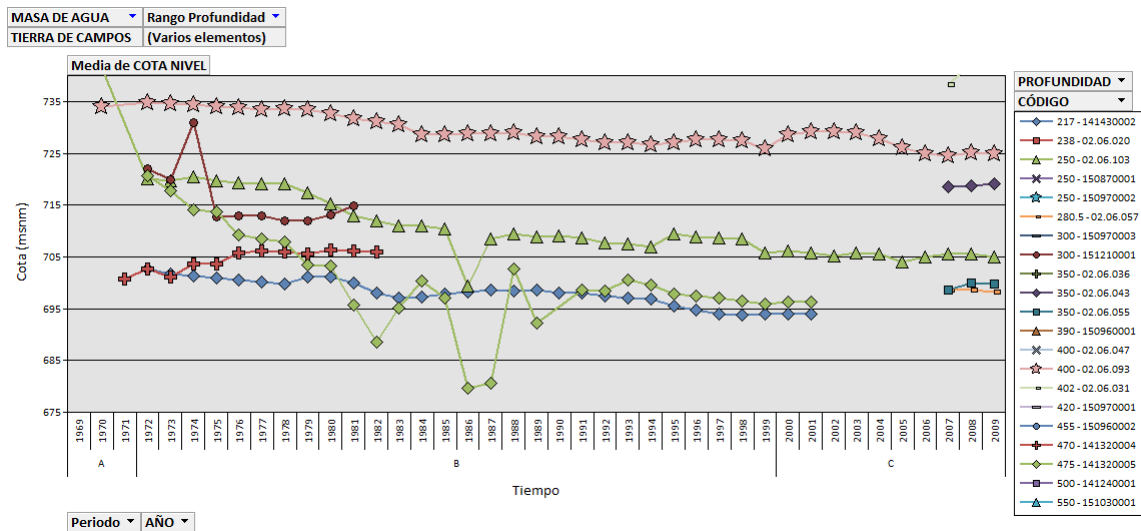


Figura 62: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros y nivel piezométrico inferior a 745 m.s.n.m.

Los descensos oscilan entre los 9 metros del piezómetro 02.06.093 y los 25 metros que llega a registrar en piezómetro 141320005, registran descensos entre esas dos magnitudes los piezómetros 141430002 y 02.06.103.

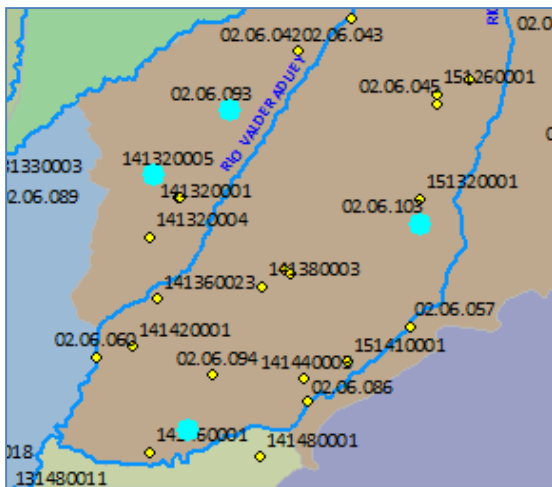


Figura 63: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 62.

El patrón de comportamiento no parece estar regido por la profundidad, ya que dentro de este rango existen piezómetros más y menos profundos con los dos comportamientos. La ubicación de los piezómetros con tendencia descendente se muestra en el mapa de la Figura 63

muestra en el mapa de la Figura 63

Analizando las tendencias que muestran estos piezómetros y su ubicación, si parece como si existiera un límite para los piezómetros profundos en torno a la cota 740, por debajo de la cual hay descensos y por encima ascensos

MAS Aluviales Duero

Dentro de los aluviales del Duero se diferencian dos; los Aluviales de Tordesillas-Zamora, y los Aluviales Aranda-Tordesillas. Del primero de ellos se dispone de los piezómetros

02.06.105 y 02.17.104, ubicados a 190 y 302 metros de profundidad, respectivamente. Del aluvial Aranda-Tordesillas se dispone de los piezómetros 161560002 y 161570001, ubicados a 103 y 106 metros de profundidad, respectivamente. Se agruparán todos los piezómetros para su estudio.

Nótese que en ninguno de los casos los piezómetros van a arrojar conclusiones sobre ninguno de los aluviales, dada la profundidad a la que toman agua, no obstante se procede de este modo respetando el orden de trabajo llevado hasta ahora.

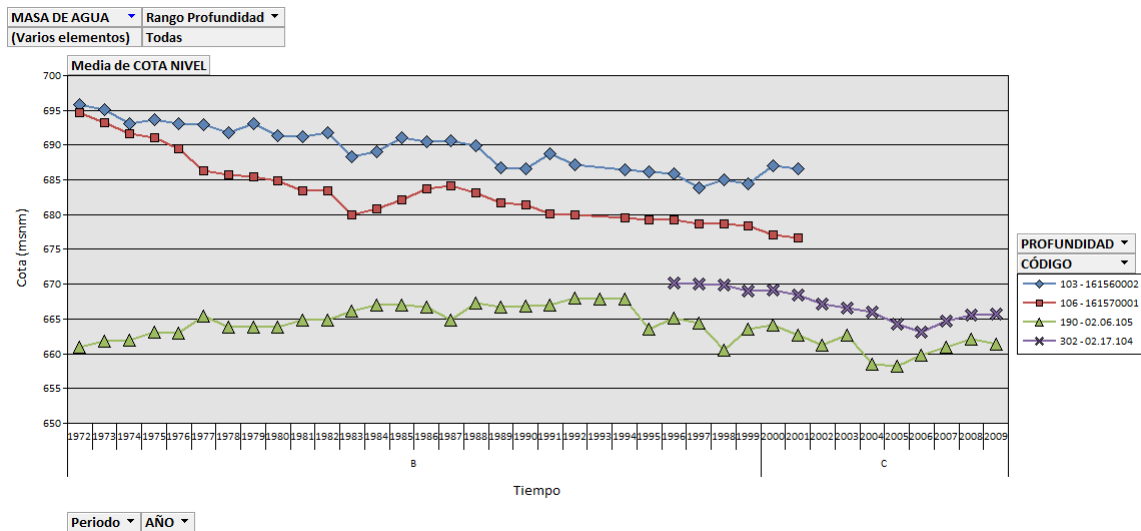


Figura 64: Series de nivel piezométrico anual medio en las MAS Aluviales de Tordesillas-Zamora, y Aluviales Aranda-Tordesillas.

De los cuatro piezómetros (Figura 64) solo tres de ellos cuentan con registros desde el comienzo de la serie en 1972. De éstos, los piezómetros 161560002 y 161570001 (en azul en la Figura 65) reflejan una tendencia descendente hasta el final de la serie, en 2001, entre 10 y 20 metros de descenso.

El otro piezómetro con una serie completa (02.06.105, en amarillo en la Figura 65), comienza con una etapa de ascenso de 7 metros hasta el año 1994, luego desciende 10 metros hasta 2005 donde vuelve a ascender.

El comportamiento del piezómetro 02.06.105 a partir de 1995 es el que muestra también el cuarto de los piezómetros, 02.17.104, que comienza a registrar datos en 1996. Por otro lado, no hay que descartar que los dos piezómetros cuya serie termina en 2001 no lo fueran a hacer de este modo, pues es una tendencia ya registrada en otras zonas cercanas.

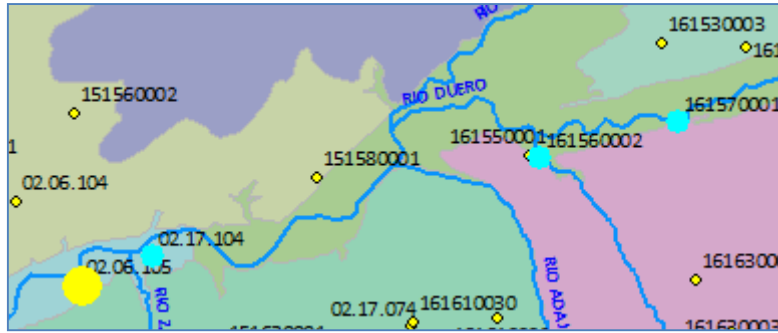


Figura 65: Mapa de los aluviales del Duero con la ubicación de los piezómetros de la Figura 64. En amarillo el piezómetro 02.06.105.

MAS Aluviales del Pisuerga-Arlanzón

Para esta MAS dolo se dispone de los datos de tres piezómetros (Figura 66), de los cuales uno de ellos (02.06.075) comienza a registrar datos en 2007, por lo que no aporta información de la evolución. El piezómetro 171270001 en los primeros años muestra oscilaciones de compleja explicación para luego mantenerse en valores estables hasta el final. No obstante, se puede afirmar que tanto este último, como sobre todo el piezómetro 181170001 mantienen una tendencia estable y constante a lo largo la serie.

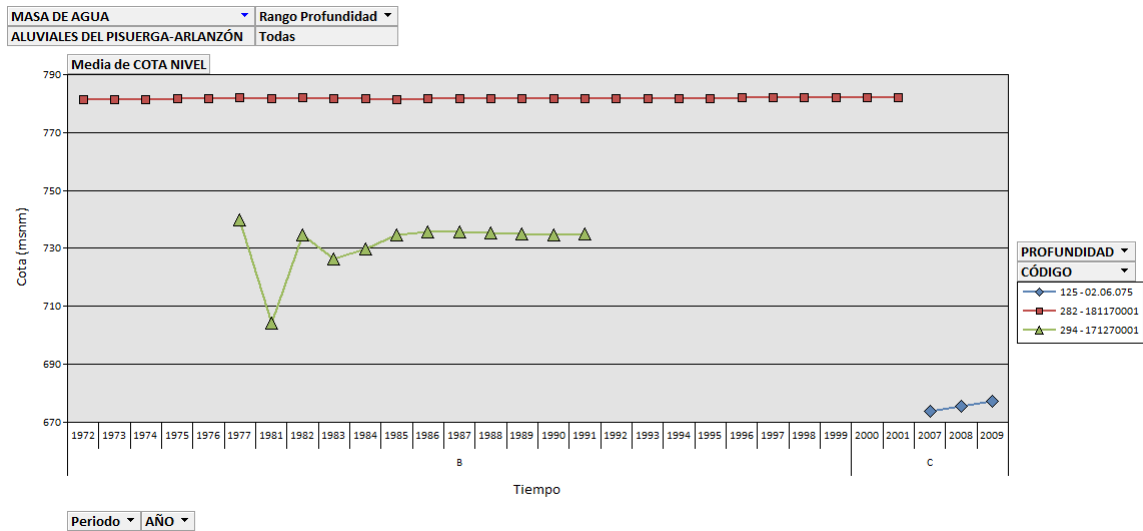


Figura 66: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Aluviales del Pisuerga-Arlanzón.

La Figura 67 muestra la ubicación de los piezómetros en la MAS Aluviales del Pisuerga-Arlanzón.

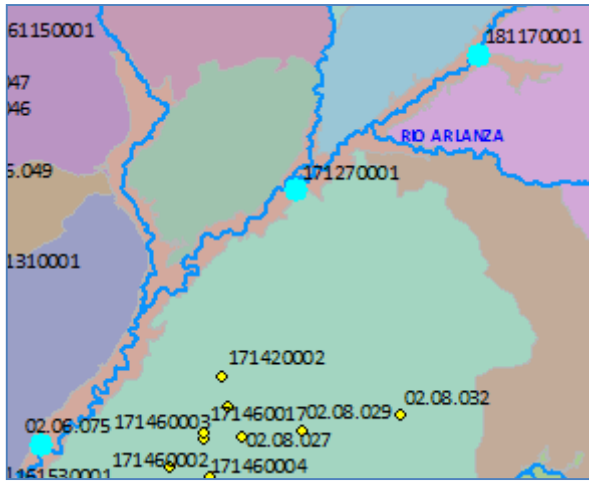


Figura 67: Mapa de la MAS Pisuega-Arlanzón con la ubicación de los piezómetros de la Figura 66.

MAS Tordesillas

Profundidad inferior a 200 metros

La Figura 68 representa los registros de los piezómetros de profundidad inferior a 200 metros.

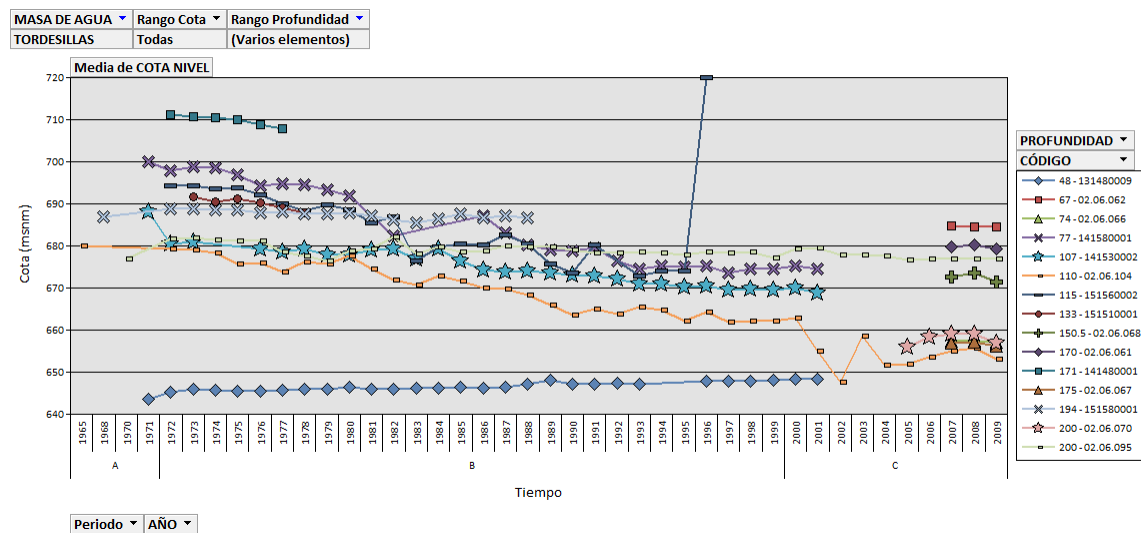


Figura 68: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tordesillas para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.

La mayoría de los piezómetros registran descensos considerables, excepto los piezómetros 131480009, 02.06.095 y 151580001, representados en el mapa de la Figura 69 en color amarillo, cuyo registro es estable.

El comportamiento del piezómetro 131480009 podría responder a su ubicación, muy cercano a la MAS Villafáfila, justo al lado del río Valderaduey, donde la dinámica de flujo es diferente.

Los descensos de la mayoría (en color azul, Figura 69) de los piezómetros se oscilan entre 10 metros (141530002) y 30 metros (02.06.104). No se encuentra explicación aparente ni patrones que expliquen el comportamiento de los piezómetros de esta zona más que la propia heterogeneidad del acuífero y la influencia de las extracciones.

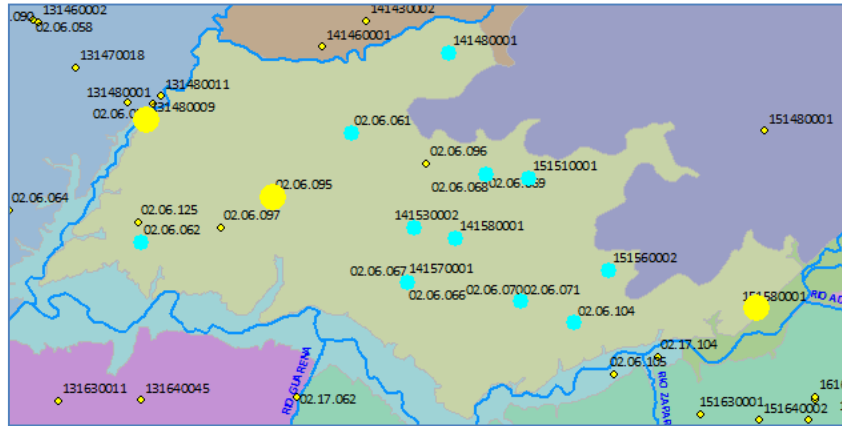


Figura 69: Mapa de la MAS Tordesillas con la ubicación de los piezómetros de la Figura 68. En amarillo aquellos con tendencia estable, en azul el resto.

Profundidad superior a 200 metros

Los piezómetros más profundos (Figura 70) registran descensos en líneas generales mayores que los ubicados por encima de 200 metros. Un ejemplo claro es el piezómetro 02.06.097, ubicado a 500 m de profundidad, que registra descensos de nivel de hasta 45 metros.

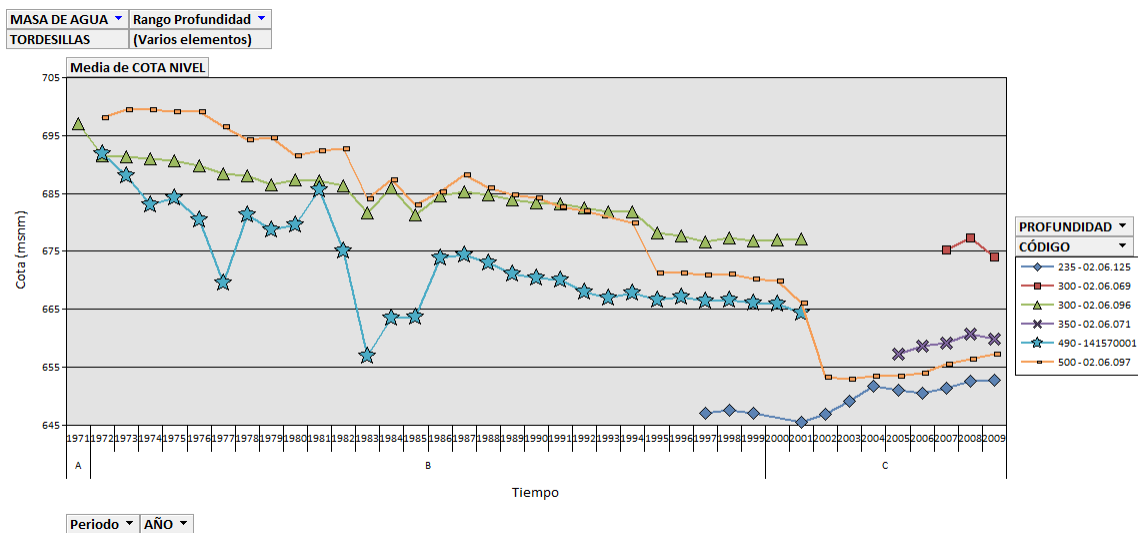


Figura 70: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tordesillas para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

Un aspecto a destacar es que, como ya se vio en otras zonas donde las extracciones profundas eran intensas, existe un cambio de tendencia a partir de 1998 aproximadamente, donde se estabilizan los niveles, y a partir de 2001 se registran ascensos de casi 10 metros, véanse piezómetros 02.06.125 y 02.06.097.

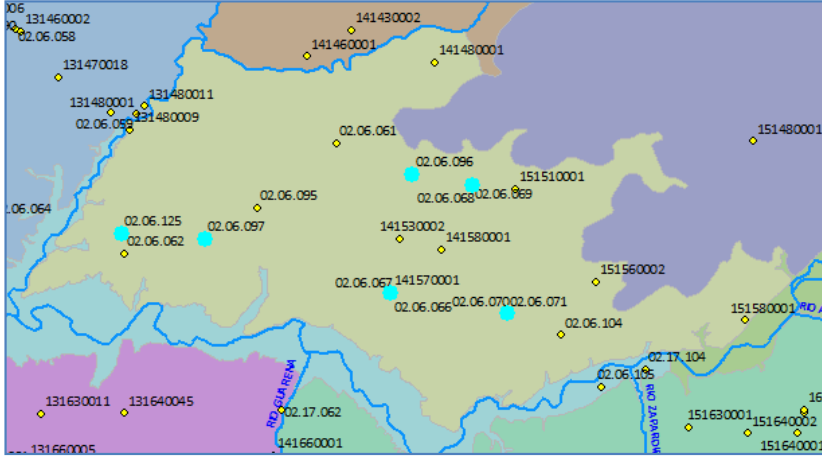


Figura 71: Mapa de la MAS Tordesillas con la ubicación de los piezómetros de la Figura 70.

Los piezómetros ubicados a una profundidad mayor de 200 metros se

representan en color azul en el mapa de la Figura 71.

MAS Ayllón

Sobre la MAS Ayllón solamente se dispone del registro de cuatro piezómetros (Figura 73). De ellos, el piezómetro 02.09.028 solo dispone de dos años de datos, por lo que se ha eliminado del análisis. Los otros tres piezómetros están ubicados todos entre 289 y 300 metros de profundidad.

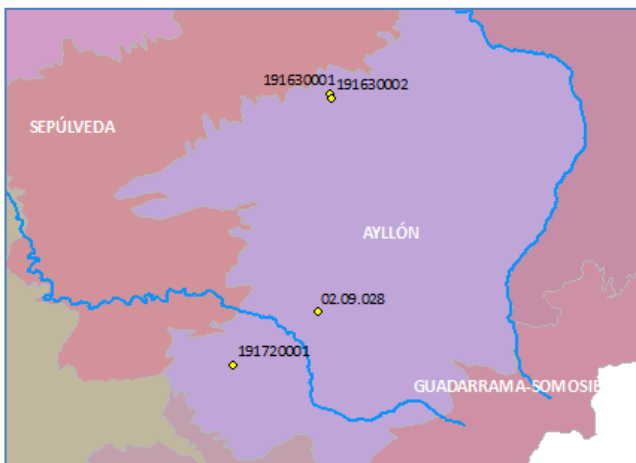


Figura 72: Mapa de la MAS Ayllón con la ubicación de los piezómetros de la Figura 73.

Los piezómetros 191630001 y 191630002, situados a cota 1058 y 1068 m.s.n.m., respectivamente, registran descensos de hasta 20 metros, mientras que el piezómetro

191720001, situado a cota 960 m.s.n.m. mantiene una tendencia estable toda la serie.

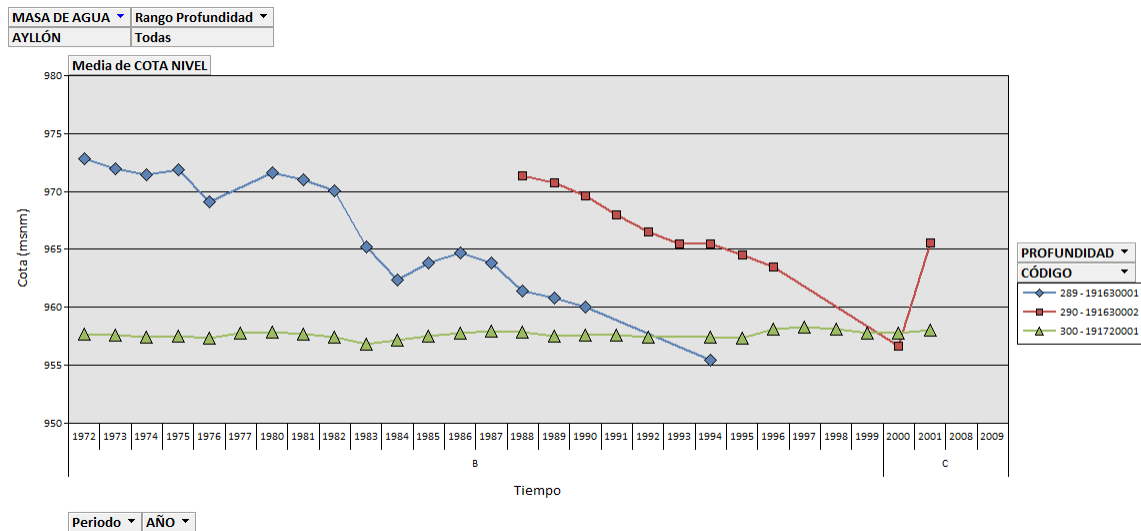


Figura 73: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Ayllón.

El motivo parece estar en la ubicación (ver mapa de la Figura 72), ya que la profundidad es similar. De este modo, los descensos se registran en la margen derecha del río Duratón, mientras que en la margen izquierda la tendencia es estable. El río así podría actuar como límite entre dos comportamientos diferentes del acuífero en esta zona. No obstante, los datos disponibles son muy escasos como para afirmar lo anterior.

MAS Salamanca

Profundidad inferior a 200 metros

La Figura 74 muestra los registros de los piezómetros cuya profundidad es inferior a 200 metros. La tendencia general de todos ellos es de estabilidad, con oscilaciones pequeñas ascendentes y descendentes en algunos de ellos, siempre en torno al valor central invariable en toda la serie.

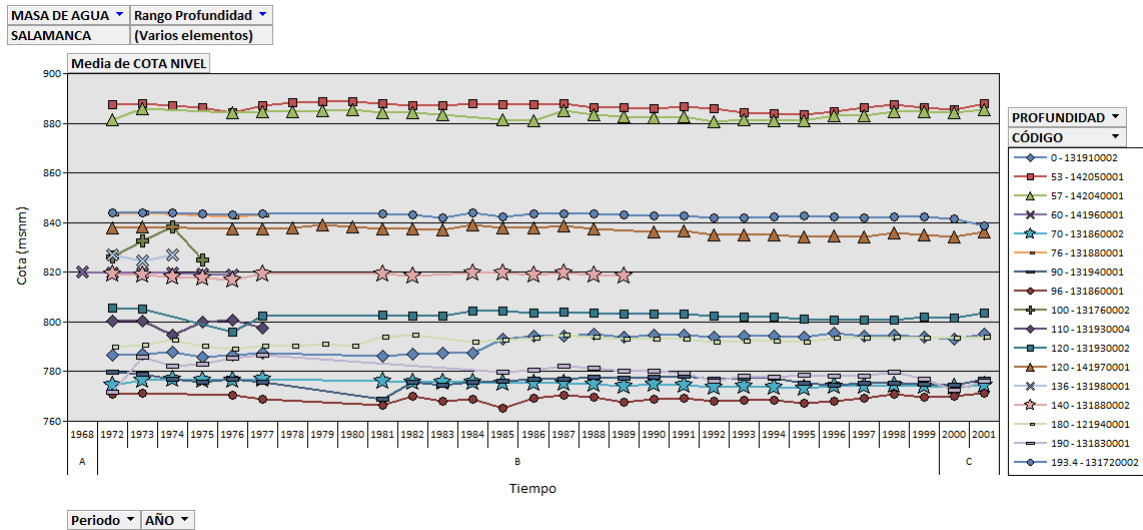


Figura 74: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Salamanca para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.

Profundidad superior a 200 metros

En el caso de los piezómetros profundos (Figura 75) parece que la tendencia general es la misma que en los superficiales. Así lo muestran aquellos piezómetros cuya serie es más larga, si bien en este caso existen varios piezómetros que se desmarcan del anterior comportamiento.

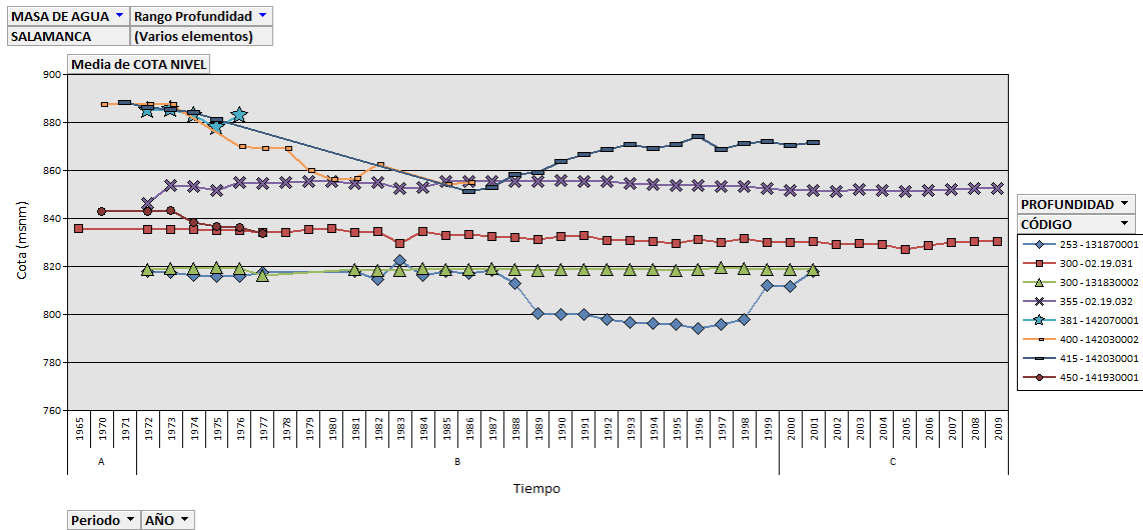


Figura 75: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Salamanca para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.

Los piezómetros 141930001, 142070001 y sobretodo el 142030002 insinúan al comienzo de la serie descenso de niveles, pero luego dejan de registrar datos. Nótese que estos piezómetros son los más profundos.

El piezómetro 142030001 también, aunque luego deja de tomar datos hasta 1985 y tras ese año registra una tendencia ascendente aparentemente inexplicable.

Los piezómetros de tendencia estable son el 02.19.032, el 131830002, y el piezómetro 02.19.31, si bien éste último registra pequeños descensos inferiores a 10 metros.

En la Figura 76 se muestra la ubicación de los piezómetros en la MAS Salamanca, en color amarillo aquellos de profundidad superior a 200 metros, y en azul el resto.

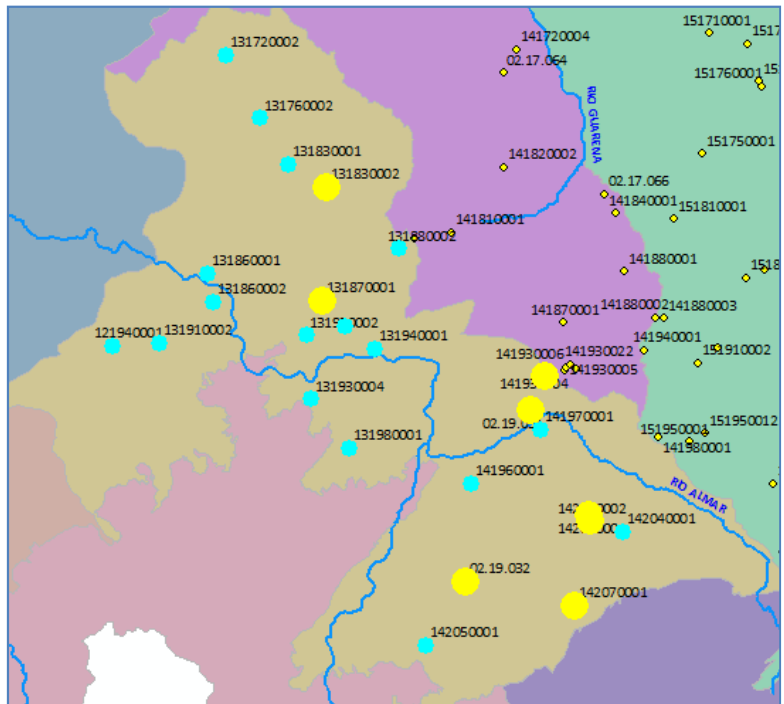


Figura 76: Mapa de la MAS Salamanca con la ubicación de los piezómetros de la Figura 74 en azul y los de la Figura 75 en amarillo.

Resumen

A continuación se muestran los mapas de isopiezas de toda la cuenca confeccionados por la OPH para el escenario de referencia (1972) y la situación actual (2009) para dos rangos de profundidad diferentes, uno entre 40 y 100 metros y el otro confeccionado con los piezómetros ubicados a profundidad mayor de 200 metros.

Los mapas ilustran de forma aproximada la piezometría del acuífero a las dos profundidades seleccionadas. Como se verá en la Tabla 2, donde se expone el resumen de los análisis de piezometría mostrados anteriormente, la situación en la realidad es más compleja y los límites en profundidad no están bien definidos. Es importante apuntar que para el caso de las isopiezas de profundidad superior e 200 metros el número de registros disponibles es considerablemente menor, más aún en el año de referencia.

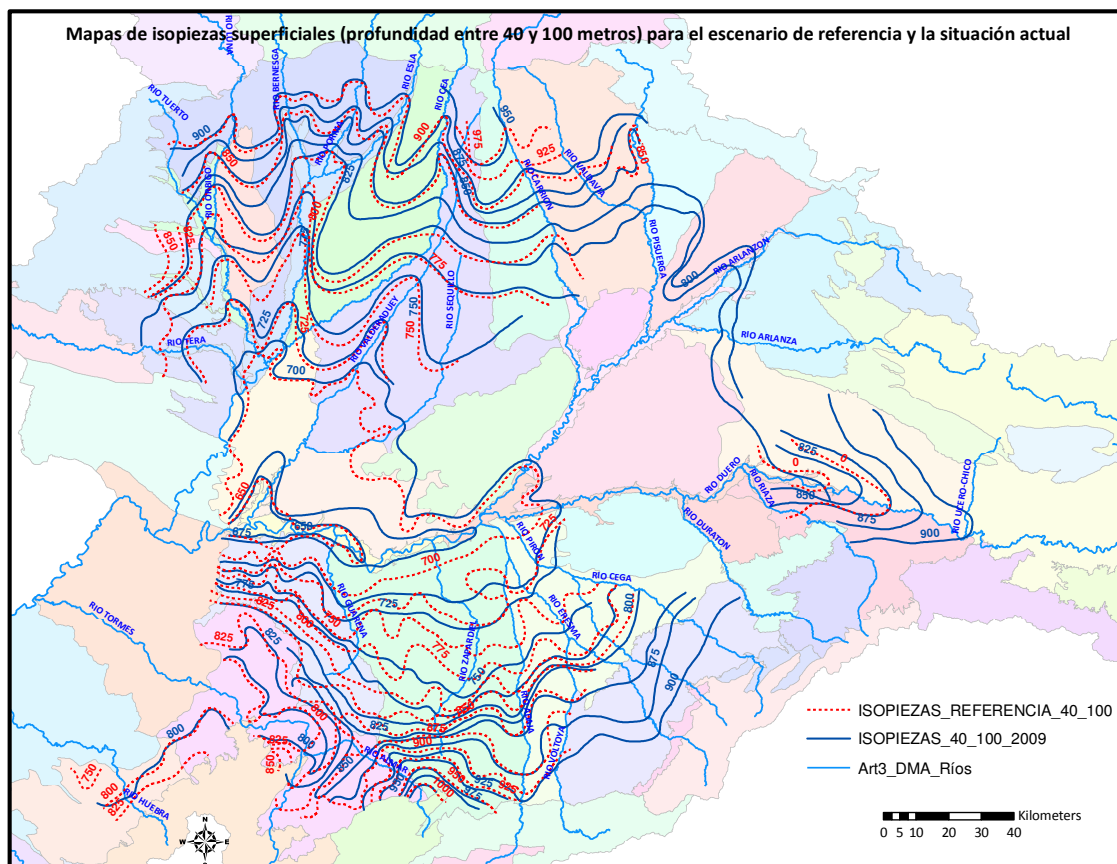


Figura 77: Mapas de isopiezas superficiales (profundidad entre 40 y 100 metros) en la cuenca del Duero para el escenario de referencia (1972, en color rojo) y la situación actual (2009, en color azul)

Análisis del balance de recursos en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.

MAS/Umod	División en profundidad	Otras divisiones (cota)	Tendencia / Grupo 1	Piezómetros 1	Tendencia / Grupo 2	Piezómetros 2	Tendencia / Grupo 3	Piezómetros 3	Periodo 1999-2009	
Arenales Guareña	< 100 m	Por encima de 800 m.s.n.m.	Estabilidad en cotas altas	151960001, 141820002						
		Por debajo de 800 m.s.n.m.	Descensos (4-5 m)	151650002, 131630011, 131640045, 141710002 y 141840001						
	100-200 m		Descensos en la mayoría de los piezómetros, de unos 5-8 metros	151950001, 131660005, 141930005	151810001 descenso de hasta 28 metros	151810001				
	200 m <		Grupo principal con descensos totales entre los 20 y los 40 metros	151750001, 02.17.063, 141940001	Tres piezómetros con descensos menores (10 m)	141720004, 141930002 Y 141930006	Grupo con tendencia estable, quizás anómala	02.17.061, 02.17.066, 141930004 y 141980001	Tendencia estable a todas las profundidades, con oscilación anual de hasta 15 metros	
Arenales Adaja-Zapardiel	< 100 m		Descensos que oscilan entre 7 y 15 m	161940001, 161660003, 151940003	Descensos que llegan a los 50 metros, como mínimo de 35 m	151740001, 151870002, 151820001	Tendencia estable	161720001, 161830012	Por encima de 800 m.s.n.m. estable	
	100-200 m		Descensos que oscilan entre 10 y 20 m	151780002, 161770002. 02.17.079, 151670002	Descensos medios en torno a 30 o 40 m	151740002, 151930001, 151680001	Tendencia estable	161880001, 161830001, 151930002, 161930001	Por debajo de 800m: estabilización a partir de 1998 y comienzo de recuperación (9 metros) a partir de 2005. Más notable (hasta 25 m) en los de mayores descensos (y generalmente más profundos)	
	200 <		Descensos mayores de 30 m (Grupo más mayoritario)	151730002, 161830002, 02.17.073	Descensos menores de 30 m	161850001, 151640002				
Arenales Eresma-Cega	< 100 m	por encima de 740 msnm	Estable, quizás pequeños descensos (menos de 5 m) Piezómetros muy superficiales	S-197, 161840001					Estabilización a partir de 1998 y comienzo de recuperación a partir de 2005. Variable según profundidad y cota	
		por debajo de 740 m.s.n.m.	Descensos entre 15 y 25 m	161670001, 161630001, 161660003						
	100-200 m		Descendente: 5, 15 y 25 metros de media para los piezómetros 161660001, 161660002 y 02.08.25, respectivamente	161660001, 161660002 y 02.08.25, respectivamente	Estable en caso de no ser anómalo	171760001				
	200 m <	Por encima de 800 m.s.n.m.	Estable, alguno ligeramente descendente (171810001, máximo 5 m)	181720001, 171810001						
		Por debajo de 800 m.s.n.m.	Descensos de 20 metros y de más 30 metros	02.17.074, 02.08.026 (máx. descenso)						

Análisis del balance de recursos en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.

MAS/Umod	División en profundidad	Otras divisiones (cota)	Tendencia / Grupo 1	Piezómetros 1	Tendencia / Grupo 2	Piezómetros 2	Tendencia / Grupo 3	Piezómetros 3	Periodo 1999-2009
Zona de los Páramos	< 200 m		Tendencia estable, algún piezómetro oscilaciones descendentes y ascendentes (< 10 metros)	231650001, 161460001, 02.13.011					
	200 m <		Fase 1: descendente 1972-1998-->entre 25 y 40 m. Fase 2: Estabilización a partir de 2005. Fase 3: Recuperación de niveles (hasta 10 metros)	171460017, 02.06.107, 02.08.027, 02.08.024					Recuperación de niveles (hasta 10 metros)
Villafáfila	< 200 m		Algún piezómetro insinúa descensos (5-8 m)	131330003, 02.06.089	Tendencia estable	131460002	Ascenso en el periodo 1982-2001.	131480001, 131420006	
	200 m <		Tendencia estable con ligeras oscilaciones	02.06.090	Fase 1: Descenso (5- 10 m) hasta 2001. Fase 2: Recuperación suave hasta la actualidad (3-4 metros)	02.06.091			
Carrión	Completo 60<Prof.>250		Tendencia estable	160950001, 02.06.106	Un piezómetro con ascensos en torno a 10 m	160950002			
Tierra de Campos	< 200 m	Por encima de 735 m.s.n.m.	Tendencia estable	151060001. 02.06.100, 151170002, 161310001	Descensos de entre 5 metros y 15 metros	151260001, 151230001, 151320001 y 02.06.101.			Solo un piezómetro con registro a partir de 2002 y muestra recuperación
		Por debajo de 735 m.s.n.m.	Tendencia siempre descendente, entre 5 y 15 metros en todos hasta 2001	141460001, 141360023, 151060001, 141440003					Algún pz parece atenuar su descenso ligeramente, pero el único registro completo (02.06.094) desciende
	200 m <	Por encima de 745 m.s.n.m.	Tendencia ascendente, 5 y 10 metros por encima de 890 m.s.n.m ubicados a cotas más altas	150970001, 150970002 y 150970003	Tendencia ascendente, entre 15 y 25 metros entre 740 y 850 m.s.n.m.	141240001, 150960001 y 150960002			
		Por debajo de 745 m.s.n.m.	Tendencia descendente: entre 9 metros (02.06.093) y 25 metros (141320005)	también 141430002 y 02.06.103.					Estabiliza a partir del año 2000
Aluviales Duero: Tordesillas-Zamora	100 m <		Tendencia descendente, entre 10 y 20 metros	161560002 y 161570001	Fase 1: ascenso de 7 metros 1972-1994. Fase 2: Descenso de 10 metros hasta 2005. Fase 3: Recuperación (5 m)	02.06.105			Recuperación en 2005/06

MAS/Umod	División en profundidad	Otras divisiones (cota)	Tendencia / Grupo 1	Piezómetros 1	Tendencia / Grupo 2	Piezómetros 2	Tendencia / Grupo 3	Piezómetros 3	Periodo 1999-2009
Aluviales del Pisuerga-Arlanzón	120 m <		Tendencia estable	(solo 2 piezómetros) 171270001, 181170001					
Tordesillas	< 200 m		Descensos que oscilan entre 10 metros y 30 metros	141580001, 151560002, 141530002, 02.06.104	Tendencia estable	02.06.095 y 151580001	Un piezómetro con ascenso (5-8 m), el menos profundo, 48 m	131480009	Indicios de recuperación en 2002 en el 02.06.104
	200 m <		Descensos mayores que pz prof < 200 m. Descensos de 20m, 30m y 45 m	para 02.06.096, 141570001 y 02.06.07, respectivamente					Indicios de recuperación entre 1997 y 2002 (5-10 m), 02.06.097, 02.06.125, 02.06.071
Ayllón			Descensos de hasta 20 metros	191630001 y 191630002	Tendencia estable	191720001			
Salamanca	< 200 m		Tendencia general estable, con pequeñas oscilaciones ascendentes y descendentes en algunos	142050001, 131720002, 131930002, 131860001					
	200 m <		Tendencia estable, pequeños descensos inferiores a 10 metros (02.19.31)	02.19.032, 131830002, 02.19.31	Insinúan descensos al comienzo de la serie, periodo 1971-1976	141930001, 142070001 y 142030002 (los más profundos)			

Tabla 2: Tabla resumen con los resultados de los análisis de piezometría, agrupados por MAS (UMod en su caso), y diferenciados según la profundidad, y en ocasiones la cota, de los piezómetros.

La primera conclusión que se obtiene vistos los análisis anteriores es la gran heterogeneidad de los materiales del acuífero terciario, reflejada en la disparidad de los registros que muestran los piezómetros. La principal implicación de lo anterior es que la piezometría se comporta de manera diferente en profundidad.

En cualquier zona del acuífero seleccionada resulta complicado definir un comportamiento como representativo de la misma, ni explicar en muchos casos su comportamiento en base a unos patrones como la profundidad o la ubicación del mismo. Existen piezómetros cercanos y ubicados a profundidad similar en los cuales los registros son totalmente diferentes, y piezómetros donde las condiciones (profundidad y ubicación) varían y sus registros parecen seguir tendencias similares.

Este comportamiento heterogéneo y anisótropo de los materiales del acuífero ha sido documentado anteriormente en otros trabajos, no obstante, los resultados del análisis pueden arrojar algunas ideas adicionales acerca del comportamiento en algunas zonas:

- Los primeros análisis de la piezometría realizados llevaron a pensar inicialmente que podía existir a grandes rasgos una diferenciación de la piezometría en profundidad en tres niveles; uno superficial desde la superficie hasta 70-85 metros, con mayor nivel piezométrico; un segundo nivel intermedio desde el anterior hasta los 160-250 metros, dependiendo de la zona; y un último nivel profundo, donde se registran los menores niveles piezométricos. Posteriormente se constató que la definición anterior no se cumple en muchos casos dada la propia heterogeneidad de los materiales y la distribución espacial de las extracciones.

- Existen varias zonas en las que el nivel piezométrico se ha mantenido constante a lo largo de toda la serie. Estas zonas son aquellas que se encuentran alejadas de los bombeos más intensos, y se corresponden con las MAS Salamanca, Villafáfila, Aluviales del Pisuerga-Arlanzón, Carrión, y las zonas más altas de las MAS Tierra de Campos e incluso de Tierra del Vino, Medina del Campo y Los Arenales.

- Hay una zona donde la concentración de bombeos es sin duda mayor, principalmente en torno a las MAS Arenales y Medina del Campo (algo más centrada hacia el tronco del Duero, por debajo, quizás también por debajo de los páramos), es donde se generan los mayores descensos del nivel piezométrico. En la zona correspondiente a la MAS Tierra del Vino los bombeos son menores, y los descensos que se aprecian en los piezómetros podrían tener que ver con dos factores:

- la afección de los bombeos intensos de Arenales y Medina del Campo (por eso el descenso es más tenue)

- la influencia del tramo final del Duero

El resto de MAS donde las extracciones son de magnitud considerable son la MAS Tordesillas, y la MAS 67, bajo los Páramos.

- En las zonas donde las extracciones están más desarrolladas se intuyen descensos mayores en las capas profundas que en las superficiales. Es aquí también donde la heterogeneidad se hace más patente y el comportamiento de los piezómetros más variable.

- En referencia a los descensos acontecidos debajo de los páramos, se podría interpretar que en régimen natural el flujo profundo de esta zona tendría como destino los tramos 7 u 8 del Duero (ya que los tramos 5 y 6 están aislados por el paquete de margas), pero dados los fuertes descensos en la zona de arenales se puede haber generado una atracción del flujo a esta zona que desvíe el flujo natural del agua ligeramente.

- Otro de los fenómenos que muestran los resultados, en aquellas zonas donde ocurren descensos, es la estabilización de los mismos en torno a los años 1997-2002. Los piezómetros con series de datos más largas permiten observar además como en muchos de los casos a esta fase de estabilización sigue otra de recuperación de niveles en torno al año 2005. El ascenso de niveles en ningún caso es de la magnitud del descenso previo. Tanto la fase de estabilización como la de ascenso de nivel piezométrico se hace más patente en aquellas zonas donde los descensos han sido de mayor magnitud.

- De los resultados también se deduce que el procedimiento previo de agrupar los piezómetros según unidades de modelación en la Región de Los Arenales no tiene consecuencia alguna ni en los resultados ni en la interpretación de los mismos.

- Por último, en la línea de lo comentado en el apartado 3.2.4. Limitaciones del análisis, tras la realización del análisis también se pone de manifiesto la necesidad de confeccionar una base de datos fiable en la que se eliminen aquellos piezómetros cuyo estado sea defectuoso, y se verifiquen las características del resto de piezómetros de dudoso estado para una correcta interpretación de los datos (si es estanco o no, profundidad a la que toma agua...)

3.2.6. Análisis de Flujo Vertical

En este punto se pretende poner de manifiesto uno de los fenómenos que ocurre en el acuífero consecuencia su heterogeneidad, como es la variación de la piezometría en profundidad. La principal implicación de lo anterior tiene que ver con la existencia de flujo vertical entre los materiales más profundos y más someros del mismo.

Teóricamente, aquellas zonas donde el nivel piezométrico de los estratos superiores sea menor que el de los estratos inferiores son zonas donde podría desarrollarse un flujo vertical ascendente. En el caso contrario el flujo podría ser descendente. La ocurrencia de este fenómeno no solo dependerá de la diferencia de potencial entre los estratos, sino de otros factores como los parámetros hidrodinámicos de los mismos, principalmente la conductividad vertical.

La Figura 79 muestra un caso en el que podrían darse fenómenos de flujo vertical. En ella se representa la serie de niveles registrada por dos piezómetros situados muy cercanos el uno del otro (ver Figura 80) y a la misma cota, que miden a profundidades diferentes:

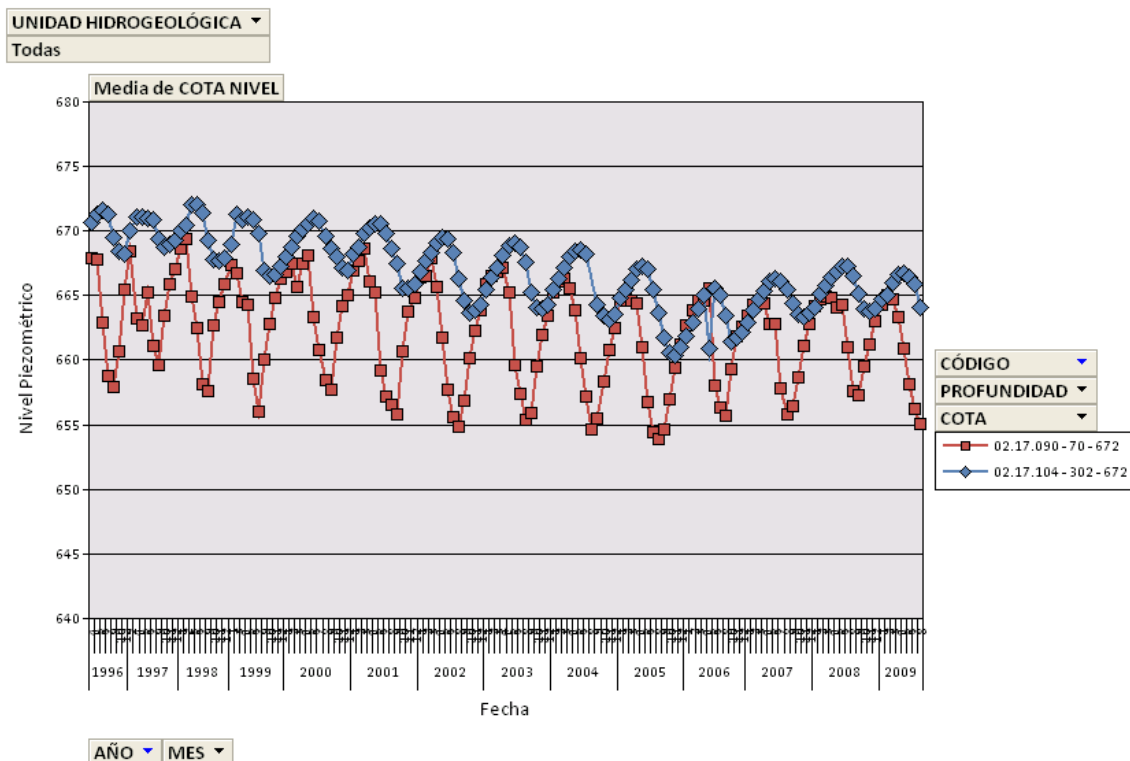
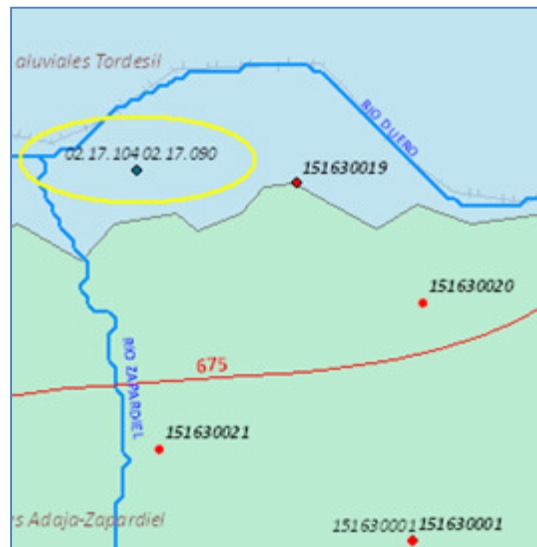


Figura 79: Series de nivel piezométrico para el periodo 1996-2009 en los piezómetros 02.17.090 y 02.17.104.

Figura 80: Mapa con la ubicación de los piezómetros representados en la figura anterior.

Los piezómetros están ubicados justo en la desembocadura del río Zapardiel en el Duero. La serie consta de 13 años (1996-2009), en los que los piezómetros muestran una tendencia casi idéntica con descensos de 5-8 metros los primeros nueve años, y una pequeña recuperación los cuatro restantes hasta la actualidad. No obstante, el rango de oscilación anual es diferente, siendo más sensible el piezómetro ubicado a 70 metros de profundidad (02.17.90), con una oscilación en torno a los 10-13 metros, por los 5 metros del piezómetro 02.17.104, ubicado a 302 metros de profundidad.



En invierno el piezómetro más profundo registra un nivel apenas 2-3 metros mayor que el superficial, sin embargo, en verano esta diferencia se amplía hasta los 10 metros. La interpretación de la situación es que podría estar aconteciendo un flujo ascendente desde los estratos inferiores hacia los más superficiales, en este caso probablemente inducido por las extracciones, ya que los descensos se dan durante la época estival.

Para estudiar este fenómeno a una escala más general se trabaja a continuación con mapas de isopiezas (mostrados en las Figura 77 y Figura 78) en la Región de Los Arenales.

En la figura siguiente se muestra el mapa con la representación de las isopiezas de entre 40 y 100 metros con líneas discontinuas rojas y las de más de 200 metros con líneas discontinuas azules, para el año de referencia, que representa un escenario asimilable al régimen natural.

En color naranja se marcan aquellas zonas donde el nivel freático de la capa profunda es mayor al de la superficial, y en amarillo donde ocurre el fenómeno contrario. En las zonas en blanco, en líneas generales el nivel superficial es ligeramente superior al profundo, pero no está marcado en amarillo porque la diferencia de potencial es muy pequeña.

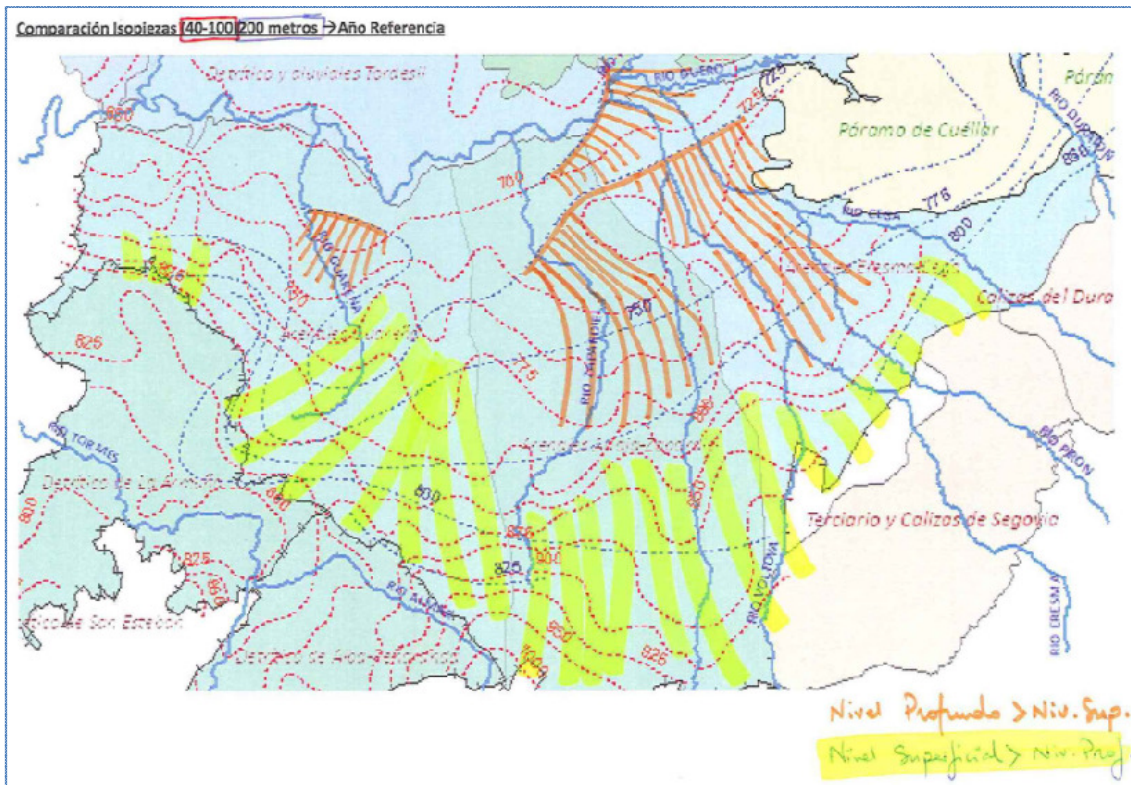


Figura 81: Mapa de isopiezas para el año de referencia en la Región de Los Arenales. Las isopiezas de entre 40 y 100 metros se muestran con líneas discontinuas rojas y las de más de 200 metros con líneas discontinuas azules.

De este modo se podría entender la figura anterior como un mapa que representa zonas donde se pueden dar movimientos verticales, ascendentes y descendentes.

En este escenario se observa como en líneas generales, en las zonas más altas el nivel superficial es superior al profundo, por lo que teóricamente sería viable la presencia un flujo descendente. En las zonas más bajas, principalmente en el entorno de los ríos, la tendencia de flujo se invierte, facilitándose el flujo ascendente.

En la figura siguiente se muestra el mapa con la misma representación para el momento actual. En este caso las isopiezas de entre 40 y 100 metros se muestran con líneas simples y las de más de 200 metros con líneas compuestas.

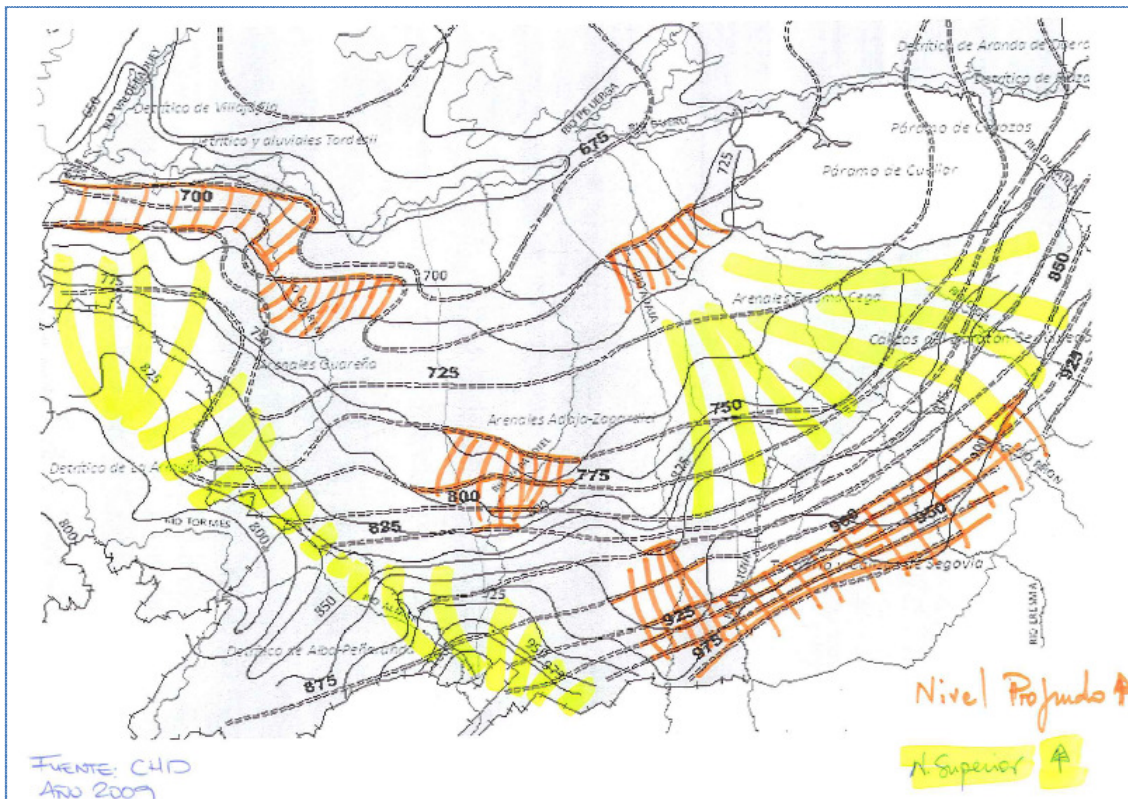


Figura 82: Mapa de isopiezas para el año 2009 en la Región de Los Arenales. Las isopiezas de entre 40 y 100 metros se muestran con líneas simples y las de más de 200 metros con líneas compuestas.

A primera vista llama la atención que se ha disminuido la superficie en la que es factible el flujo vertical descendente, principalmente en la zona central. Este proceso se puede interpretar como un descenso de niveles en la zona más profunda del acuífero debido a la intensidad de las extracciones.

En torno a los ríos Eresma, Cega y Pirón el proceso ocurrido parece haber sido más bien el contrario, no obstante se ha de considerar que en el mapa correspondiente al periodo de referencia apenas se tienen datos de esta zona. Además esta es una zona donde la profundidad es menor y que se encuentra prácticamente aislada por afloramientos impermeables de los materiales ubicados al SO de la misma (correspondientes a la MAS 55, Cantimpalos). De un modo u otro el nivel piezométrico entre 40 y 100 metros en esta zona parece alto.

Se aprecia también como han aparecido zonas dispersas donde el nivel profundo es mayor, lo cual parece responder a las extracciones.

Por otro lado, en la zona cercana al tramo final del Duero aparece una zona en la margen izquierda con potencial flujo ascendente. Esta zona no pudo apreciarse en el escenario de referencia porque no existían mediciones sobre la misma.

3.3. Infiltración

3.3.1. Introducción

En este apartado se analizará la infiltración en la cuenca del Duero. En primera instancia se presentan los valores de infiltración que figura en el actual Plan Hidrológico de cuenca, proporcionados por el modelo de precipitación-aportación SIMPA. A continuación se centrará el análisis en las MAS intervinientes en el balance del acuífero terciario, y se analizará la evolución temporal y espacial de la serie.

En el Anexo 2 se analizará la incertidumbre asociada a los datos de infiltración mostrando la variación de los valores actuales de infiltración con respecto a otros utilizados en fechas anteriores, extraídos con diferentes versiones del modelo SIMPA. Finalmente se analiza el funcionamiento del modelo y sus limitaciones.

3.3.2. Descripción situación actual

A continuación se expone el análisis de la infiltración en la cuenca del Duero. Para ello se hace uso del Anexo 2 de la Memoria del Plan Hidrológico de Cuenca del 2009, en el cual se aborda el Inventario de Recursos Hídricos en su totalidad, incluyendo los superficiales y los subterráneos, y dentro de estos últimos también las transferencias entre MAS. Centrándose en el objetivo de este trabajo no se abordará lo referente a los recursos superficiales del citado anexo, y con respecto a los subterráneos se analizarán únicamente los valores de infiltración por lluvia y las transferencias laterales.

El Anexo 2 presenta el balance de la cuenca con el objeto de estimar una cifra de los recursos naturales y los disponibles. Para ello se trabaja con la infiltración por lluvia (obtenida del modelo SIMPA) y las entradas laterales entre MAS.

A continuación se exponen los valores de infiltración por lluvia y transferencias laterales para cada MAS (Tabla 3):

Código	Nombre de la masa de agua subterránea	Infiltración por lluvia SIMPA	Transferencias	
			Entrada	Salida
400001	Guardo	556	0.00	15.00
400002	La Pola de Gordón	305	0.00	30.00
400003	Cervera de Pisuerga	236	0.00	0.00
400004	Quintanilla-Peñahorada	127	0.00	27.37
400005	Terciario y Cuaternario del	241	42.00	0.00
400006	Valdavia	154	6.71	14.45
400007	Terciario y Cuaternario Esla-	91	1.50	0.00
400008	Aluvial del Esla	25	0.00	0.00
400009	Tierra de Campos	116	0.75	17.07

400010	Carrión	54	0.75	0.00
400011	Aluvial del Órbigo	8	0.00	0.00
400012	La Maragatería	236	0.00	0.00
400014	Villadiego	26	6.71	8.19
400015	Raña del Órbigo	13	0.00	0.00
400016	Castroieriz	68	16.96	7.41
400017	Burgos	113	70.54	19.52
400018	Arlanzón – Río Lobos	164	0.00	106.09
400019	Raña de la Bañeza	6	0.00	0.00
400020	Aluviales de Pisuerga -	12	0.00	0.00
400021	Sierra de la Demanda	29	0.00	0.00
400022	Sanabria	147	0.00	0.00
400023	Vilardevós - Laza	200	0.00	0.00
400024	Valle del Tera	33	0.00	0.00
400025	Páramo de Astudillo	9	14.45	14.40
400027	Sierra de Cameros	394	0.00	0.00
400028	Verín	15	0.00	0.00
400029	Páramo de Esgueva	70	0.00	0.00
400030	Aranda de Duero	96	77.04	0.00
400031	Villafáfila	34	0.00	0.00
400032	Páramo de Torozos	45	0.00	0.00
400033	Aliste	116	0.00	0.00
400034	Araviana	17	0.00	5.22
400035	Cabreias - Soria	71	0.00	27.97
400036	Moncavo	12	0.00	0.00
400037	Cuenca de Almazán	117	39.55	26.54
400038	Tordesillas	32	4.97	0.00
400039	Aluvial del Duero: Aranda -	15	0.00	0.00
400040	Savago	119	0.00	0.00
400041	Aluvial del Duero: Tordesillas -	5	0.00	0.00
400042	Riaza	48	5.03	0.00
400043	Páramo de Cuéllar	39	0.00	0.00
400044	Páramo de Corcos	22	0.00	0.00
400045	Los Arenales	41	2.84	1.18
400046	Sepúlveda	42	0.00	0.00
400047	Medina del Campo	60	2.46	0.00
400048	Tierra del Vino	45	5.74	0.00
400049	Avllón	57	0.00	0.00
400050	Almazán Sur	62	0.00	12.29
400051	Páramo de Escalote	11	0.91	0.00
400052	Salamanca	85	0.00	8.21
400053	Vitigudino	165	0.00	0.00
400054	Guadarrama - Somosierra	34	0.00	0.00
400055	Cantimpalos	53	0.00	2.84
400056	Prádena	13	0.00	0.00
400057	Segovia	6	0.00	0.00
400058	Campo Charro	94	0.00	0.00
400059	La Fuente de San Esteban	104	0.00	0.00
400060	Gredos	262	0.00	0.00
400061	Sierra de Ávila	81	0.00	5.00
400063	Ciudad Rodrigo	35	0.00	0.00
400064	Valle de Ámbles	13	5.00	0.00
400065	Las Batuecas	87	0.00	0.00
400066	Valdecorneia	6	0.00	0.00
400067	Terciario detrítico	0	44.84	0.00
	TOTAL	5.594	348.76	348.76

Tabla 3: Infiltración por lluvia y transferencias laterales por MAS, hm3.

El cálculo del balance es en realidad más complejo, pues se han de considerar otros términos como el intercambio a través de los ríos. Además, fuera del escenario en régimen

natural, el balance se ve alterado por acciones externas derivadas de la acción humana, como son los bombeos directos, las transferencias laterales inducidas por bombeos, entradas por retornos, la infiltración desde embalses o la recarga artificial.

Según la tabla anterior, el valor de la recarga por lluvia en régimen natural se sitúa en torno a 5.594 hm³/año, y se produce una transferencia entre MAS de alrededor de 349 hm³/año.

El mapa de la Figura 83 muestra la distribución de la infiltración total anual, en mm/año, en la parte española de la cuenca del Duero.

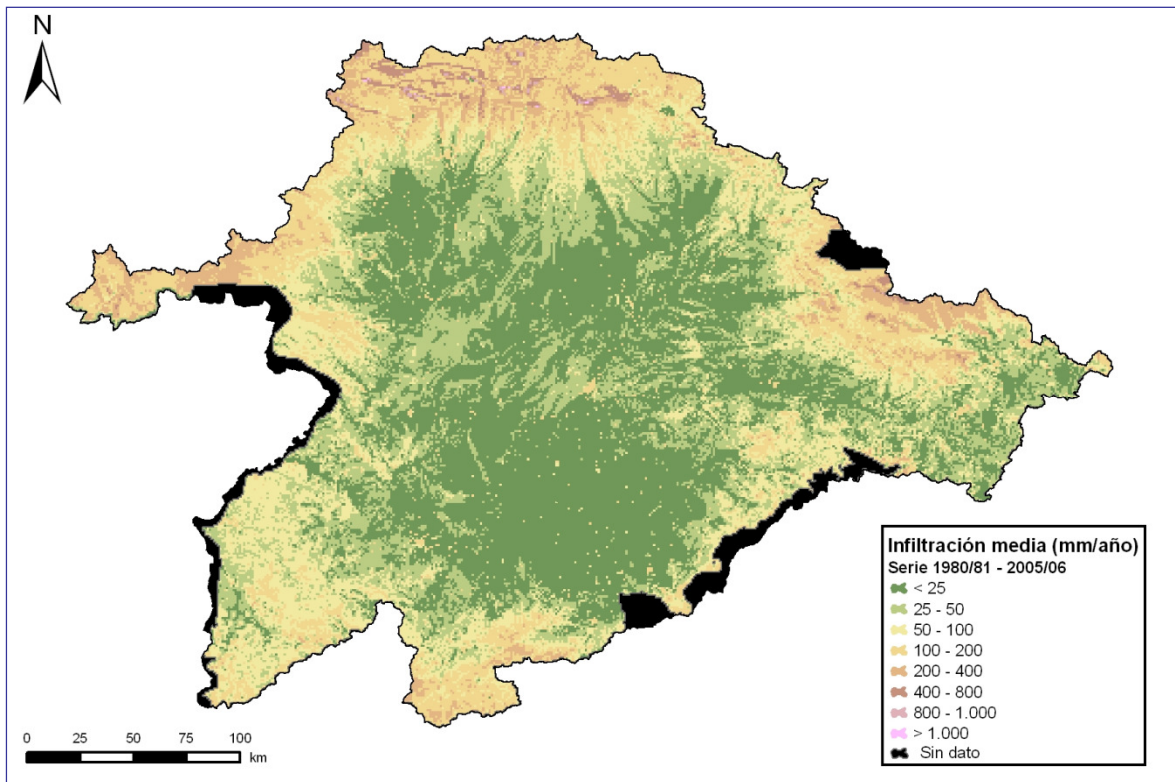


Figura 83: Distribución espacial de la infiltración total anual (mm/año).

Nótese la gran variabilidad desde los límites exteriores hacia el centro de la cuenca.

3.3.3. Infiltración en la zona de estudio

A continuación, del mismo modo que se hizo en el apartado de bombeos, se va a centrar el análisis en las MAS sobre las cuales se aplicará el balance. Todos los análisis que se hacen a continuación en el apartado de infiltración se llevarán a cabo sobre este conjunto de MAS.

Código	Nombre de la masa de agua subterránea	Infiltración por lluvia SIMPA	Transferencias laterales	
			Entrada	Salida
400006	Valdavia	154	6.71	14.45
400009	Tierra de Campos	116	0.75	17.07
400010	Carrión	54	0.75	0
400014	Villadiego	26	6.71	8.19
400016	Castrojeriz	68 ⁵	16.96	7.41
400017	Burgos	113	70.54	19.52
400030	Aranda de Duero	96	77.04	0
400031	Villafáfila	34	0	0
400037	Cuenca de Almazán	117	39.55	26.54
400038	Tordesillas	32	4.97	0
400042	Riaza	48	5.03	0
400045	Los Arenales	41	2.84	1.18
400046	Sepúlveda	42	0	0
400047	Medina del Campo	60	2.46	0
400048	Tierra del Vino	45	5.74	0
400049	Ayllón	57	0	0
400052	Salamanca	85	0	8.21
400067	Terciario detrítico	0	44.84	0
	TOTAL	1102	240.05	66.64
			165.41	

Tabla 4: Infiltración anual promedio y transferencias laterales en las MAS de agua intervinientes en el balance.

La tabla siguiente muestra los valores de infiltración por lluvia total anual de la serie (1941-2009) en las MAS de agua intervinientes en el balance. En este caso la infiltración es notablemente inferior, 1102 hm³/año, debido a que quedan fuera del balance la mayoría de las MAS ubicadas en las cabeceras, donde las precipitaciones son mayores.

Se muestra también la cifra de transferencias entre MAS, 165.4 hm³/año. Dicho valor se calcula con la resta de las salidas a las entradas para todas las MAS. No obstante falta por considerar una entrada de 2.8 hm³/año procedente de la MAS Cantimpalos, por lo que la cifra total sería de alrededor de 176 hm³/año.

⁵ Como se explica en apartados posteriores, la MAS 16 Castrójeriz, no será incluida en el balance final por ubicarse sobre un paquete de margas que la aísla de los materiales terciarios más profundos.

Nótese que los valores en cursiva no han sido considerados porque de un modo u otro ya están considerados en el resto de cifras, como por ejemplo la entrada a la MAS 67, Terciario detrítico, pues la entrada proviene de otra MAS en la zona de balance donde ya fue considerada, por lo que se estaría duplicando.

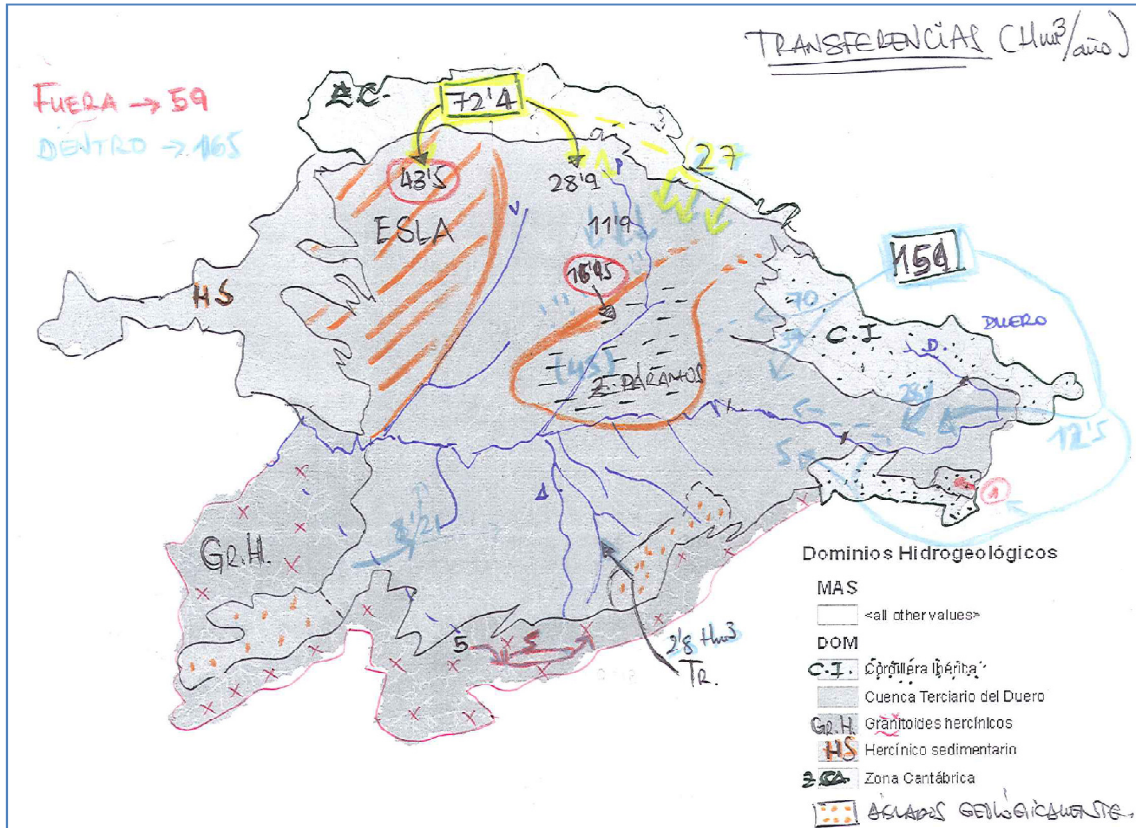


Figura 84: Esquema con las transferencias entre MAS en la Cuenca del Duero agrupadas por dominios Hidrogeológicos.

Análisis temporal

A continuación se analizará la variabilidad temporal de la infiltración por medio de las series de infiltración anual e infiltración mensual para el periodo 1940-2006 (figuras 89 y 90), centrándose en las diferencias entre los valores de la serie larga y la serie corta, y analizando los periodos donde la infiltración es significativamente diferente.

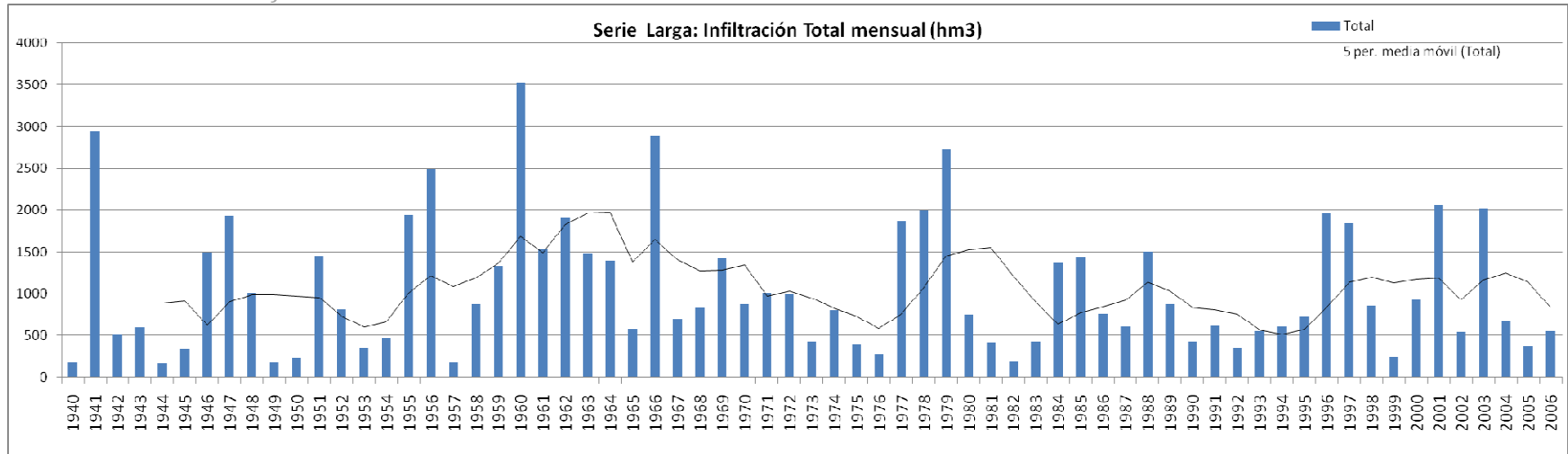


Figura 85: Serie de infiltración total anual, y media móvil de 5 años de la misma, para el periodo 1940-2006

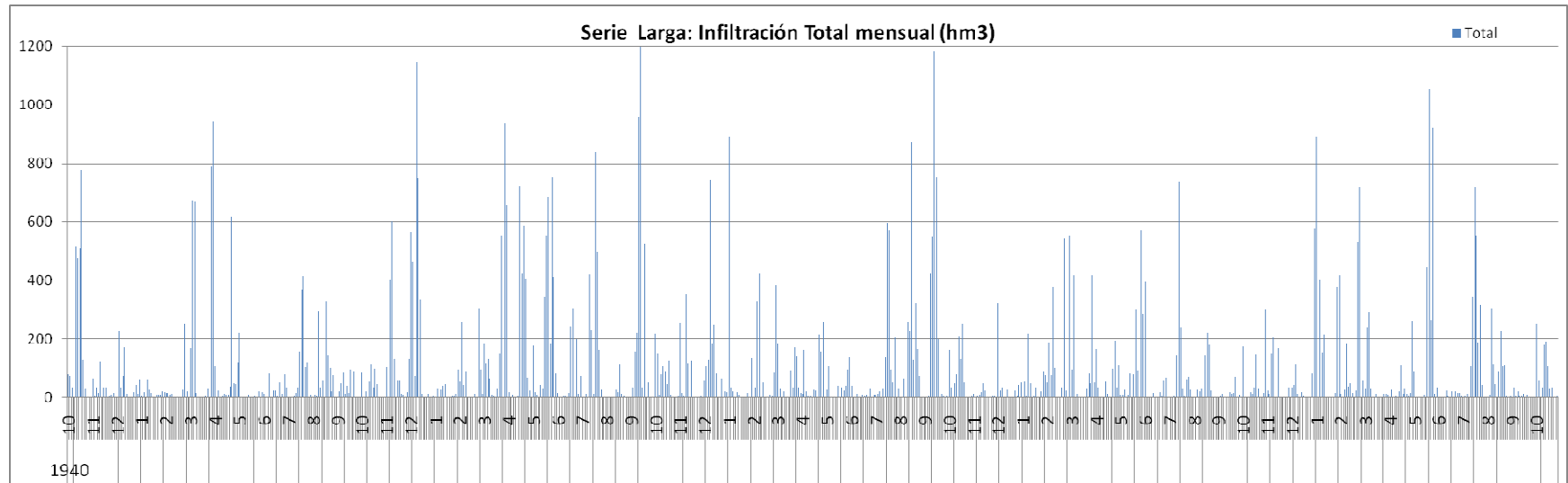


Figura 86: Serie de infiltración mensual en la zona de estudio para el periodo 1940-2006.

La Figura 85 muestra la serie de infiltración total anual para el periodo 1941-2006.

Los valores oscilan entre 4000 y 100 hm³/año, con valores medios en el rango entre 300 y 1500 hm³/año. Obviando aquellos valores extremos por encima y por debajo, correspondientes a significativamente más húmedos y secos, se pueden intuir tres fases a lo largo de la serie:

- la primera fase desde el comienzo hasta 1958, con valores medios en torno a 500 hm³/año, donde la irregularidad es muy grande y se suceden años secos y húmedos, estos últimos de magnitud hasta cuatro veces mayor que la media.

- posteriormente se suceden 15 años con valores sustancialmente más húmedos, hasta aproximadamente 1974, con valores medios alrededor de 1100-1200 hm³/año. La variabilidad en este periodo es menor. Este periodo se podría interpretar que comienza en 1954 y termina en 1980, pero habría que profundizar en los análisis para afirmarlo, ya que existen tres años intermedios de infiltración considerablemente menor.

- el tercer y último periodo transcurre desde 1980 hasta el año 2006, coincidente con la denominada "serie corta" donde los valores oscilan alrededor del valor central 600 hm³/año, aproximadamente, y máximos y mínimos entre 2100 y 200 hm³/año, respectivamente.

Las diferencias entre las denominadas series corta y larga son de sobra conocidas, y se hacen patentes en la serie. No obstante, lo que más llama la atención a primera vista es la infiltración en el primer periodo, probablemente la más baja de toda la serie, ya que parece ser inferior incluso a la del último periodo. Siendo así, las verdaderas diferencias entre las series larga y corta podrían deberse realmente al periodo 1954-1980, unas diferencias que estarían incluso enmascaradas por el periodo 1940-1954.

La Figura 86 muestra la misma serie en esta ocasión a escala mensual. Los valores oscilan entre 1200 hm³/año y prácticamente cero. Lógicamente los años de gran infiltración en la serie anual tienen correspondencia en la serie a escala mensual. Se puede apreciar además una gran variabilidad intranual de los valores, la cual se refleja de forma más clara en el gráfico de la Figura 87, que muestra la infiltración media mensual de la serie completa, la serie corta y el periodo 1940-1980.

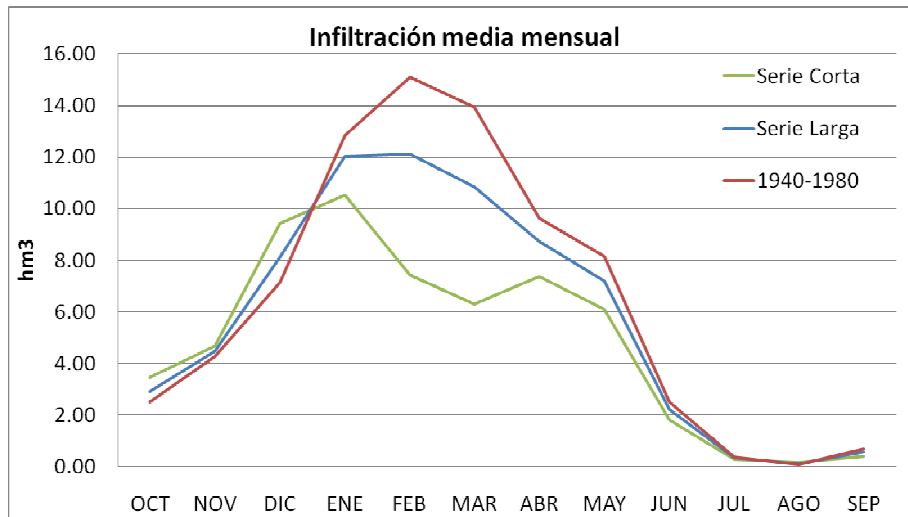


Figura 87: Promedio mensual de Infiltración para la serie completa, la serie corta y el periodo 1940-1980.

La infiltración máxima oscila entre 10 y 14 hm^3/mes en invierno y la mínima, en verano, es prácticamente nula.

Al comparar las diferentes series de datos, se observa como durante la época estival los valores son prácticamente idénticos, y como las principales diferencias se dan entre los meses de diciembre y mayo. Claramente el periodo de mayor infiltración es el transcurrido hasta 1980, y el menor el correspondiente a la serie corta (la serie larga obviamente se sitúa entre ambos, pues los incluye). Llama la atención la tendencia que muestran los valores de la serie corta en los meses de febrero y marzo, pues al contrario que en los otros dos casos, son inferiores a los de enero y mayo, mostrando un descenso de difícil explicación.

Si se representan los valores medios de la serie de infiltración divididos en los tres periodos que se diferenciaron en las conclusiones del análisis de la serie anual, se observa como efectivamente el periodo 1954-1980 es sin duda el de mayor infiltración. También se puede intuir como el periodo entre 1940 y 1954 no es tan inferior al de la serie corta como parecía a priori, lo que ocurre es que los mayores valores se dan entre enero y mayo, y en el resto de series el aumento comienza en diciembre.

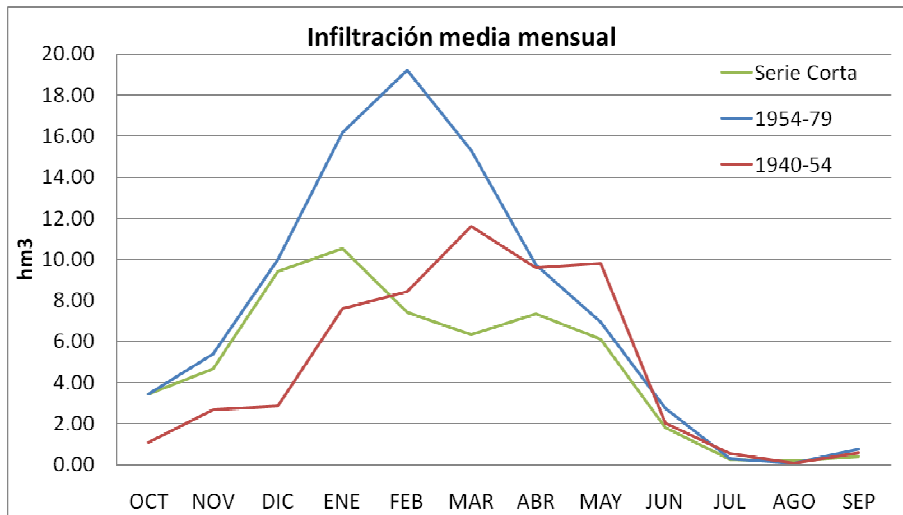


Figura 88: Promedio mensual de infiltración para los periodos 1940-1954, 1954-1980 y 1980-2006.

Análisis Espacial

Como se vio en los apartados anteriores, la serie de infiltración ha ido variando en el tiempo según acontecían periodos más húmedos o secos. La principal implicación de lo anterior desde el punto de vista de la planificación hidrológica reside en la considerable modificación del recurso disponible según se utilicen los valores de la serie larga o la serie corta.

Al igual que existe variación en el tiempo también existe en el espacio, de modo que la disminución no sucede igual en todas las zonas de la cuenca.

Para profundizar en esta cuestión se llevará a cabo un análisis espacial de la infiltración agrupando las MAS según su ubicación. Se seleccionaron 4 grupos (Figura 89); el primero, denominado **Este**, está compuesto por las MAS Aranda de Duero, Cuenca de Almazán, Riaza, Ayllón y Sepúlveda; el segundo (Centro) incluye las MAS de Los Arenales, Tierra del Vino, Medina del Campo, Tordesillas y Villafáfila; el tercer grupo (**Noreste**) se compone de las MAS Valdeavia, Carrión, Villadiego, Castrójeriz y Burgos; y el último, **Suroeste** compuesto por la MAS Salamanca.

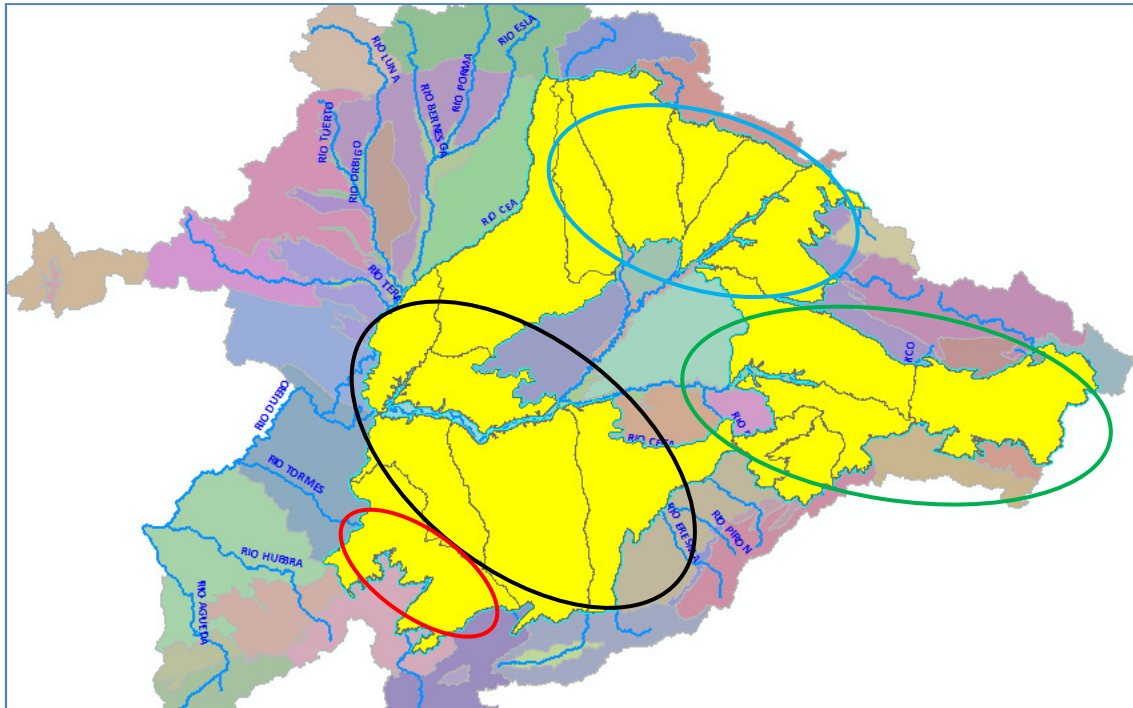


Figura 89: Zonas seleccionadas sobre la zona de estudio para el análisis espacial de la infiltración.

Se compara la infiltración en los diferentes grupos en los periodos correspondientes a la serie larga, serie corta, y el periodo 1940-1980. Se dispone de los datos de aportación en mm, y se ha calculado el total en hm³.

	NO	C	E	NE	Completo
Infiltración total (hm³)					
Serie larga	84.1	210.6	355.0	405.8	1101.9
Serie corta	54.6	163.9	291.3	366.0	919.5
Serie 1940-80	104.0	237.9	398.0	432.7	1213.1
Infiltración (mm)					
<i>Superficie (km²)</i>	2436	9805	6876	7289	29759
Serie larga	34.5	86.4	145.7	166.6	479.6
Serie corta	22.4	67.3	119.6	150.2	400.1
Serie 1940-80	42.7	97.7	163.4	177.6	533.2
% reducción					
Comparación Serie corta - Serie larga	65%	78%	82%	90%	83%
Comparación periodo 40/80 - Serie corta	52%	69%	73%	85%	76%

Tabla 5: Promedio de infiltración anual para los diferentes grupos en los periodos correspondientes a la serie larga, serie corta, y el periodo 1940-1980.

La Tabla 5 muestra los resultados del análisis, y la Figura 90 la representación de los mismos.

Se puede apreciar como las menores diferencias se dan en la zona NE (17 % de reducción entre las series larga y corta), seguida de las zonas E, C y NO. En esta última se aprecian las diferencias de hasta un 35 % entre las series larga y corta, y de casi un 50 % entre la infiltración durante periodos inicial y actual.

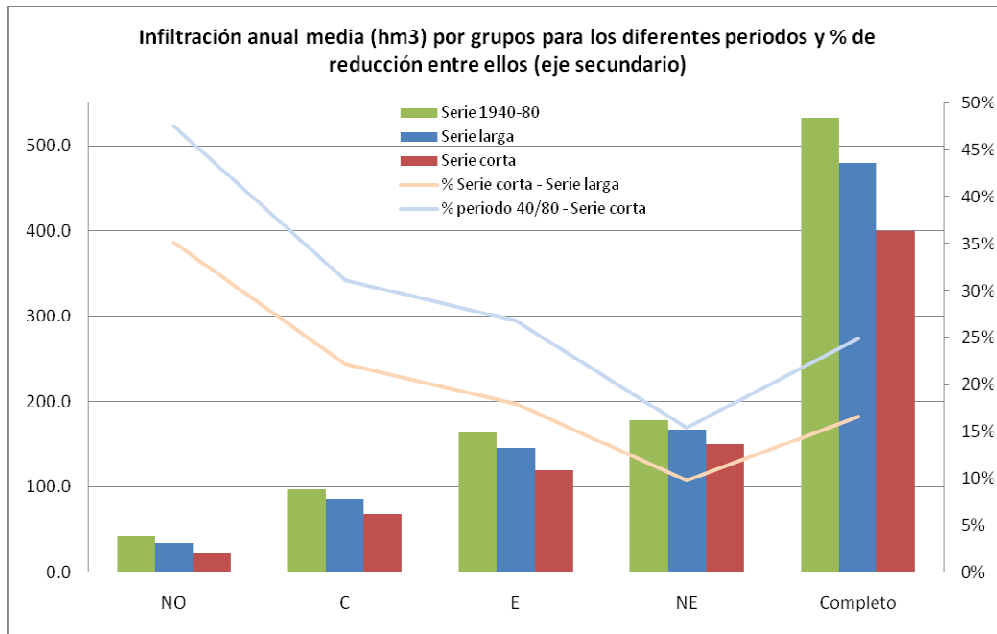


Figura 90: Infiltración anual media (hm³) por grupos para los diferentes periodos y % de reducción entre ellos (eje secundario)

Comparando los valores de infiltración de la superficie completa se observa una disminución del 17 % de la infiltración calculada con la serie corta con respecto a la serie larga. Además, el periodo posterior a 1980 tiene una infiltración media anual un 24 % inferior a la misma calculada con la serie 1940-1980.

3.3.4. El modelo SIMPA

Descripción

El modelo de simulación de aportaciones mensuales SIMPA es un modelo de precipitación-escorrentía que reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico. Es un modelo hidrológico conceptual y cuasidistribuido que permite obtener, entre otras variables, los caudales medios mensuales en régimen natural en puntos de la red hidrográfica de una cuenca (Anexo 2, Memoria del Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero, 2009).

En el modelo se discretiza el territorio en celdas de 1000 por 1000 m. En cada una de las celdas se plantea el principio de continuidad y leyes de reparto y transferencia entre los distintos almacenamientos. La resolución temporal con que se trabaja es mensual.

Las variables del ciclo hidrológico se dividen en dos fases, la fase atmosférica y la terrestre. Las variables de la fase atmosférica son la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial, y las de la fase terrestre la recarga al acuífero, la evapotranspiración real y las escorrentías superficial, subterránea y total.

El modelo SIMPA utiliza capas ráster, de las cuales la precipitación y evapotranspiración potencial (obtenida a partir de la temperatura) son capas dato, y la evapotranspiración real, infiltración, escorrentía subterránea, escorrentía superficial y escorrentía total son capas resultado. También se utilizan otras variables que permiten simular la recarga y descarga de las MAS.

La Figura 91 muestra un esquema con el funcionamiento del modelo SIMPA.

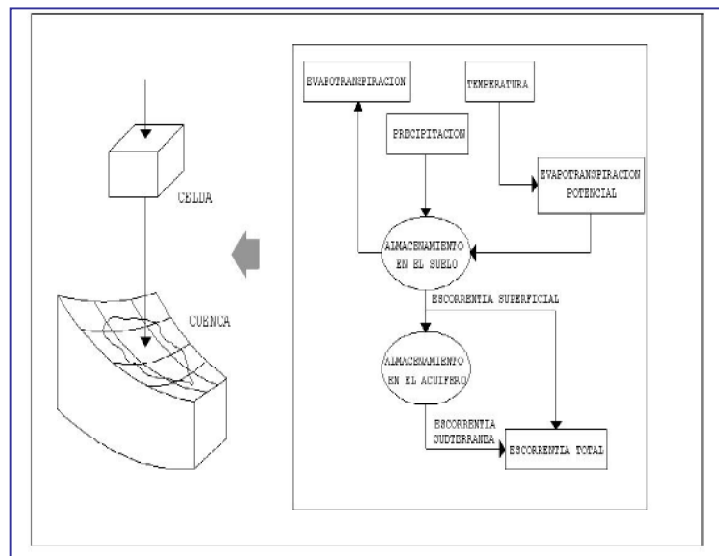


Figura 91: Esquema de trabajo del modelo SIMPA desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos

Los resultados de SIMPA son valores en mm, utilizando la superficie y los coeficientes correspondientes se obtienen los resultados en hm^3/mes .

La serie de aportaciones naturales (superficial, subterránea y total) para cada MAS se obtiene acumulando la escorrentía total de cada una de las celdas contenidas en la subcuenca correspondiente. Los resultados se presentan diferenciados en la serie larga (1940/41-2005/06) y la serie corta (1980/81-2005/06).

En trabajos posteriores de la OPH sobre aquellos puntos de la red hidrográfica de la cuenca donde se dispone de series mensuales en régimen natural o asimilables al régimen natural se han contrastado los resultados de SIMPA para analizar el ajuste los resultados del modelo. En la Figura 92 se muestra un ejemplo, extraído de la Memoria del PHC, correspondiente a la estación de aforos 2085 sobre el río Tormes.

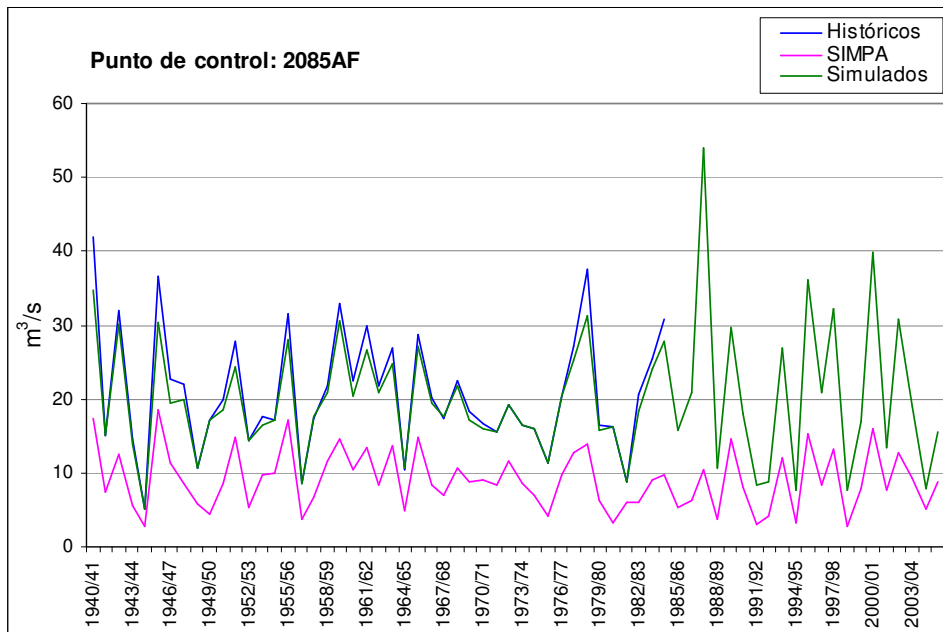


Figura 92: Comparación entre las series de caudal histórico, simulado y proporcionado por el modelo SIMPA en el punto correspondiente a la estación de aforos 2085 del río Tormes.

En dicho ejemplo se aprecian diferencias considerables entre ambas series, algo que se repite en algunas subcuencas. La solución adoptada consistió en sustituir las series de escorrentía total de SIMPA por series corregidas, ajustadas o asimilables al régimen natural procedentes de datos reales de las estaciones de aforo o entradas a embalse. Se sustituyeron un total de 284 subcuencas.

Limitaciones

Uno de los aspectos a considerar que se destaca en la Memoria del PHC con respecto al modelo SIMPA es que no considera el valor límite de reservas, por lo que siempre que puede valora la infiltración sin rechazarla, de ahí que en dicha memoria se haya calculado la recarga rechazada a partir de una estimación de las reservas de almacenamiento de las MAS. El documento también expone que el modelo no incluye algunos mecanismos que intervienen en el ciclo hidrológico y que, en algunas zonas pueden llegar a ser significativos, haciendo referencia a procesos como la precipitación horizontal (nieblas, rocíos, escarchas...) o las transferencias laterales subterráneas entre las celdas de la modelización.

No obstante, el principal inconveniente encontrado en el planteamiento del modelo SIMPA hace referencia a las limitaciones que ofrece el modelo a la circulación de flujo a escala regional.

Con el modelo SIMPA, tras aplicar el balance sobre una celda se obtiene un valor de infiltración (a partir de la precipitación, salidas=ET), el cual tiene como destino la celda inmediatamente inferior. Dicha celda, que se comporta como un embalse unicelular, produce una descarga que se reparte a las celdas superiores en contacto. Posteriormente, tras obtener la aportación total en el punto de desagüe de una determinada MAS, este total se divide en la componente superficial y la subterránea conocidos los datos de infiltración.

Según este planteamiento, lo que entra dentro de una MAS sale dentro de la misma, y eso no tiene porqué ser real.

En la cuenca del Duero el esquema general de flujo consiste, en líneas generales, en la recarga de los acuíferos en las zonas exteriores (donde se ubican las cabeceras de los ríos), y su descarga en los tramos finales de los ríos (del río Duero principalmente, ver Figura 93). En una MAS situada en la cabecera de este sistema, si se considera que todo lo infiltrado sale por el punto de desagüe de dicha MAS, es muy probable que se esté sobreestimando la infiltración e infravalorando la aportación superficial. En una MAS ubicada en las zonas bajas donde predomina la descarga cabría esperar lo contrario, el caudal en el punto de desagüe tendrá una fuerte componente subterránea procedente de otras MAS (término "I₁₋₂" ver Figura 93), por lo que al infravalorarlo estás sobreestimando la componente superficial.

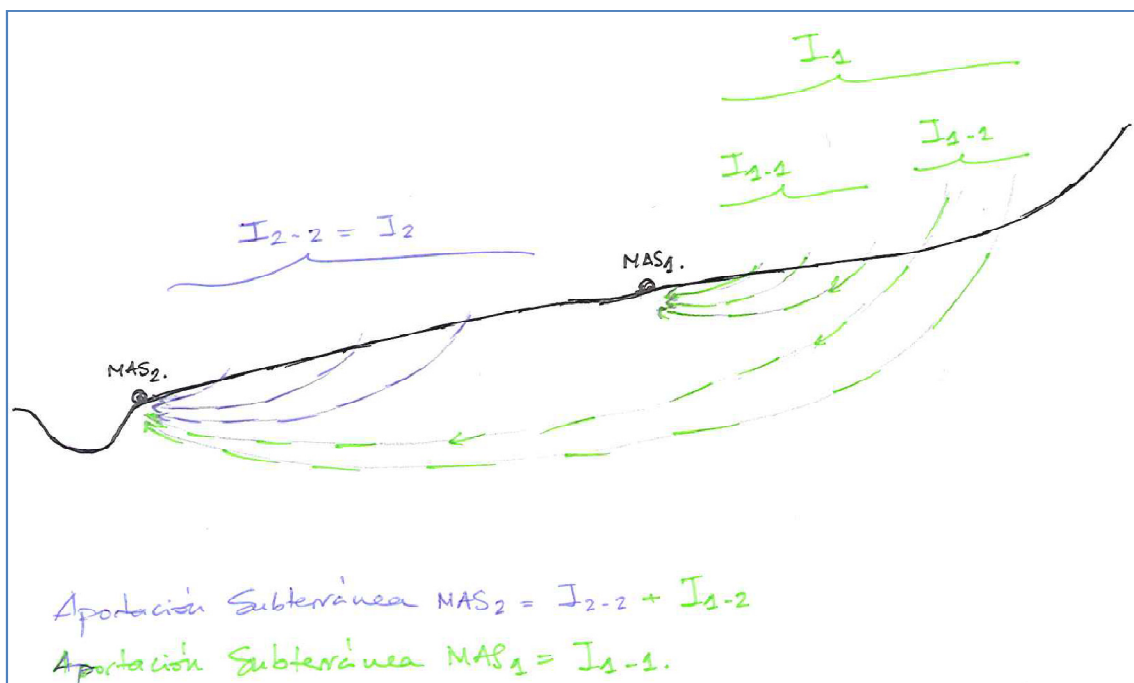


Figura 93: Esquema explicativo de las limitaciones del modelo SIMPA en la consideración del flujo regional.

Según lo comentado anteriormente, el verdadero error que comete SIMPA está relacionado con la división de la aportación total en superficial y subterránea. Así pues, tanto los valores de aportación total, como la variabilidad de los mismos en el tiempo no tienen porqué ser incorrectos, y su fiabilidad deberá contrastarse en función de los datos disponibles y los parámetros utilizados para realizar la distribución del agua en los diferentes compartimentos.

La calibración de los resultados del modelo con las series de aforos puede ser útil para el caso de la aportación total, pero no es capaz de corregir los errores en la repartición de la aportación en superficial y subterránea por el propio planteamiento del modelo.

3.4. Extracciones

3.4.1. Introducción

En este apartado se dispone a estudiar las extracciones que acontecen en la cuenca del Duero. La finalidad es profundizar en el conocimiento de las extracciones que afectan directamente al acuífero terciario, diferenciándolas en superficiales y profundas según se den a profundidad menor o mayor de 200 metros. Además, en base a los datos disponibles y a los trabajos antecedentes, se pretende estimar una posible evolución de las mismas desde condiciones no alteradas hasta la actualidad.

El análisis comienza con una revisión de la información disponible, seguido de una descripción de la situación actual de los usos y demandas de la cuenca del Duero. Posteriormente se aplican los análisis anteriores sobre la zona seleccionada para la realización del balance y se realiza una estimación de la evolución de la demanda en dicha zona.

Finalmente se comentan los inconvenientes asociados al estudio de las extracciones, principalmente debido a la incertidumbre asociada a la información disponible.

3.4.2. Datos disponibles

A fecha de Noviembre de 2009, la OPH de la CHD tiene documentadas un total de 66.729 captaciones (entre pozos y sondeos) para la extracción directa del recurso subterráneo. La estimación de las cifras indicadas se ha realizado a partir de los datos de la CHD del Duero y el MARM en el marco del programa Alberca⁶. Las cifras de volúmenes de agua se refieren a derechos otorgados y no a extracción medida, ya que no se dispone de información directa sobre los volúmenes extraídos.

La mayoría de la información de que se dispone es a través de fuentes indirectas, como concesiones de riego, censos agrarios, estimaciones de superficie cultivada, inventarios de superficie regada, datos de fotointerpretación de imágenes de satélite, u otros trabajos...

⁶ El Proyecto Alberca consiste en la informatización de los datos existentes relativos a los aprovechamientos del agua ya concedidos, para poder transcribirlos en un Registro de Aguas debidamente actualizado.

(<http://www.chduero.es/Inicio/RegistrodeaguasALBERCA/Qu%C3%A9esALBERCA/tabid/155/Default.aspx>)

Se trabaja con superficies de cultivo estimadas a las que se asigna una dotación para el cálculo del volumen total de agua. El cálculo de ésta dotación es también una estimación en función a los requerimientos hídricos de cada especie de cultivo y las superficies de los mismos.

Dentro de las fuentes de información indirecta cabe destacar por su amplia utilización las "Hojas 1T", con información de estadística agraria cumplimentada de forma homogénea y sistemática desde el año 1978 por el Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino (MARM). En ellas se registran las superficies de cultivo de secano y regadío por municipios.

Aparte de información indirecta para la estimación de suministros, la CHD dispone de información de derechos de agua. Los registros de derechos de aguas en la CHD se diferencian en concesiones de sección, inscripciones por disposición legal, antiguos aprovechamientos inscritos en el Registro de Aguas Públicas, pozos (de captación o de aprovechamientos temporales de aguas), y por último el resto de derechos que no están incluidos en ninguna de las categorías anteriores por falta de datos.

3.4.3. Situación actual: CHD 2009

A continuación se expone la situación actual a fecha de Diciembre de 2009 por medio de una síntesis del análisis de usos y demandas de agua extraído de la Memoria del Plan Hidrológico de la parte española de la CHD.

Se comentará el proceso de obtención de los datos de dichas demandas dividido según el usos de agua.

Uso Doméstico

Para la caracterización de los abastecimientos se han formado unidades de demanda urbana, UDU, definidas como la agrupación de varios núcleos de población que comparten el mismo origen del suministro.

Datos

Los datos de población se estiman, a escala municipal, a partir de los datos históricos de los censos de población y viviendas por municipio.

Para la estimación de demandas y dotaciones se dispone de datos de encuestas (Encuesta de Servicios Urbanos, ESU) enviadas por la CHD a los Ayuntamientos. Además, se dispone de información adicional del sistema Alberca y otros datos de la Comisaría de Aguas de la

CHD. La información del sistema Alberca comprende la ubicación geográfica de las captaciones, el uso al que se destina y datos sobre volúmenes. Los datos de Comisaría de Aguas de la CHD contienen el caudal anual concedido en l/s para la Mancomunidad o el Ayuntamiento.

En definitiva, considerando estas tres fuentes de información, se dispone de datos reales de suministro de 988 municipios, que supone un 51% de los mismos y un 87% de la población total de la demarcación.

El cruce de las estimaciones de población con los datos de agua de uso urbano proporcionados por la encuesta, Alberca y Comisaría, permite determinar las dotaciones para todos los municipios con datos disponibles.

La demanda total de agua para abastecimiento de poblaciones se estima en 329 hm³ anuales, con una dotación de agua promedio en el ámbito de 402 litros diarios por habitante permanente, y 363 litros por habitante equivalente.

Resultados

Se presentan los resultados según dos orígenes distintos para las demandas urbanas: superficial y subterránea, cuando el abastecimiento se realiza mediante pozos.

La distribución por origen se ha hecho a partir de un inventario de captaciones superficiales de la Junta de Castilla y León, del estudio de Refuerzo del Sistema de Indicadores del Plan Especial de Sequías y del inventario de captaciones subterráneas del sistema Alberca.

Los resultados de estas estimaciones arrojan unos valores estimados de demanda y dotación por origen y sistema que se detallan en la siguiente tabla⁷.

⁷ En letra negrita y color negro se señalan las extracciones que ocurren dentro de la zona de estudio y, como se verá en el apartado siguiente, se consideran en la realización del balance. En total, en torno a 43.7 hm³ correspondientes al uso doméstico.

Sistema de explotación	Origen superficial	Origen subterráneo	Demanda total	Dotación (l/hab/d)	Dotación (l/heq/d)
TÁMEGA-	1,68	1,35	3,03	264,23	243,10
TERA	0,64	2,63	3,27	386,50	288,09
ÓRBIGO	18,38	0,56	18,94	348,57	317,11
ESLA	20,06	18,66	38,72	391,09	357,63
CARRIÓN	55,54	0,00	55,54	448,77	439,98
PISUERGA	5,78	3,92	9,69	436,00	344,16
ARLANZA	30,54	3,41	33,95	426,84	397,71
ALTO DUERO	17,11	7,32	24,43	559,85	443,59
RIAZA-DURATÓN	33,22	2,98	36,20	478,50	378,88
CEGA-ERESMA-	34,89	7,18	42,07	425,49	371,21
BAJO DUERO	4,92	13,57	18,49	289,61	260,50
TORMES	33,52	5,27	38,79	367,03	335,07
ÁGUEDA	3,27	2,43	5,71	299,30	244,32
TOTAL	259,57	69,28	328,85	408,33	367,70

Tabla 6: Demanda de agua suministrada de uso doméstico en los sistemas de explotación dividida según su origen. Fuente: CHD.

En términos generales, la demanda de agua para uso urbano sigue una distribución similar a la población concentrándose en los sistemas Carrión, Cega-Eresma-Adaja, Tormes, Esla, Riaza-Duratón y Arlanza. El volumen de agua superficial demandada representa el 80% del volumen total para uso urbano, no obstante, el 66% de los núcleos de población de la demarcación se abastecen de agua subterránea.

Demanda agropecuaria

La caracterización de la demanda agrícola se hace en base a unidades de demanda agraria (en adelante UDA). Se entiende por UDA una zona de regadío que comparte características comunes: ubicación geográfica, comunidades de regantes que la componen, el origen del agua y masa de la que capta el agua.

Datos

La superficie asignada a cada regadío se ha obtenido de diversas fuentes de información:

- Estudio de caracterización y tipificación de los regadíos existentes en la Comunidad Autónoma de Castilla y León para el Plan Nacional de Regadíos (PNR) (1997)
- Datos de Dirección Técnica y de Comisaría de Aguas de la CHD (2007 – 2008)
- Sistema Alberca (2008)
- Información facilitada por la J C y L (2009)
- Encuesta a las Comunidades de Regantes (2007)
- Superficie digitalizada
- Otros estudios específicos de zonas concretas⁸.

Para llevar a cabo la estimación de la demanda agrícola inicialmente se calcula la dotación neta a partir de las necesidades de los cultivos y de la distribución de los mismos en función de la comarca agraria. Luego se procede al cálculo de la eficiencia global calculada como el producto de las eficiencias de transporte, distribución y aplicación. Por último se ha calculado la demanda bruta como el producto de la dotación neta por la superficie asignada y la eficiencia global.

La distribución de los cultivos se ha obtenido de las Hojas 1T del Ministerio de Agricultura del año 2004, calculando el porcentaje de superficie de los cultivos considerados a nivel de municipio y asignando a cada UDA de forma proporcional. En base a esta información se obtiene una superficie total de riego en la situación actual de 551.197 ha.

Las dotaciones netas para cada comarca agraria se han obtenido combinando la información de la distribución de cultivos y las necesidades de agua de cada cultivo, estimadas a partir de los datos facilitados por la Junta de Castilla y León en su página web de “InfoRiego” y a partir de datos del Ministerio de Medio Ambiente (de InfoRiego se ha extraído también la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada según el método de Penman-Monteith).

La dotación neta media del ámbito de la CHD, para 2004, con los cultivos y superficies existentes ese año, se sitúa en $3.863 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$. En base a esta información se obtiene una demanda neta total en la CHD de $2.129 \text{ hm}^3/\text{año}$.

⁸Estudio de alternativas para la prevención y gestión fluvial de la cuenca del río Eria (León y Zamora). Análisis de viabilidad de la modernización de regadíos existentes (EPTISA 2007).

De la demanda neta destaca el consumo de la UDA 2000181 Bombeo Acuífero Profundo Arenales Adaja-Zapardiel, de origen subterráneo, con más de 130 hm³ de demanda neta, y las UDA 2000019 ZR PÁRAMO BAJO y 2000015 ZR PÁRAMO Y PÁRAMO MEDIO, superficiales, con más de 100 hm³.

Partiendo de la superficie asignada, la dotación neta y la eficiencia global (la eficiencia media de riego en la CHD es del 57%) se obtiene el volumen demandado y la dotación bruta por unidad de demanda.

Demanda ganadera

La demanda ganadera se ha estimado a partir del número de unidades ganaderas (UG) que se obtiene del Censo Agrario del INE de 1999, por término municipal. La demanda total ganadera se estima en 25 hm³.

Resultados

Demanda agrícola bruta por origen de los recursos

En la DHD la mayor parte del recurso procede de aguas superficiales, concretamente el 76%, mientras que el 24% es de origen subterráneo.

El volumen de agua demandado superficial es de 3.040 hm³. Las UDA de origen subterráneo que demandan un volumen de 965 hm³ se han definido a partir de las captaciones y parcelas del sistema Alberca en función de la masa de agua subterráneo, del acuífero y del sistema de explotación en las que están ubicadas las captaciones

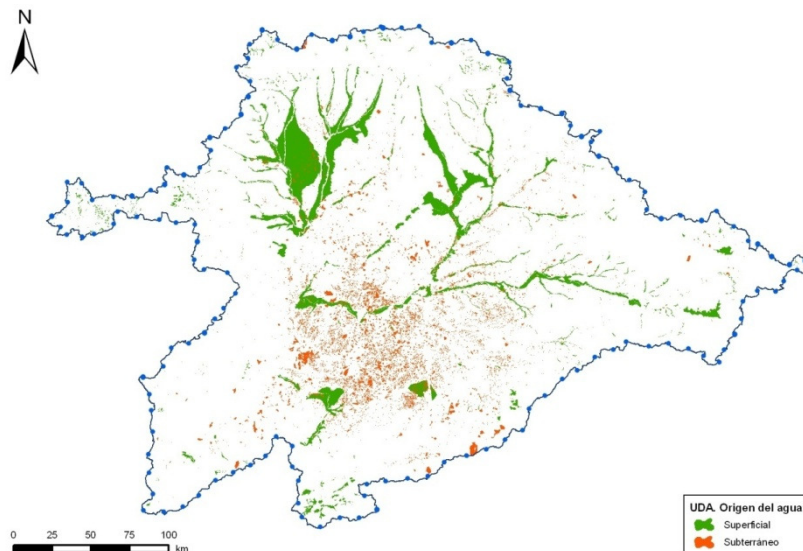


Figura 94: Unidades de Demanda Agraria (UDA), según el origen del agua. Fuente: CHD.

Demanda agrícola por sistema de explotación

En la tabla siguiente se muestran los valores de la demanda agrupados por sistema de explotación en función del origen del agua:

Sistema de explotación	Demanda superficial	Demanda subterráneo	Demanda total
TÁMEGA-	19,48	0,20	19,68
TERA	135,25	1,77	137,02
ÓRBIGO	595,91	10,37	606,28
ESLA	775,43	63,04	838,46
CARRIÓN	373,09	45,24	418,34
PISUERGA	261,19	43,59	304,78
ARLANZA	59,26	17,68	76,94
ALTO DUERO	190,36	11,10	201,46
RIAZA-DURATÓN	157,02	40,80	197,81
CEGA-ERESMA-	40,13	161,05	201,18
BAJO DUERO	183,11	454,59	637,70
TORMES	233,04	94,97	328,01
ÁGUEDA	16,99	20,92	37,91
TOTAL	3.041	965	4.006

Tabla 7: Origen de los recursos por sistema de explotación para el uso agropecuario. Fuente CHD.

El volumen demandado más importante procede del sistema Esla (más del 21% del total de la demarcación con 838 hm³), seguido del Bajo Duero (16% y 638 hm³) y del Órbigo (15% y 606 hm³).

Uso industrial

Los usos industriales comprenden los subsectores de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE). La demanda de agua para uso industrial se corresponde con la industria que no está conectada a la red urbana o con un polígono industrial que vierte al medio sin utilizar el colector urbano. Para caracterizar esta demanda se han formado unidades de demanda industrial (UDI), constituidas por una agrupación de industrias.

Datos

Para la caracterización de la demanda de cada uno de los subsectores se ha partido del Inventario de vertidos autorizados de Comisaría de Aguas de la CHD (año 2008). En base a los datos de partida manejados se ha calculado la demanda correspondiente a partir del volumen de vertido, considerando que el vertido (retorno) es el 80% del agua utilizada. La demanda de agua total para uso industrial se estima en 46 hm³.

Resultados

La tabla siguiente muestra la estimación de demanda industrial agregada por sistema de explotación.

SISTEMA	DE	VOLUMEN	DE
TÁMEGA-MANZANAS		0.08	
TERA		0.01	
ÓRBIGO		1.92	
ESLA		11.38	
CARRIÓN		2.62	
PISUERGA		11.33	
ARLANZA		0.21	
ALTO DUERO		2.68	
RIAZA-DURATÓN		3.96	
CEGA-ERESMA-ADAIA		4.65	
BAIO DUERO		3.11	
TORMES		3.36	
ÁGUEDA		0.88	
TOTAL		46.18	

Tabla 8: Distribución de la demanda industrial.

Los sistemas de explotación del Esla y Pisuerga son los mayores consumidores, con un volumen demandado de 11 hm³/año, lo cual representa un 25 % de la demanda global. Le sigue el Cega-Eresma-Adaja y el Rianza-Duratón que demandan 10 y 9 hm³/año respectivamente.

Resumen de demandas

En la tabla siguiente se muestra el volumen y el porcentaje que representan los diferentes tipos de demanda por sistema de explotación.

Sistema de explotación	Demandas									
	Urbana		Agropecuaria (*)		Industrial		Recreativa		Total	
	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%
TÁMEGA-MANZANAS	3,03	0,9%	19,90	0,4%	0,08	0,2%	0	0,0%	23,01	0,5%
TERA	3,27	1,0%	148,42	3,3%	0,01	0,0%	0	0,0%	151,70	3,1%
ÓRBIGO	18,94	5,8%	630,45	14,0%	1,92	4,2%	0	0,0%	651,31	13,3%
ESLA	38,72	11,8%	870,43	19,3%	11,38	24,6%	0,85	10,7%	921,38	18,9%
CARRIÓN	55,54	16,9%	427,15	9,5%	2,62	5,7%	0,28	3,5%	485,59	9,9%
PISUERGA	9,69	2,9%	339,36	7,5%	11,33	24,5%	1,31	16,5%	361,69	7,4%
ARLANZA	33,95	10,3%	81,60	1,8%	0,21	0,5%	1,6	20,2%	117,36	2,4%
ALTO DUERO	24,43	7,4%	217,84	4,8%	2,68	5,8%	0,82	10,4%	245,77	5,0%
RIAZA-DURATÓN	36,20	11,0%	249,69	5,5%	3,96	8,6%	0,18	2,3%	290,03	5,9%
CEGA-ERESMA-ADAJA	42,07	12,8%	205,61	4,6%	4,65	10,1%	1,33	16,8%	253,66	5,2%
BAJO DUERO	18,49	5,6%	639,85	14,2%	3,11	6,7%	0,17	2,1%	661,62	13,5%
TORMES	38,79	11,8%	628,11	14,0%	3,36	7,3%	1,39	17,6%	671,65	13,8%
ÁGUEDA	5,71	1,7%	42,27	0,9%	0,88	1,9%	0	0,0%	48,86	1,0%
TOTAL	329	100,0%	4.501	100,0%	46	100,0%	8	100,0%	4.884	100,0%

(*) Incluye demanda agrícola, ganadera y la procedente de la acuicultura

Figura 95: Demanda actual total por sistema de explotación.

La demanda total consuntiva de la CHD es de unos 4.884 hm³/año, siendo la demanda principal la agropecuaria, con unos 4.500 hm³/año, un 92% de la total. La demanda urbana representa un 7%, casi 330 hm³/año, la demanda industrial con 46 hm³/año supone el 1% de la demanda total y por último la demanda recreativa con 8 hm³/año (0,2%).

El sistema de explotación con mayor demanda es el Esla con un 19% respecto al total de la CHD, seguido de los sistemas Tormes y Bajo Duero, con un 14% y del Órbigo, con un 13%. Respecto a los diferentes tipos de demandas, el uso agropecuario es el principal destino, y en concreto el uso agrícola, en todos los sistemas de explotación, seguido del urbano.

En la tabla siguiente se agrupan la demanda por sistemas de explotación en función al origen:

Sistema de explotación	Superficial		Subterráneo		Reutilización		Total	
	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%
TÁMEGA-MANZANAS	21,24	0,6%	1,77	0,2%	0,00	0,0%	23,01	0,5%
TERA	146,93	3,8%	4,77	0,4%	0,00	0,0%	151,70	3,1%
ÓRBIGO	639,19	16,7%	12,12	1,1%	0,00	0,0%	651,31	13,3%
ESLA	836,12	21,9%	85,27	8,0%	0,00	0,0%	921,39	18,9%
CARRIÓN	438,77	11,5%	46,81	4,4%	0,00	0,0%	485,58	9,9%
PISUERGA	312,24	8,2%	49,46	4,6%	0,00	0,0%	361,70	7,4%
ARLANZA	93,63	2,5%	23,73	2,2%	0,00	0,0%	117,36	2,4%
ALTO DUERO	225,92	5,9%	19,85	1,9%	0,00	0,0%	245,77	5,0%
RIAZA-DURATÓN	245,10	6,4%	44,94	4,2%	0,00	0,0%	290,04	5,9%
CEGA-ERESMA-ADAJA	79,67	2,1%	173,95	16,3%	0,04	100,0%	253,66	5,2%
BAJO DUERO	191,23	5,0%	470,39	44,2%	0,00	0,0%	661,62	13,5%
TORMES	566,77	14,8%	104,88	9,8%	0,00	0,0%	671,65	13,8%
ÁGUEDA	21,61	0,6%	27,24	2,6%	0,00	0,0%	48,85	1,0%
TOTAL	3.818	100,0%	1.065	100,0%	0,04	100,0%	4.884	100,0%

Tabla 9: Resumen de demandas por origen y sistema de explotación.

En valores medios, el 78% del volumen demandado total de la CHD se satisface con agua superficial. En algunos sistemas supera incluso el 90% del total, como en los sistemas Órbigo, Tera, Táme-ga-Manzanas, Alto Duero, Esla y Carrión.

Las aguas subterráneas, por su parte, satisfacen un 22% de la demanda de la CHD, siendo más importante en los sistemas Bajo Duero (con un 71%) y el Cega-Eresma-Adaja (69%).

Respecto a los recursos no convencionales el volumen abastecido con aguas reutilizadas apenas llega al 0,05%.

Recopilando los datos de la componente subterránea de las tablas anteriores, en cifras globales, puede considerarse que la extracción de agua subterránea en la cuenca española del Duero se puede aproximar a los 1.000 hm³/año, dividiéndose en función al uso del siguiente modo (Tabla 8):

Destino	Extracción (hm³/año)
Abastecimiento	69
Industria	20
Agricultura y ganadería	965
Total	1.054

Tabla 10: Extracciones de agua subterránea.

3.4.4. Extracciones sobre la zona de balance

De cara a la realización del balance, tal y como se ha estado considerando en los apartados anteriores, no todas las MAS serán consideradas ya que por sus propias características se las puede considerar independientes del acuífero terciario. Esta asunción implica que cualquier acción sobre estas MAS (recarga, transferencia, bombeos...) no modifica en ningún caso el estado del acuífero terciario.

En la tabla siguiente se muestran los bombeos en la cuenca del Duero seleccionados por UDA's. En color naranja se seleccionan aquellos que no se consideran para el balance, ya sea porque quedan fuera del ámbito de estudio o porque no tengan influencia sobre el acuífero.

UDA	NOMBREUDA	Suma de ANUAL
1501	Bombeo MAS 1+2 (Guardo-La Pola)	4.4
1502	Bombeo MAS 5+8+11+12+15+19 (Esla-Órbigo)	23.7
1503	Bombeo MAS 7+9 (Cea-Valderaduey)	56.7
1504	Bombeo MAS 24 (Valle del Tera)	2.0
1505	Bombeo MAS 31 (Villafáfila)	14.7
1901	Bombeo acuífugo Támeaga-Manzanas	0.2
1902	Bombeo acuífugo Tera	0.3
1903	Bombeo acuífugo Órbigo	0.6
1904	Bombeo acuífugo Esla	2.1
2501	Bombeo MAS 6+10+14 (Detrítico Carrión-Pisuerga)	12.7
2502	Bombeo MAS 16+17 (Arlanza-Arlanzón)	10.1
2503	Bombeo MAS 25 (Páramo de Astudillo)	2.4
2504	Bombeo MAS 32 (Páramo de Torozos)	24.9
2505	Bombeo MAS 29 (Páramo de Esgueva)	16.1
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
2509	Bombeo MAS 3 (Cervera-Pisuerga)	1.0
2510	Bombeo MAS 4/09.03 Alto Pisuerga	2.0
2511	Bombeo MAS 4/09.04 Alto Arlanzón	0.3
2512	Bombeo MAS 18 (Arlanzón-Río Lobos)	2.2
2907	Bombeo acuífugo Arlanza	0.1
3501	Bombeo MAS 30 (Aranda de Duero)	3.2
3502	Bombeo MAS 42+49 (Riaza-Ayllón)	2.1
3503	Bombeo MAS 35 (Cabrejas-Soria)	0.8
3504	Bombeo MAS 34 (Araviana)	0.0
3505	Bombeo MAS 50 (Almazán Sur)	0.0
3506	Bombeo MAS 18 (Arandilla-Río Lobos)	0.1
3507	Bombeo MAS 37+51 (Almazán-Escalote)	2.1
3508	Bombeo Acuífero Profundo Aranda de Duero	4.1
3509	Bombeo Acuífero Profundo Corcos-Riaza	2.3
3510	Bombeo MAS 44 (Páramo de Corcos)	2.0
3908	Bombeo acuífugo Alto Duero	0.5
3909	Bombeo acuífugo Riaza-Duratón	0.0
4501	Bombeo MAS 43 (Páramo de Cuéllar)	24.0

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
4506	Bombeo MAS 55 (Cantimpalos)	31.9
4507	Bombeo MAS 64 (Valle Amblés)	5.1
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
4910	Bombeo acuífugo Cega-Eresma-Adaja	18.9
4911	Bombeo acuífugo Bajo Duero	2.3
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
5504	Bombeo MAS 59 (San Esteban)	9.3
5505	Bombeo MAS 63 (Ciudad Rodrigo)	0.4
5506	Bombeo MAS 66 (Valle del Corneja)	0.1
5912	Bombeo acuífugo Tormes	4.5
5913	Bombeo acuífugo Águeda	11.3
	Total	965.3
	Dentro de la zona de estudio	743.8
	Fuera de la zona de estudio	221.5

Tabla 11: Extracciones pertenecientes al uso agropecuario (92 % del total) en la cuenca del Duero, diferenciado según UDA's.

Del total de 965 hm³, 744 hm³ (77 %) tienen lugar directamente sobre los materiales del acuífero terciario, 426 hm³ de los cuales son bombeos profundos (60% del bombeo sobre el acuífero).

No obstante, nótese que en el conjunto compuesto por las MAS 52, 45, 47, 48, 38 y 67, correspondientes la zona de arenas, el acuífero bajo los páramos y Salamanca, tienen lugar 639 hm³ (el 86 % del total), de los cuales 417 hm³ son profundos (el 98 % de todo el profundo), lo cual aporta una idea de la distribución espacial de los bombeos.

Además de los valores de la Tabla 11 se considerarán también los correspondientes al abastecimiento para uso doméstico (Tabla 6). La diferenciación entre superficial y subterráneo se lleva a cabo de forma aproximada dividiendo la cifra total, 43.7 hm³, según los mismos porcentajes que representan las extracciones para uso agropecuario; aproximadamente 60 % de extracciones profundo y 40 % de superficiales.

En total se extraen en torno a 788 hm³ de los cuales 452 hm³ son profundos y 336 hm³ superficiales.

En la Figura 96 se muestra el mapa de la cuenca dividido por MAS con los diferentes bombeos considerados, correspondientes con la Tabla 11.

3.4.5. Evolución Histórica de las extracciones

En este apartado se va a estimar una posible evolución temporal de las extracciones en el acuífero desde el régimen natural hasta la actualidad.

Para ello se va a hacer uso del trabajo “DGOHCA, 2002”. Dicho estudio propone en su Anexo N°8, Usos del Agua, una evolución teórica de las extracciones en la U.H. Los Arenales⁹ para el periodo 1941-1999, de la cual se obtendrá la tendencia de la serie.

Antes se utilizarán los datos de superficie de cultivo de las MAS Arenales, Tierra del Vino y Medina del Campo para el periodo 1998-2008 procedentes de análisis de fotointerpretación para conocer la variabilidad en esta década. Dicha variabilidad se aplicará sobre el valor inicial de referencia a partir del cual se genera la serie, que es el estimado en el apartado anterior con los datos de la CHD aplicados a la zona de balance.

Metodología

Periodo 1999-2009

Se comienza a trabajar con los valores de bombeo superficial y profundo obtenidos a partir de la Tabla 11 para el año 2009. Para obtener la evolución de los bombeos hasta 1999 se utiliza el gráfico que muestra la Figura 97, en el que se representan los datos de superficie de regadío de las MAS Arenales, Tierra del Vino y Medina del Campo para el periodo 1998-2008 procedentes de análisis de fotointerpretación, proporcionados por la CHD...

⁹ U.H. Los Arenales según nomenclatura antigua, se corresponde con las MAS 45, 47 y 48, Los Arenales, Medina del Campo y Tierra del Vino, respectivamente.

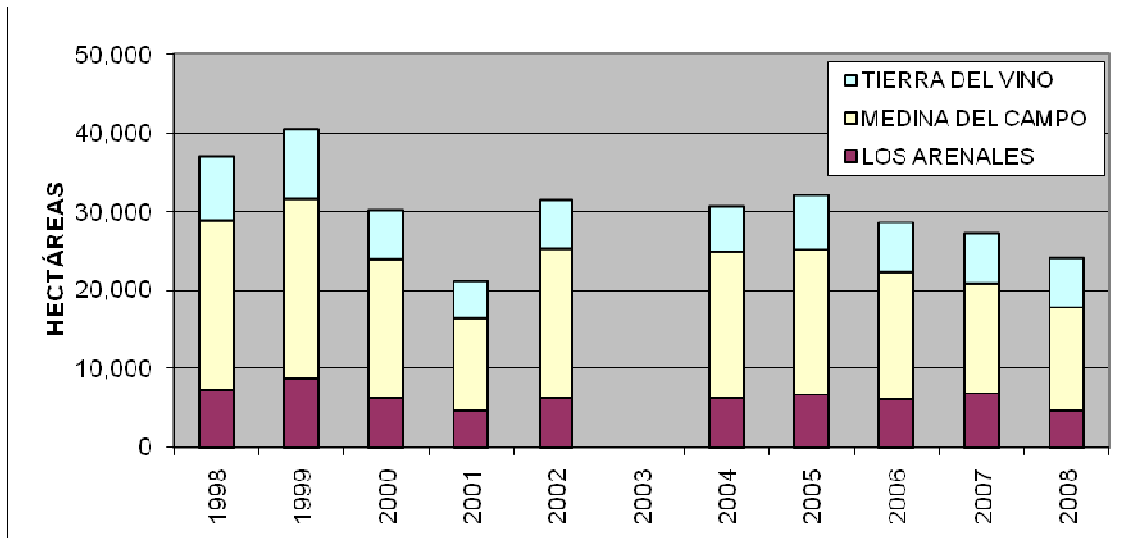


Figura 97: Evolución de la superficie de cultivo en las MAS 45, 47 y 48 según análisis de fotointerpretación. Fuente CHD.

De éste se obtiene la tasa de cambio entre un año y el anterior, empezando en el 2009¹⁰ y terminando en el 1999.

Posteriormente se aplica esa tasa de cambio a los valores de bombeo del año 2009, asumiendo que la variabilidad de las extracciones superficiales y profundas en esta época es la misma.

Periodo 1941-1999

Una vez estimado el dato de bombeo superficial y profundo para el año 1999, se procede del mismo modo para el periodo 1999-1941, en este caso haciendo uso de la evolución de los bombeos en este periodo en la U.H. Arenales, que se encuentra en el estudio "DGOHCA, 2002".

Dicho estudio trabaja con la siguiente información: censos de Población INE (años 1960, 1970, 1981 y 1991), censos agrarios del INE (años 1962, 1972, 1982 y 1989.), estimaciones de la superficie cultivada del Servicio de Estadística y Estudios de la Junta de Castilla y León (Anuarios de Estadística Agraria de los años 1987 al 1999), inventario de superficie regada de la Junta de Castilla y León del año 1988, estudio de "Caracterización de la unidad hidrogeológica Región de Los Arenales" (D.G.O.H. 1993. (Dotaciones)), P.A.C. (Junta de Castilla y León, años 1998 y 1999), imágenes de satélite del MMA (años 1984,

¹⁰ En dato de superficie del año 2009 se obtiene de calcular la expresión correspondiente a la regresión lineal de los tres años anteriores. El dato de 2003 como media del anterior y posterior.

1991 y 1995) y dotaciones de riego en los Planes de regadío de la Cuenca del Duero (CEDEX para la D.G.O.H., año 1992).

Con estos datos calcula la evolución de la superficie regada y los volúmenes extraídos para U.H. Los Arenales, Figura 98:

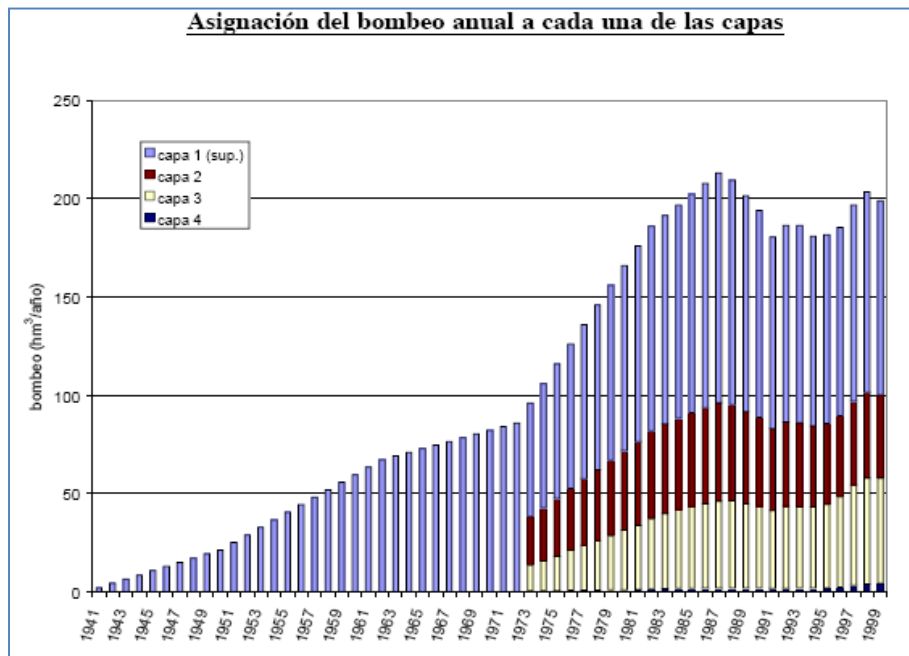


Figura 98: Serie de asignación de bombeo para la U.H. Los Arenales, dividida en capas según profundidad. Fuente “DGOHCA, 2002”.

Considerando el dato de 1999 como el calculado anteriormente con los datos de superficie se procede de igual modo, aplicando en este caso la tasa de cambio de los bombeos en la U.H. Los Arenales.

En el caso de los bombeos superficiales el proceso acaba en el año 1941, donde se considera ausencia de bombeos. Para el caso de los bombeos profundos el proceso se aplica hasta el año 1982, y a partir de ahí se considera que el bombeo decrece linealmente hasta el año 1973, donde se considera que comienzan los bombeos profundos.

En la Figura 98 se observa la asignación de bombeo anual dividida en cuatro capas en profundidad utilizada en el trabajo “DGOHCA, 2002”. En dicho trabajo la capa 1 incluye los bombeos desde la superficie hasta los 50 metros de profundidad, la segunda de 50 a 100 metros, la tercera de 100 a 200 metros y la cuarta todos los bombeos de profundidad superior a 200 metros. De este modo, el bombeo profundo se correspondería con el que se muestra en la capa 4, prácticamente inexistente.

Dados los conocimientos adquiridos en la revisión bibliográfica y los apartados anteriores de este trabajo (piezometría principalmente), no parecen coherentes esos valores de 109

bombeo para el acuífero profundo, por lo que se consideró que la fecha de comienzo del bombeo era 1973, y que ascendía linealmente hasta el año 1982.

Resultado

El resultado final se muestra en la figura siguiente:

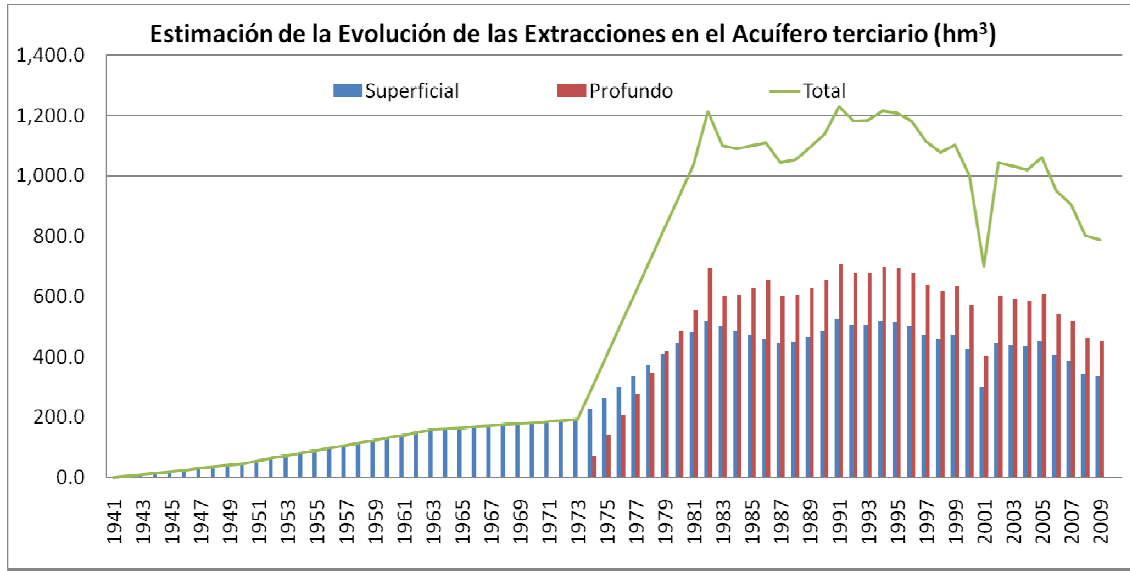


Figura 99: Estimación de la evolución de las extracciones en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.

El gráfico muestra varios puntos de inflexión bruscos que obviamente no se corresponden con el modo en que las extracciones aumentan en realidad, pero en líneas generales la evolución es coherente, ya basándose en mediciones oficiales (indirectas) refleja bastante bien procesos de los que se tiene constancia anteriormente, por ejemplo en la piezometría. Entre estos procesos, por ejemplo, el gran incremento de las extracciones en torno a los años 70, la expansión de las extracciones profundas en torno a esa época, probablemente provocado por la disminución del rendimiento de las extracciones más superficiales, o la disminución de las extracciones de la última década.

3.4.6. Limitaciones

En este apartado se comentan algunos de los principales inconvenientes que se han encontrado al estudiar los bombeos.

a) Profundidad de las extracciones

El primero de ellos hace referencia a la diferenciación de los bombeos en superficiales y profundos.

Si en la memoria del Plan Hidrológico de Cuenca 2009 se utiliza para diferenciar bombeos superficiales y profundos un inventario de captaciones superficiales de la Junta de Castilla y León y el inventario de captaciones subterráneas del sistema Alberca, en el estudio “DGOHCA, 2002” se trabaja con el mismo inventario de la Junta de Castilla y León y otros datos como censos agrarios, datos de P.A.C.... y los resultados son muy diferentes, pues el estudio “DGOHCA, 2002” apenas considera extracciones profundas a fecha 1999. Esto pone de manifiesto la incertidumbre con respecto a la profundidad de las extracciones.

Por otro lado, el modo en que se han ido desarrollando las extracciones profundas parece responder a un aumento en las necesidades de agua conforme la explotación de los pozos más superficiales se incrementaba, por ello los niveles descendían y en consecuencia los rendimientos bajaban o los pozos se secaban directamente, por lo que los pozos se abandonan (en muchos casos sin sellar) o se aumenta la profundidad de los pozos para garantizar los rendimientos. El proceso anterior tiene principalmente dos inconvenientes; el primero es que muchos de los pozos que se han ido profundizando no han sido hechos correctamente, de este modo, un pozo a 250 metros de profundidad que no sea estanco puede estar tomando agua a cualquier profundidad de la columna. Además, un pozo abandonado no sellado supone una vía de comunicación de los estratos por los que atraviesa. El segundo inconveniente es la incertidumbre que genera el desconocimiento de las características de los pozos, la profundidad a la que toman agua, si son estancos o no...

Además, a todo esto se le suma la gran complicación que supone trabajar con una cuenca de las dimensiones de la del Duero, donde además el número de usuarios, muchos de ellos particulares, es tan grande. Como ejemplo de lo anterior se muestra el mapa de la Figura 100, tomado de la Memoria del Plan Hidrológico de la parte española de la CHD, donde se aprecia la distribución de pozos para regadío:

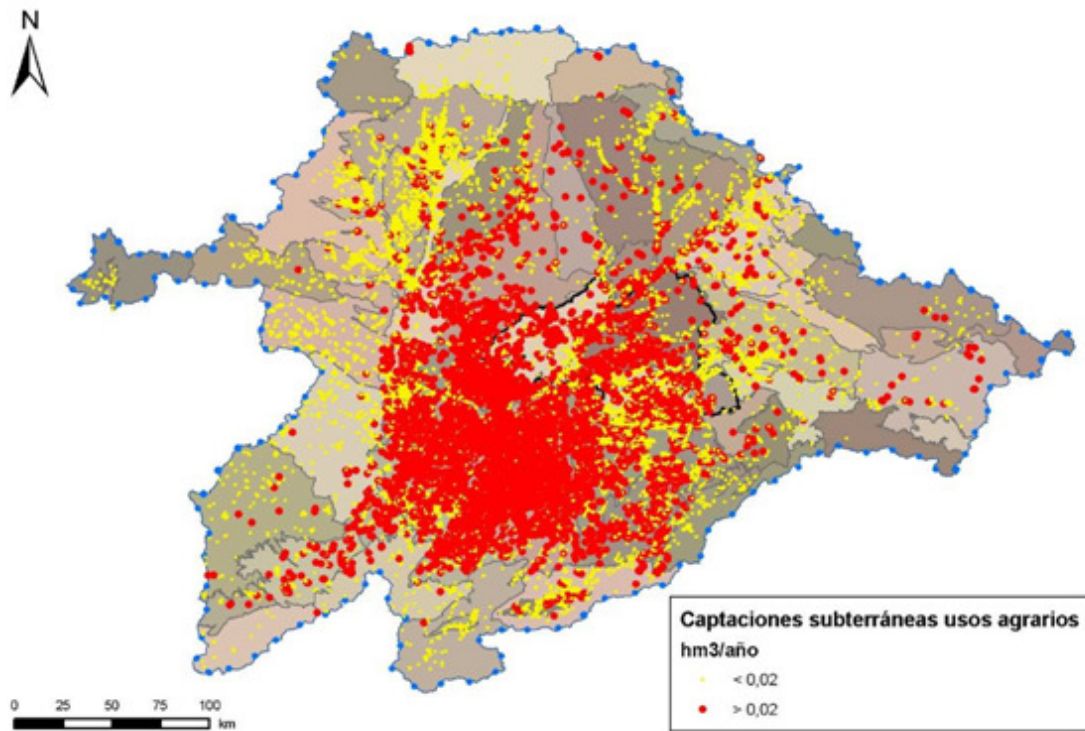


Figura 100: Distribución de pozos para captar agua subterránea para regadío en la cuenca del Duero. Fuente CHD.

b) Mediciones indirectas

Un fuerte condicionante de trabajar con mediciones indirectas es la disparidad que puede existir en los resultados. Como ejemplo se muestran los resultados en la estimación de superficie de regadío en la MAS Los Arenales según cuatro fuentes diferentes:

En la Figura 101, procedente de los trabajos recientes de desarrollo del plan hidrológico, se muestra la evolución de la superficie de regadío en dicha MAS. Los valores en rojo se corresponden con datos extraídos de las Hojas 1T, y en azul resultados de los análisis de fointerpretación.

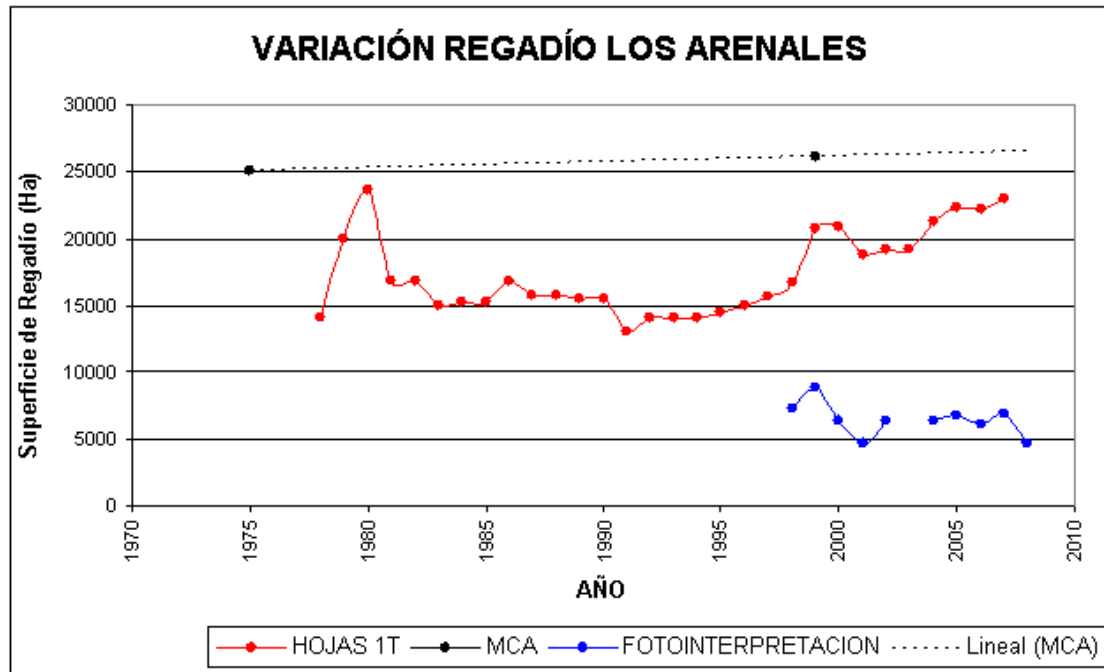


Figura 101: Evolución de la superficie de regadío en la MAS Los Arenales según diversas fuentes; en rojo según datos extraídos de las Hojas 1T, y en azul de los análisis de fotointerpretación. Fuente: "TRAGSATEC, 2009".

Si se observa el dato de 1999, según las hojas 1T son 20.862 ha, y según los resultados del análisis de fotointerpretación aproximadamente 9.000 ha. Si este dato se compara con el obtenido de la P.A.C. del mismo año, extraído del trabajo "DGOHCA, 2002", 16.754 ha, también se observa una gran disparidad.

Por otro lado, el dato de superficie de riego registrado en el sistema Alberca a fecha de 2009 para la MAS Los Arenales es 13.199 ha, un datos que probablemente sea muy diferente al de la Figura 101, vistos los datos del 2008.

En el caso de los datos de Alberca, es cierto que estos datos se corresponderían con superficies concedidas, y no tendría por qué estar regándose la totalidad de la superficie.

Otro aspecto relacionado con trabajar con fuentes indirectas es el modo en que se presenta esta información, ya que pueden encontrarse en unidades diferentes, o haber sido obtenidas por procedimientos distintos, o bajo diferentes asunciones. Además, en muchos casos esta información requiere de tratamientos de des/agregación u otros para su utilización.

c) Evolución histórica de las extracciones

Otro fuerte condicionante que se deriva del apartado anterior es la gran incertidumbre asociada a la evolución histórica de las extracciones. En la actualidad a pesar de carecer de

mediciones directas suficientes, se trabaja con un abanico de fuentes de medición indirectas con el que acotar la magnitud de las extracciones. En el pasado la información era mucho menor, y la calidad y fiabilidad de la misma también.

3.5. Análisis de Aforos

3.5.1. Introducción

Analizados la geología, la piezometría, la infiltración y los bombeos, en este punto se procederá a trabajar con los registros de las estaciones de aforo de la cuenca.

Dada la complejidad del acuífero terciario y lo difícil que supone obtener información acerca de las relaciones río-acuíferos en base a la piezometría, el trabajo con datos de aforo puede ser de gran interés y arrojar importante información acerca de esta conexión.

La estimación de la descarga/recarga del acuífero con respecto a los principales ríos de la cuenca es básico para comprender y dimensionar los diferentes términos del balance. Además, los trabajos anteriores apuntan a una gran alteración en el tiempo, cualitativa y cuantitativa, de la conexión río-acuífero con motivo de las fuertes extracciones de la zona.

3.5.2. Objetivo

La finalidad del análisis es deducir si existe conexión entre el río y el acuífero sobre el que fluye, y de ser así, qué flujos de agua se están produciendo. El procedimiento utilizado para cada tramo será la restitución del hidrograma.

Además se pretende conocer el comportamiento en régimen natural trabajando con aquellos datos anteriores a 1970.

Por último, se valorarán las afecciones sobre el sistema mediante el análisis de las diferencias entre el periodo anterior a 1960 y posterior a 1990.

Dados los objetivos anteriores, el análisis se realizará sobre las zonas potencialmente más importantes, como son los tramos medio y bajo del Duero, y aquellos cauces significativos que pudieran estar en contacto con el acuífero terciario. Éstos son el río Esla, el Valderaduey, los tramos altos del río Pisuerga y sus afluentes, los ríos Riaza y Duratón, y los ríos ubicados en la margen izquierda del Duero, el sistema Adaja-Cega, Guareña y Tormes.

3.5.3. Procedimiento de trabajo

El análisis por tramos consiste en la interpretación del comportamiento de un determinado tramo de río acotado por dos o más estaciones de aforo, mediante la diferencia entre los valores de caudal mensuales aforados en la estación aguas arriba y los aforados en la estación que delimita el tramo aguas abajo. En régimen no influenciado, un

tramo donde la diferencia sea negativa implica que por la estación aguas arriba pasa más caudal que por la de abajo, y por lo tanto, que a lo largo de ese tramo el río se comporta como perdedor. En el proceso contrario el río se comporta como ganador.

Es importante concebir que la diferencia entre los aforos es realmente una diferencia entre superficies, entre cuencas drenantes, mediante la cual se aísla el tramo en cuestión de los fenómenos ocurridos en la cuenca (superficial y subterránea) aguas arriba.

Los caudales aforados aguas abajo dependen de los caudales registrados en la estación aguas arriba, el drenaje o infiltración con el acuífero, la aportación superficial la cuenca comprendida entre las dos estaciones de aforo y las derivaciones o retornos de caudal para diversos usos.

Así pues, aplicando el balance de conservación de agua, la ecuación de restitución para el tramo es la siguiente:

Caudal Aforo ag. Abajo

$$\begin{aligned} &= \text{Caudal Aforo ag. Arriba} \\ &+ \text{Escorrentía Superficial} \\ &\pm \text{Derivaciones/Retornos} \\ &\pm \text{Drenaje/Filtración Acuíferos} \end{aligned}$$

Para poder calcular el sumando correspondiente al drenaje/filtración de acuíferos, se necesita conocer, dimensionar y aislar el resto de entradas y salidas en la cuenca.

Para descontar el sumando correspondiente a la escorrentía superficial se ha optado por trabajar solo con los datos de los meses de verano, Julio, Agosto y Septiembre, bajo la hipótesis de que la aportación superficial en ese periodo es muy baja, y de esta manera se elimina el problema de separar el hidrograma.

Las derivaciones y retornos, al contrario que la escorrentía superficial, son máximas en verano, además no se dispone de datos medidos de suministros. Por ello se ha optado por considerar su valor aproximado deducido de las asignaciones actuales que figuran en la base de datos de la CHD. Esta operación precisa de un conocimiento bastante minucioso de la topología del sistema de recursos hídricos, para lo cual se han utilizado los modelos de gestión de los diferentes sistemas de explotación proporcionados por la OPH de la CHD, realizados con el software SSD Aquatool DMA. Una vez identificados todos los usos del agua que pueden alterar el régimen de caudales de un tramo, se ha estimado su valor neto sumando las derivaciones y restando los retornos.

Finalmente, para interpretar los resultados se ha diseñado un gráfico en el que se representa las 3 series anuales de ganancia del tramo para cada mes seleccionado (junio, julio y agosto) en unidades de hm³/mes. Esta ganancia se calcula mediante la expresión de

$$(\pm \text{Drenaje/Filtración Acuíferos} \pm \text{Derivaciones/Retornos}) = \text{Caudal Aforo ag. Arriba} - \text{Caudal Aforo ag. Abajo}$$

Donde:

- el sumando correspondiente a la escorrentía superficial se considera nulo (según se ha explicado antes).
- el sumando correspondiente a las derivaciones/retornos, dado que no se puede calcular una serie, se ha optado por no tratar de descontarlo, y se ha representado sobre el gráfico mediante una flecha con longitud igual al volumen neto mensual que se le ha calculado. De esta manera es fácil su interpretación, a la vez que no distorsiona la lectura de los resultados del balance.

3.5.4. Limitaciones del método

Aportación superficial

El primer inconveniente que se planteó, ya comentado anteriormente, consiste en determinar y aislar la aportación superficial de la zona drenante a la estación aguas abajo. Como es lógico, la estación no solo recogerá los caudales intercambiados con el río, sino también la aportación superficial de todo punto cuya trayectoria de desagüe sea un punto intermedio del cauce, sea en forma de curso fluvial o no.

Trabajar únicamente con los meses de verano solventa en gran parte este problema, sobre todo en la zona central de la cuenca donde las precipitaciones son de por sí escasas durante todo el año, y más aún en verano. Por otro lado, la identificación de episodios de lluvia esporádica es en muchos casos factible porque generan picos bruscos que escapan a la tendencia general del resto de valores. Especialmente importante es este problema cuando el análisis se realiza en zonas de cabecera, donde la aportación superficial no es nula generalmente.

Con esto se está ignorando lo que sucede durante el invierno. A priori se considerará que la relación río-acuífero es constante todo el año, ya que con este estudio se está buscando deducir el comportamiento general a gran escala del acuífero, y dada su gran extensión es razonable asumir que el aumento del drenaje en invierno se debe a flujos en almacenamientos superficiales que se podrían considerar fuera del acuífero de estudio.

Resolución temporal de los datos

Este análisis implica trabajar la interacción río-acuífero a escala mensual. De cara a la estimación de la descarga total anual se podría asumir que la respuesta del acuífero es homogénea e independiente a la época del año, o bien asumir que ésta dependerá de la época del año.

En el primero de los casos se podría calcular la descarga total multiplicando el valor de descarga mensual por doce. En el segundo, el análisis quedaría reducido a explicar el comportamiento sólo en esta época estival.

Se encuentra el mismo inconveniente al trabajar con la restitución cuando se plantea la estimación de la aportación total anual, ya que las derivaciones y retornos no son constantes durante todo el año, (por ejemplo, las derivaciones y los retornos para riego que acontecen en verano son diferentes a los de invierno).

La restitución es complicada de llevar a cabo con gran precisión a nivel cuantitativo, no así cualitativo, ya que con series largas y conocida la fecha de comienzo de la alteración, suele quedar reflejada en los datos marcando un punto de inflexión.

Variación histórica de la ecuación de restitución

En la línea de lo comentado anteriormente, es importante tener en cuenta el efecto que determinadas alteraciones pueden tener sobre el régimen de caudales, ya que se pueden malinterpretar los resultados.

Los casos más frecuentes son la evolución histórica de las demandas, y la construcción de infraestructuras. En el caso de los embalses, por ejemplo, un tramo delimitado por dos estaciones de aforo entre las cuales se construye un embalse tendrá dos regímenes de caudales; el anterior a su construcción, "natural" y determinado por los mecanismos de Precipitación-Aportación originales de la cuenca; y el posterior, determinado por las normas de explotación del embalse (en el caso de ser destinado a riego es frecuente la inversión de caudales). Además, dependiendo de la magnitud del embalse y las aportaciones, el llenado del embalse puede generar puntos de inflexión en la curva de aportación del tramo.

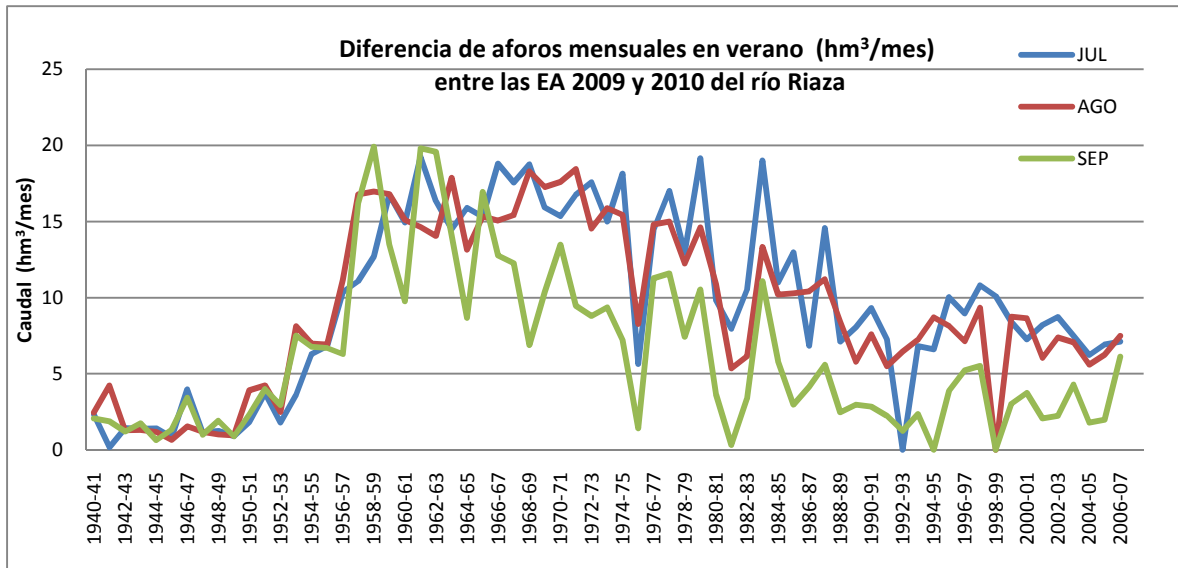


Figura 102: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2036 y 2009 del río Rianza.

Nótese el efecto del embalse de Linares del Arroyo, de 60 hm³ de capacidad, operativo desde el año 1951, sobre el régimen de caudales del tramo.

Ocurre de forma análoga con otras infraestructuras como canales de derivación o retorno, por lo que es de suma importancia dimensionarlos y datarlos.

Se pone de manifiesto entonces la incertidumbre asociada a la restitución de estas alteraciones, pues se necesita de información detallada de la que no siempre se dispone para interpretar las modificaciones que generan sobre el régimen natural. Si se consigue aislar el resto de entradas y salidas del tramo, se puede asociar el comportamiento de la curva de caudales en el tramo a las extracciones subterráneas o a la variación de la recarga, factores con gran incertidumbre en su determinación.

Por último, en algunos casos se han detectado en régimen alterado comportamientos diferentes debidos a la gestión de las aguas superficiales. Este efecto se ha considerado y corregido contrastándolo con otras fuentes de información en aquellos casos en que ha sido viable, en otros, no habiendo un criterio claro para cuantificar su efecto se han ignorado.

Disponibilidad y calidad de los datos

En este punto conviene destacar el fuerte condicionamiento que tiene este tipo de análisis a la cantidad y calidad de los datos disponibles, siendo éstos los registros de caudales obtenidos del anuario de aforos 2006/2007 del Ministerio de Medio Ambiente y Medio

Rural y Marino gestionados por el Centro de Estudios Hidrológicos, CEDEX, donde se accede a los datos de toda la Red Oficial de Estaciones de Aforo, ROEA (<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/>).

Para un correcto análisis, la situación ideal se daría con tramos cortos, sin afluentes intermedios, y bien delimitados por los aforos. Además, de cara a la interpretación de los resultados se necesita que la serie de datos sea lo más larga posible, lo suficiente por lo menos para poder analizar el comportamiento en un hipotético régimen natural del río, (comportamiento en ausencia de infraestructuras de regulación, extracciones...).

Ampliación del análisis

Además del análisis de las diferencias mensuales en verano, ha sido llevado a cabo el mismo para la época invernal y el análisis de diferencias totales anuales, de cara a matizar o profundizar las conclusiones del análisis en la época estival.

En algunos casos de especial relevancia se ha ampliado el número de análisis de forma cualitativa. Han sido llevados a cabo puntualmente análisis de diferencias de caudales a escala diaria y de variación estacional, y otras consideraciones relacionadas con los datos de aportación.

3.5.5. Identificación de tramos

Así pues, las estaciones de aforo para la delimitación de los tramos han sido elegidas en función a su localización, longitud de la serie de datos solapada, y delimitación de la superficie (ausencia de afluentes intermedios...), se representan en la Figura 103



Figura 103: Mapa de la cuenca del Duero, delimitados por Masas de Agua Subterráneas, donde se ubican las estaciones de aforo utilizadas para el análisis de aforos.

La numeración de los tramos de cada río se lleva a cabo desde la desembocadura a la cabecera para el caso de los afluentes, y a la inversa para el río Duero, donde el primer tramo de cabecera es el 1 y el último el 9.

3.5.6. Resultados por tramos

En este apartado se van a sintetizar las principales conclusiones del análisis por tramos, que se muestran en la Tabla 29. Los resultados que no figuran en la Memoria se encuentran en el Anexo 3.

La revisión bibliográfica previa, y los estudios anteriores (trabajos antecedentes y estudio de datos; piezometría principalmente) ha permitido concebir una idea previa del funcionamiento del acuífero, y una serie de hipótesis y suposiciones que también se espera confirmar con los resultados de este análisis. Éstas son fundamentalmente dos:

- La no influencia del sistema Esla sobre la descarga al río en el tramo final del Duero.
- La desconexión del acuífero terciario con los cauces situados sobre el estrato de margas de la región de los páramos.

Se presentan los resultados del análisis separados por zonas, cuya estructura para cada tramo será la siguiente; introducción, datos disponibles (aforos y afecciones), resultados de la restitución, análisis de las diferencias entre aforos en verano, y conclusiones.

Río Pisuerga

El río Pisuerga es uno de los ríos más caudalosos de la cuenca de Duero, se ubica en su margen derecha y desemboca a la altura de Valladolid. En su tramo medio y bajo atraviesa la denominada Región de los Páramos, ubicada sobre el acuífero terciario detrítico bajo los páramos, MAS 67.

El acuífero profundo de los páramos se encuentra confinado por una capa de margas de espesor variable entre 200 y 400 m que lo aísla de los estratos superiores sobre los cuales fluyen gran parte del río Pisuerga y afluentes. De este modo todos los cauces situados por encima de este paquete de margas no entran en contacto con el acuífero terciario profundo, y no existe intercambio de recurso entre ambos.

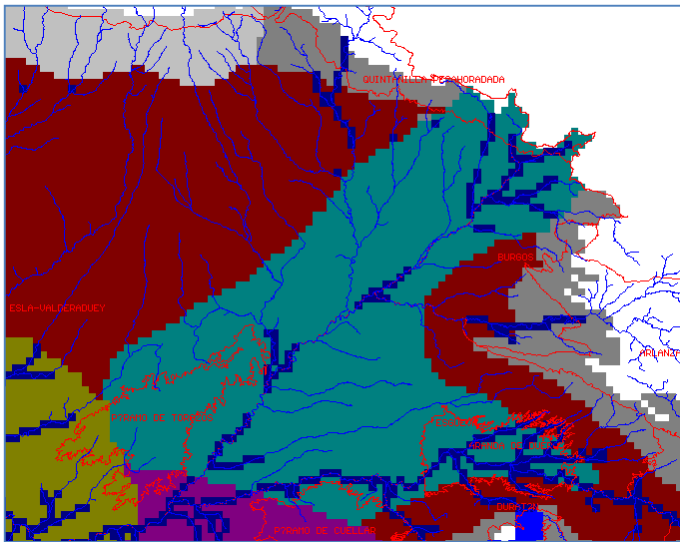


Figura 104: Representación del estrato de margas ubicado en la Región de los Páramos, obtenido de modelo de flujo subterráneo "Duero.vmf", "OPH. 2006".

La ubicación del paquete de margas se puede apreciar en la Figura 104 , en color verde azulado, y en la Figura 105 un perfil longitudinal N-S del mismo.

En ella se aprecia cómo se extiende por debajo de prácticamente la totalidad del río Pisuerga. El estrato confinante desaparece a partir de los tramos medios del Carrión (EA 2042), Valdavia (EA 2026) y Arlanza (EA 2031), y el tramo alto del propio Pisuerga (EA 2133).

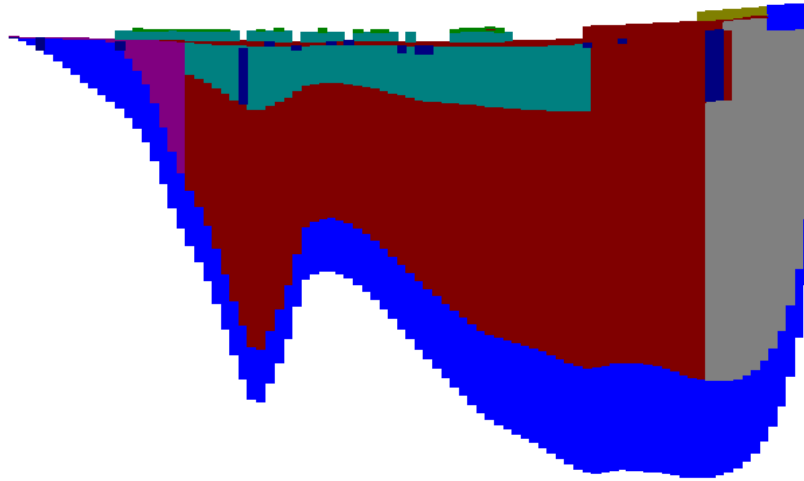


Figura 105: Perfil longitudinal N-S de la zona representada en la Figura 104.

Atendiendo a su funcionamiento general, en la cuenca del Duero se recibe la mayoría de la recarga de lluvia en las cabeceras, donde se infiltra para salir a través de los ríos en sus tramos medios y bajos. Así pues, la recarga que tenga lugar en las zonas ubicadas sobre las margas irá a parar al río de una forma relativamente rápida sin entrar en contacto con el acuífero terciario profundo.

Los tramos altos del Pisuerga y sus afluentes, bajo los cuales no hay margas, se asientan sobre materiales detríticos terciarios de diferentes litologías. Estos estratos contactan con el acuífero terciario, por lo que sería factible que existiera intercambio de agua entre ellos.

De este modo se estudiarán por separado los tramos de río aislados del acuífero terciario profundo por el estrato de margas (A), de aquellos ubicados en cotas mayores donde pueda existir una conexión que permita el intercambio de agua (B). En el primero de los casos el agua que infiltre será drenada al río Pisuerga y sus afluentes, y en el segundo podría infiltrar por debajo del paquete de margas para drenar en el tronco central del Duero. Se expondrán las conclusiones para cada uno de los dos grupos por separado, y posteriormente las del río Pisuerga en su conjunto.

Se realizará el análisis incluyendo aquellos tramos de río, ubicados en cabecera, que no pertenecen al acuífero terciario sino a la Zona Cantábrica, ya que, como se explicará posteriormente a la hora de hacer el balance, se considera que la infiltración en estos cauces tiene como destino el acuífero terciario.

A) Tramos sobre el estrato de margas

Los resultados de los análisis de los tramos ubicados sobre el estrato de margas se encuentran en el anexo 3, ya que como se verá más adelante se trata de una zona que queda fuera del balance final. A continuación se presentan la delimitación y las características principales de los tramos de esta zona y las conclusiones del análisis de los mismos.

Pisuerga Tramo 1

El tramo 1 está localizado entre las estaciones de Aforo 2043 en Cabezón de Pisuerga y 2029 en Cordovilla la Real. Se trata del tramo anterior a la desembocadura del río en el Duero. Recoge las aguas del río Carrión por su margen derecha y del Arlanza por su margen izquierda, de los cuales se utilizan los datos de las estaciones de aforo 2042 y 2036 para restituir.

Conclusiones

El análisis de este tramo resulta bastante complejo por la multitud de factores determinan su régimen de caudales; en primer lugar las variaciones climáticas, pues se aprecia correlación entre éstas y las diferencias de caudal; por otro lado se encuentra también afectado por el régimen de descarga de los páramos, cuya distribución temporal y descarga son variables (puede ser de hasta 45 hm³ anuales; por último, podría existir influencia de los materiales aluviales cuaternarios sobre los que se asienta el río, pues pueden infiltrar y drenar agua muy fácilmente dada su alta transmisividad y bajo almacenamiento.

Por todo lo anterior, y considerando los datos de geología y piezometría tratados anteriormente, se considera que el río está ganando entre 5 y 10 hm³/mes, los cuales son difícilmente atribuibles al acuífero profundo. El origen de la ganancia está seguramente en los factores comentados anteriormente.

Pisuerga Tramo 2

El siguiente tramo se delimita por las estaciones 2029 y 2133, en Herrera de Pisuerga. Es un tramo de longitud considerable, y recibe por su margen izquierda los caudales del río Odra y por la derecha los del Valdavia, de los cuales se dispone registro de caudales para restituirlos, EA 2128 y EA 2026, respectivamente.

Conclusiones

Tras analizar las figuras del anexo, y considerando las afecciones en el tramo, se puede apuntar que puede existir una ganancia de caudal en el tramo de 5 hasta 20 hm³/mes, según se trate de años húmedos o secos.

Este drenaje es de gran importancia para el caudal del tramo, ya que supone el 25 % del caudal mensual medio de la serie (48.2 hm³/mes) registrado en la estación de aforos aguas abajo, y prácticamente el 100 % del caudal mensual medio en los meses de Julio, Agosto y Septiembre (13.3 hm³/mes).

Carrión Tramo 1

Ubicado entre las estaciones de Aforo 2042 en Palencia y 2040 en Villodo, este tramo es el más cercano a la desembocadura en el río Pisuerga. Discurre atravesando el límite formado por el estrato confinante de margas, y más cerca de la desembocadura lo hace sobre la MAS Aluviales del Pisuerga-Arlanzón, cerca del páramo de Astudillo.

Conclusiones

El comportamiento del Carrión en este tramo se encuentra dentro de lo esperado, donde acontece un intercambio de agua con los estratos inferiores prácticamente nulo.

Inicialmente cabe esperar para todos los tramos de río ubicados sobre las margas un comportamiento similar a éste, sin pérdidas muy grandes porque las margas no posibilitan la existencia de flujo regional desde una superficie grande, por lo que el agua infiltrada debería drenar en un periodo corto y no muy lejos de donde infiltró.

Arlanzón Tramo 1

Delimitado entre las estaciones de Aforo 2036 en Quintana del Puente y 2116 en Villavieja, este tramo incluye la parte final de los ríos Arlanza y Arlanzón, justo antes de su desembocadura en el Pisuerga. Está delimitado también por la estación 2031 del río Arlanza, ubicada en el municipio de Peral de Arlanza.

Conclusiones

El río se podría estar comportando como perdedor en épocas secas, cediendo en verano entre 5 y 10 hm³/mes, incluso en los meses de invierno. No obstante, con los conocimientos de que se dispone no se puede explicar perfectamente este fenómeno, ya que no cabría esperar pérdidas considerables en los tramos ubicados en los estratos sobre las margas.

Arlanzón Tramo 2

Tramo ubicado entre las estaciones de Aforo 2116 y 2032 en Villasur. La serie de datos solapada entre las estaciones transcurre desde el año 1977 hasta el 2006.

Conclusiones

Durante la época estival la ganancia del tramo es prácticamente nula o muy reducida, y los valores positivos que se reflejan al analizar las diferencias totales anuales y las diferencias mensuales en invierno tienen origen en la aportación superficial, lo cual es lógico tratándose de un tramo de río ubicado en cotas altas.

Río Esgueva

Las estaciones utilizadas para el análisis del río son la primera, 2044 en Valladolid, y la última, 2049 en Cabañas de Esgueva, con respecto a la desembocadura del río en el Pisuerga, por lo que el tramo incluye la mayoría del río Esgueva.

Conclusiones

Los valores que adoptan las diferencias en verano son muy pequeños e indican que el intercambio es muy reducido, sino nulo. No obstante, al considerar las detracciones si parece existir un pequeño flujo relativamente constante nunca superior a 5 hm³/mes. El origen podría estar en la descarga del Páramo de Esgueva.

Al analizar las diferencias totales en invierno se aprecia como las diferencias varían directamente con los periodos de mayor precipitación. Esta respuesta tiene lugar además de un modo relativamente rápido, como se espera al estar en contacto con unidades más transmisivas como son los páramos.

Conclusiones del análisis de los tramos sobre el estrato de margas

Uno de los factores más determinantes de la conexión río-acuífero en esta zona es el efecto del estrato de margas sobre el que se ubican los páramos. Los materiales ubicados por encima de este estrato son de naturaleza detrítica similar a los del acuífero profundo, pero tienen una potencia muy pequeña que limita el intercambio de agua con los ríos que se asientan sobre ellos.

Los análisis de caudales en las estaciones de aforo confirman que en la mayoría de los casos el intercambio de agua es muy reducido, y generalmente positivo. Solo en el tramo

del río Arlanzón más cercano al Pisuegra se registran pérdidas en algunos periodos de la serie que no se pueden explicar con exactitud.

Por otro lado en la mayoría de los casos los resultados parecen muy dependientes del régimen de precipitaciones, respondiendo con mayores diferencias a los periodos húmedos y viceversa, de forma bastante rápida además, lo cual es razonable conforme a lo que cabría esperar por el efecto de los páramos y aluviales, y la ubicación del paquete de margas.

Por todo lo anterior, a la hora de llevar a cabo el balance del acuífero terciario no se considerarán los bombeos ni las recargas (ya sea directa o a través de los cauces) que tengan lugar sobre esta zona desde las margas hasta la superficie, ya que se asume que su efecto solo tendrá lugar en los cauces cercanos, y no se verá afectado ni el acuífero profundo ni la descarga al río Duero.

En este punto cabe comentar que, como se vio en las figuras donde se muestra la ubicación de las margas, estas formaciones impermeables se ubican también en una pequeña zona por debajo del río Duero, a la altura de lo que en el presente trabajo se denominó Tramo 5 y Tramo 6. Así pues, lo comentado en este apartado sería aplicable también a estos tramos de río, y los resultados obtenidos lo confirman, concluyendo que el intercambio en estos tramos es pequeño sino nulo.

B) Tramo fuera del estrato de margas

Pisuerga-Tramo 3

Datos disponibles

Aforos

Se trata de un tramo de pequeña longitud delimitado por las estaciones de Aforo 2133 en Herrera de Pisuerga y 2024 en Alar del Rey.

Afecciones

	Demandas					Retornos			
	3000032	2000071	Canal de Pisuerga	Canal Castilla_c	Total	3000032	2000071	Canal Castilla_a	Total
Junio	0.2	1.6	24.8	21.2	47.8	0.0	0.0	2.6	2.6
Julio	0.2	1.0	13.4	21.2	35.7	0.0	0.0	2.6	2.6
Agosto	0.2	0.2	3.0	21.2	24.5	0.0	0.0	2.6	2.6
Promedio	0.2	1.0	13.7	21.2	36.0	0.0	0.0	2.6	2.6

Diferencia Total	33.4
-------------------------	-------------

Tabla 12: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Pisuerga.

En la Tabla 12 se muestran las entradas y salidas en el tramo. La diferencia entre ambas confirma que se detraen en total 36 hm³/mes en verano (principalmente por los canales de Castilla y Pisuerga) por 3 hm³/mes que ingresan por retornos.

Resultados restitución

La Figura 106 muestra las diferencias mensuales en verano e invierno. Durante la época estival (izquierda) la diferencia de caudales es negativa, con descensos puntuales bruscos. El valor medio su ubica alrededor de -30 hm³/mes. No obstante, considerando las detracciones de caudal, los valores negativos no son de tal magnitud y la curva se colocaría en el rango entre -5 y -10 hm³/mes, ligeramente inferior por épocas.

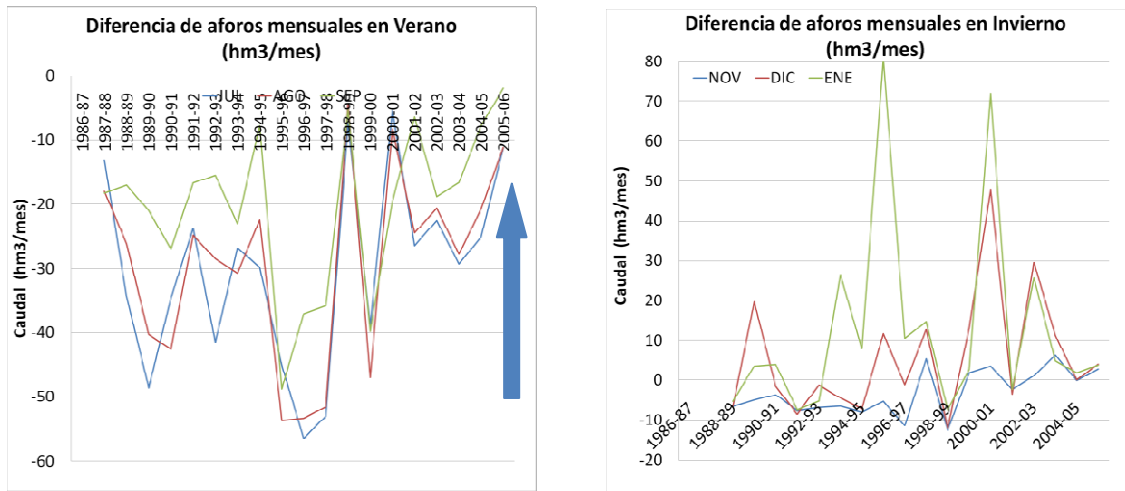


Figura 106: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2133 y 2024 del río Pisuegra.

En invierno (derecha) ocurre algo similar y los valores se ubican en el rango entre -10 y 20 hm^3/mes , con picos bruscos ascendentes.

Las diferencias totales anuales (Anexo 3) arrojan resultados similares, con picos muy bruscos positivos y negativos, y con valores medios por debajo del cero, entre -50 y -150 hm^3 anuales.

Conclusiones

La estación 2133 se ubica aproximadamente sobre el límite de la unidad de impermeable de margas. Aguas arriba de esta estación sería factible que el río se comporte como perdedor, infiltrando agua que drene aguas abajo. Aguas abajo de esta estación el intercambio es muy reducido e incluso nulo, pues los espesores de material detrítico sobre las margas son muy pequeños.

El comportamiento de este tramo parece ajustarse a lo comentado anteriormente; ubicado ligeramente por debajo del cero o en torno a él, con oscilaciones negativas en verano, mientras que en invierno las diferencias toman valores mayores, aunque registrando también valores negativos frecuentemente. Se puede afirmar entonces que el río en general se está comportando como perdedor, infiltrando en torno a 10 hm^3/mes .

Comparando el valor de infiltración con el caudal registrado en la estación de aforos aguas abajo se puede dimensionar la verdadera importancia del mismo. El caudal mensual medio de la serie es 23.6 hm^3/mes , por lo que una descarga de 10 hm^3/mes supone el 42 % del mismo. Si se compara con el caudal mensual medio de la serie en los meses de Julio. Agosto y Septiembre (18.2 hm^3/mes), supone hasta el 55 %.

Pisuerga-Tramo 4

Datos disponibles

Aforos

Tramo ubicado entre las estaciones de Aforo 2024 y 2020, justo aguas abajo del Embalse de Aguilar de Campoo.



Figura 107: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 3 y 4 del río Pisuerga.

En la Figura 107 se muestran las estaciones utilizadas para analizar este tramo y el anterior.

El tramo 4 transcurre en su mayoría sobre la MAS Quintanilla-Peñahoradada. Esta MAS está compuesta mayoritariamente por calizas mesozoicas.

Afecciones

	Demandas							Total
	2000101	3800001	3000036	2000068	2000069	3000032	Canal Castilla_a	
Junio	0.6	2.7	0.0	2.1	1.7	0.2	2.6	9.9
Julio	0.4	2.7	0.0	1.5	1.2	0.2	2.6	8.6
Agosto	0.1	2.6	0.0	0.3	0.2	0.2	2.6	6.0
Promedio	0.4	2.6	0.0	1.3	1.0	0.2	2.6	8.2

Tabla 13: Afecciones por detracción de caudal en el tramo 4 del río Pisuerga.

	Retornos						Total
	3000031	3800001	3000036	2000068	2000069	2000101	
Junio	0.0	2.3	0.0	0.3	0.3	0.1	3.0
Julio	0.0	2.3	0.0	0.2	0.2	0.1	2.8
Agosto	0.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3
Promedio	0.0	2.3	0.0	0.2	0.2	0.1	2.7

Diferencia Total	5.5
-------------------------	------------

Tabla 14: Afecciones por retorno de caudal en el tramo 4 del río Pisuerga.

Los resultados del análisis de detracción y retorno de caudales muestran que el río lleva en ésta época alrededor de 5.5 hm³/mes menos de los que llevaría sin afecciones.

Resultados restitución

Las diferencias mensuales en los meses de verano e invierno se muestran en la Figura 108. En ella se aprecia que durante la época estival (izquierda) al comienzo de la serie los valores se ubican por debajo del cero, reflejando un comportamiento ligeramente perdedor (5-10 hm³/mes). A partir de 1969, coincidiendo con la entrada en funcionamiento del embalse de Aguilar de Campoo ubicado inmediatamente aguas arriba (247 hm³ de capacidad), se produce una etapa ascendente donde los valores se mueven bruscamente hasta el año 2002, estabilizándose en los valores iniciales. Por otro lado han de ser consideradas las afecciones estudiadas anteriormente, según las cuales la curva debería aumentar 5.5 hm³/mes.

En invierno (derecha) la tendencia es más irregular con valores medios positivos (10-20 hm³/mes), picos ascendentes muy bruscos, y también años donde los valores son negativos.

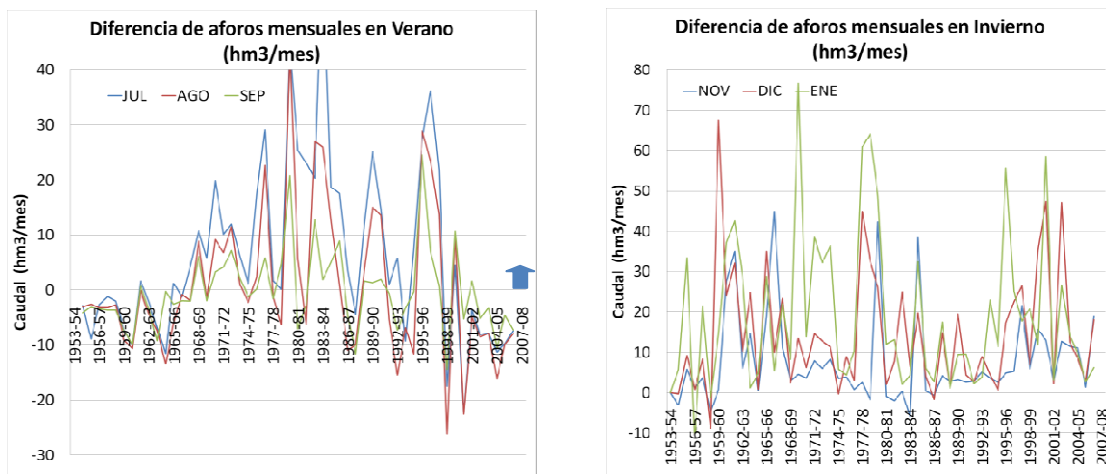


Figura 108: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2024 y 2020 del río Pisuerga.

En el Anexo 3 se muestra la figura con las diferencias totales anuales entre las estaciones de aforo, también los caudales aforados en ambas. Lo más destacable es que también registran mínimas pérdidas al comienzo de la serie y valores más cercanos al cero al final.

Conclusiones

Los análisis anteriores apuntan a que la ganancia del río con los estratos inferiores es pequeña, se podría considerar que el río pudiera perder caudal en verano durante periodos más secos, como se ve reflejado al comienzo de la serie, en torno a 3-5 hm³/mes. Por otro lado, las precipitaciones parecen influir de forma determinante en el comportamiento de la serie, explicando gran parte de la variación de la misma.

Comparada con el caudal aforado en la estación de aguas abajo, una pérdida en torno a 3-5 hm³/mes supone alrededor del 11 % del caudal medio anual aforado en la misma.

Pisuerga Tramo 5

Datos disponibles

Aforos

El tramo discurre entre las estaciones 2106 a la salida del embalse de Requejada (de 65 hm³ de capacidad y operativo desde 1940), y la estación 2016 en el embalse de Aguilar de Campoo (ver Figura 109). En uno de los afluentes que drenan al río en cabecera se ubica el embalse de Cervera, de 9 hm³ de capacidad, que data de 1923.

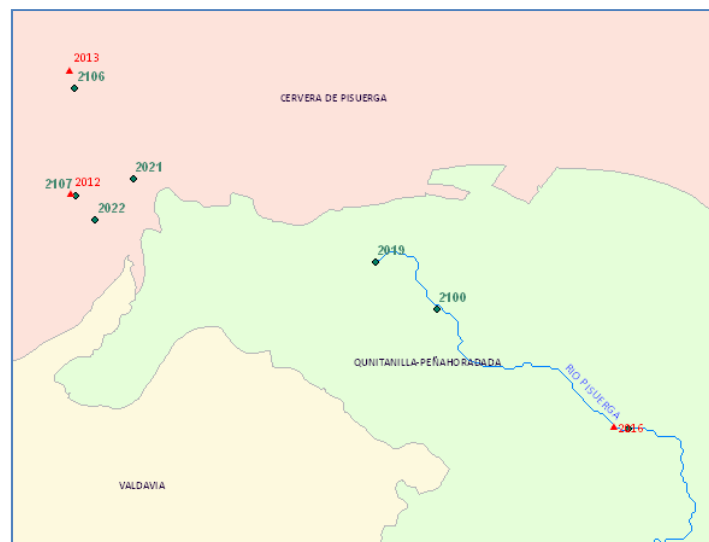


Figura 109: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 5 del río Pisuerga.

Afecciones

	Demandas			Retornos	
	200067	3000031	Total	2000067	Total
Junio	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0
Julio	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0
Agosto	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0
Promedio	0.1	0.2	0.3	0.0	0.0
Diferencia Total	0.3				

Tabla 15: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 5 del río Pisuerga.

La afección en este tramo de cabecera es mínima, no se considera.

Resultados restitución

Analizando las diferencias mensuales entre las estaciones en verano (Figura 110, izquierda) e invierno (derecha), se observa como los valores en ambas situaciones se ubican por debajo del cero. En verano de un modo más estable entre -5 y -20 hm³/mes y en invierno entre 0 y -20 hm³/mes con algunos años con valores positivos.

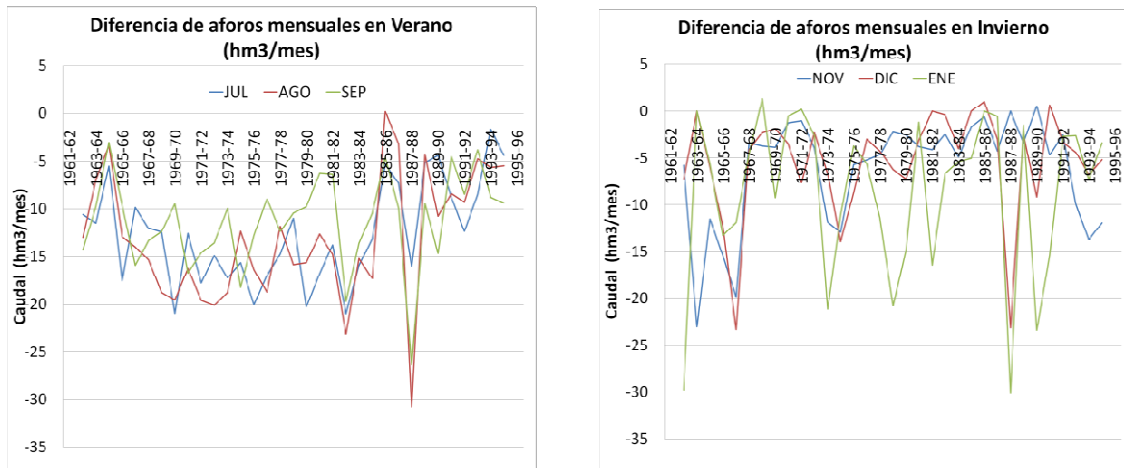


Figura 110: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2016 y 2106 del río Pisuerga.

La Figura 111 muestra las diferencias totales anuales. Las barras muestran los valores de caudal en hm³/año recogidos en ambas estaciones de aforo (eje principal). La línea verde la diferencia entre ambas (eje secundario). Los valores se muestran en todo momento por debajo de cero, en valores medios alrededor de 120-150 hm³/año de pérdida. En dicha figura se representan también los caudales aforados en ambas estaciones de aforo, y se puede apreciar como las diferencias negativas se dan en una época relativamente húmeda, por lo que éstas parecen no estar condicionadas por los factores climáticos.

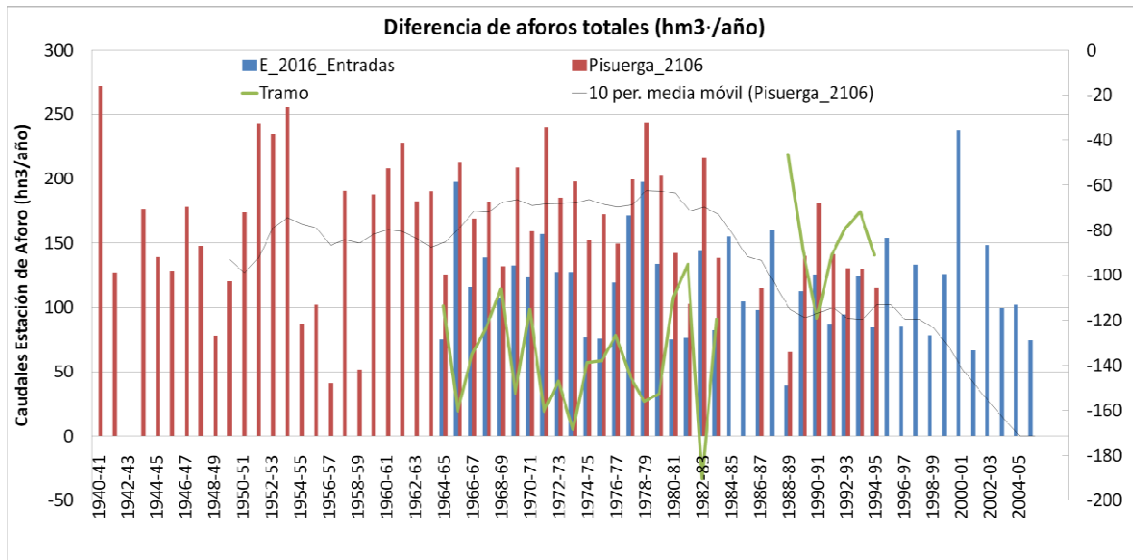


Figura 111: Series de aforos anuales en las estaciones 2106 y 2016 del río Pisuerga (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

Conclusiones

El comportamiento del río en este tramo es claramente perdedor. Además, si se tiene en cuenta que las diferencias negativas entre las estaciones están incluyendo muy probablemente parte de la aportación superficial, y que apenas existe detracción de caudal a lo largo del tramo, este comportamiento parece más claro aún. El valor de la infiltración se ubica en torno a 10 o 12 hm³/mes.

Esta infiltración es realmente determinante para el río, ya que comparada con el caudal mensual medio de la serie, 9.93 hm³/mes, la descarga de 10 hm³/mes supone el 101% del mismo. Si se compara con el caudal mensual medio de la serie en verano (6.73 hm³/mes), supone hasta el 148 %.

El hecho de que se den porcentajes superiores al caudal medio en la estación de aguas abajo responde a que se está hablando de tramos perdedores, donde la estación de aguas arriba registra más caudal que la de abajo. Con respecto a la estación de aguas arriba, la infiltración supone un 28 % comparada con el caudal medio mensual de la serie y un 29 % para los valores de verano.

Río Carrión-Tramo 2

Datos disponibles

Aforos

Este tramo del Carrión comprende desde la estación de aforo 2040 a la 2134, en Guardo. Cabe destacar que la estación 2040 deja de tomar datos en el periodo 1962-1976, sería importante conocer el motivo, pues este hecho aporta incertidumbre al análisis en caso de tratarse de un ajuste o recalibrado en la estación de aforos (aunque los valores no parecen variar mucho antes y después).



Figura 112: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 2 y 3 del río Carrión.

Este cauce se encuentra altamente influenciado desde bastante tiempo atrás por la construcción de los embalses de Compuerto (EA 2015), de 95 hm³ de capacidad, operativo desde el año 1960, y Camporedondo (EA 2014), con una capacidad de 70 hm³, operativo desde 1930. No obstante, como se comentó anteriormente, el análisis entre las estaciones de aforo no pierde su validez por ello pues la afección se elimina al restar los caudales.

En la Figura 112 se muestran el río Carrión y las estaciones de aforo ubicadas en el mismo (verde). También se muestra en rojo los embalses con su código identificador. El final del

tramo 2 está marcado por la estación de aforos 2134, que marca también el comienzo del tramo 3, el cual transcurre hasta la EA 2108 por materiales fundamentalmente calizos.

Afecciones

	Demandas					Retornos				
	DA 2000063	2000064 3800005	ZR 2000105	Carrión Saldaña	Total	2000063	3800005	2000064	Canal_Villalba	Total
Junio	1.3	0.5	28.6	2.0	32.4	0.2	0.5	4.3	44.1	49.0
Julio	0.7	0.5	15.9	1.1	18.2	0.1	0.5	2.4	44.1	47.0
Agosto	0.2	0.5	4.6	0.2	5.5	0.0	0.4	0.7	44.1	45.3
Promedio	0.7	0.5	16.4	1.1	18.7	0.1	0.5	2.5	44.1	47.1

Diferencia Total	-28.4
-------------------------	--------------

Tabla 16: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 2 del río Carrión.

Se trata de un tramo de gran longitud sobre el cual se produce la salida y entrada de grandes cantidades de agua. La principal detracción tiene como destino la satisfacción de

la demanda DA 2000064 ZR Carrión Saldaña, y la principal entrada son los retornos del Canal de Villaba. El balance total supone una ganancia de 28.4 hm³/mes, por lo que las diferencias deberían ser inferiores.

Resultados restitución

La Figura 113 muestra las diferencias de los aforos en los meses de verano. En los primeros 15 años de la serie los valores se ubican entre -10 y -30 hm³/mes lo que se interpreta como que el río está recargando agua al acuífero. Los siguientes 5 años parece ascender ligeramente, y aunque luego la serie se corta hasta 1975, el periodo 1975-1985 oscila en los mismos valores.

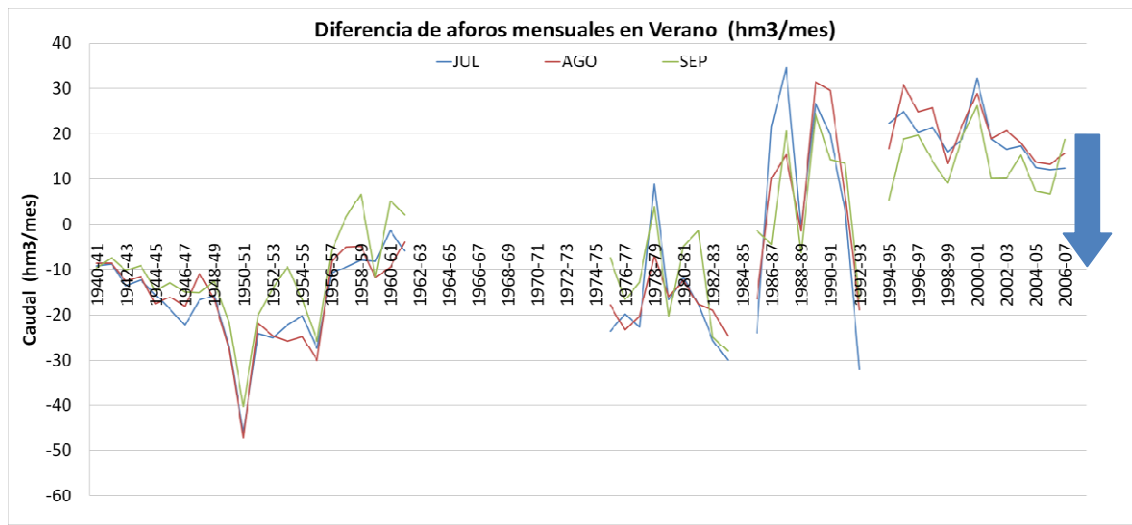


Figura 113: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2040 y 2134 del río Carrión.

A partir de 1985 se produce un ascenso brusco que incrementa los valores por encima del cero hasta los 20 hm³/mes aproximadamente. Este ascenso es debido a los retornos del Canal de Villalba, para uso hidroeléctrico, cuya concesión data de 1981.

Analizando las diferencias totales anuales (Anexo 3) se observa como la etapa ascendente de finales de los años 50 parece tener origen en una sucesión de años más húmedos.

Conclusiones

Se podría apuntar que en régimen natural el río se comporta como perdedor, este valor oscilaría entorno a los 10-12 hm³/mes. La pérdida supone un 41 % sobre el caudal medio mensual de la serie aforado en la estación de aguas abajo (30.8 hm³/mes). Si se compara con la serie de valores medios en verano, 23.7 hm³/mes, la pérdida supone el 53 %, un porcentaje muy considerable.

Carrión-Tramo 3

Datos disponibles

Aforos

Este tramo se delimita con las estaciones 2134 y 2108, en Camporredondo.

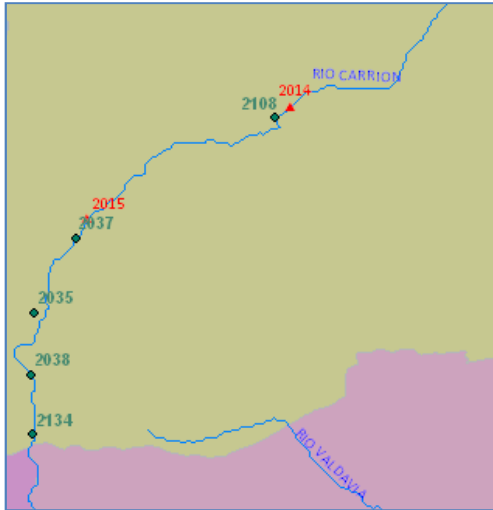


Figura 114: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 3 del río Carrión.

Existen varias estaciones intermedias (2038, 2035, 2037 y 2015), que no han sido utilizadas porque se pretende trabajar con el tramo más largo posible, por lo que se utiliza la estación más aguas arriba que contenga una serie larga de datos.

Afecciones

	Demandas			Retornos	
	DA 2000104 ZR Camporredondo	Canal_Villalba	Total	DA 2000104 ZR Camporredondo	Total
Junio	0.0	44.1	44.1	0.0	0.0
Julio	0.0	44.1	44.1	0.0	0.0
Agosto	0.0	44.1	44.1	0.0	0.0
Promedio	0.0	44.1	44.1	0.0	0.0

Diferencia Total	44.1
-----------------------------	-------------

Tabla 17: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Carrión.

La principal afección es el Canal de Villalba, que detrae un máximo de 44.1 hm³/mes en verano.

A mitad del tramo se encuentra el embalse de Compuerto, de 97 hm³ de capacidad y en funcionamiento desde 1960, lo cual modifica los aforos registrados en la estación de aguas abajo. Aguas arriba del tramo se encuentra el embalse de Camporeddondo, con 70 hm³ capacidad y operativo desde 1930, el cual no altera los resultados del análisis.

Resultados restitución

Las diferencias mensuales durante la época estival (Figura 115) se mantienen ligeramente por encima del cero durante los primeros 20 años. Estas diferencias positivas son muy

pequeñas, y se justifican con la aportación superficial de la zona, ya que a pesar de ser valores registrados en verano, el tramo se ubica en cabecera por lo que la afección de la portación superficial es mayor.

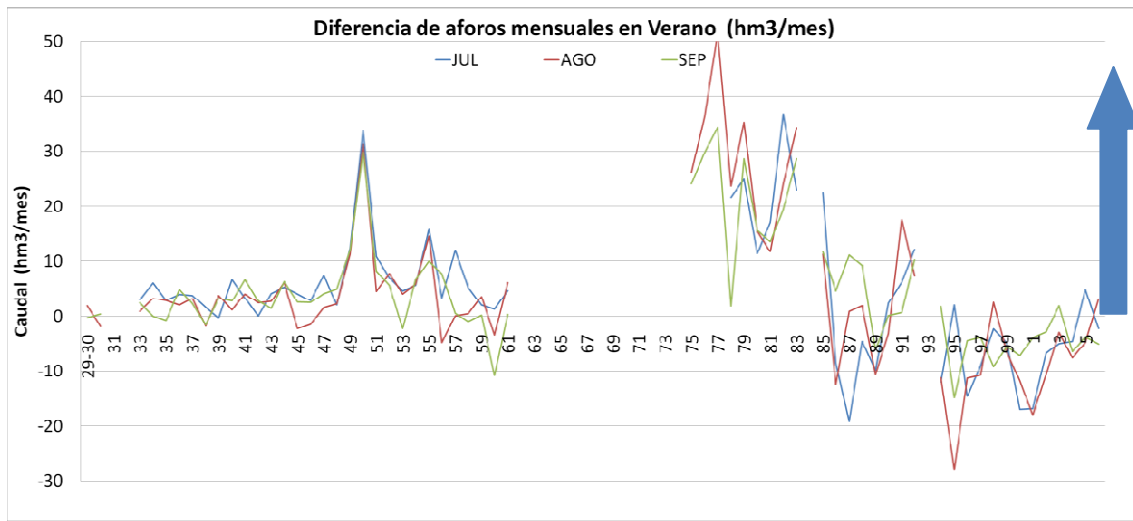


Figura 115: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2134 y 2108 del río Carrión.

La hipótesis anterior parece confirmarse con la figura 21 del Anexo 3, en la cual se representa la aportación subterránea para los meses de Julio, Agosto y Septiembre según el modelo de precipitación-aportación SIMPA, para la MAS Cervera de Pisuegra, donde se sitúa la cabecera del río Carrión. En ella se observa como la aportación superficial es suficiente como para justificar esos 5 hm³/mes que refleja la figura anterior.

La serie carece de datos desde el año 1962 donde finaliza la etapa de relativa estabilidad, hasta 1974, donde la diferencia entre los caudales de las estaciones de aforo ha aumentado hasta 40 hm³/mes. Desde el año 1978 comienza un descenso hasta la actualidad donde los valores se muestran en torno a 10 hm³/mes por debajo del cero.

El descenso de la serie hasta el final podría explicarse por la entrada en funcionamiento del Canal de Villalba en 1981 (44.1 hm³/mes, única detracción importante de caudal), y sin el mismo la curva se alzaría hasta los valores de 1978.

La diferencia entre los valores al comienzo de la serie y los mismos en el año 1978, en torno a 40 hm³/mes puede estar en el embalse de Compuerto, ubicado a mitad del tramo, que entra en funcionamiento en el año 1960, lo cual supone una modificación en los caudales que se recogen en la estación aguas abajo. La confirmación de lo anterior se obtiene de la Figura 116, donde se muestran las diferencias entre las estaciones de aforo 2134 y la 2038 en Velilla de Guardo, ambas ubicadas aguas abajo del embalse de Compuerto (ver Figura 114), por lo que el tramo queda fuera de la afección del mismo. En

la figura se aprecia como la tendencia estable en torno al cero se mantiene hasta el comienzo de los años 90, y no existe alteración alguna después del funcionamiento del embalse.

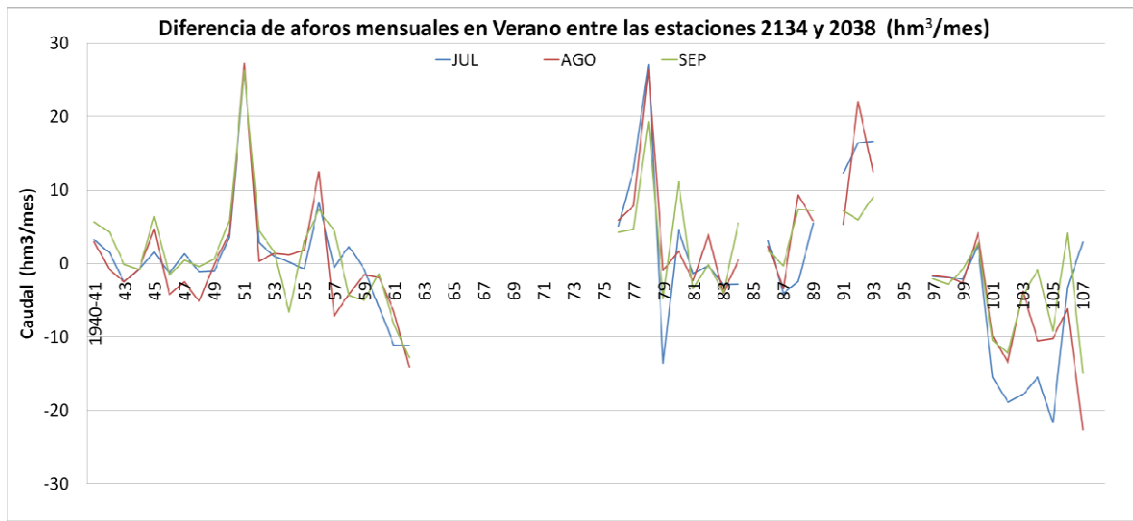


Figura 116: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2134 y 2038.

La serie de diferencias totales anuales (Figura 117) muestra una forma más similar a la de invierno que a la de diferencias de verano. En ella se aprecian también los valores de los caudales registrados en ambas estaciones. Llama la atención la gran diferencia existente en los caudales recogidos por la estación de aforos 2134 antes y después del vacío existente entre 1960 y 1975, mucho mayores al principio que al final. Se entiende que esta diferencia se debe a la aportación superficial invernal, ya que no tiene equivalencia en el balance de verano.

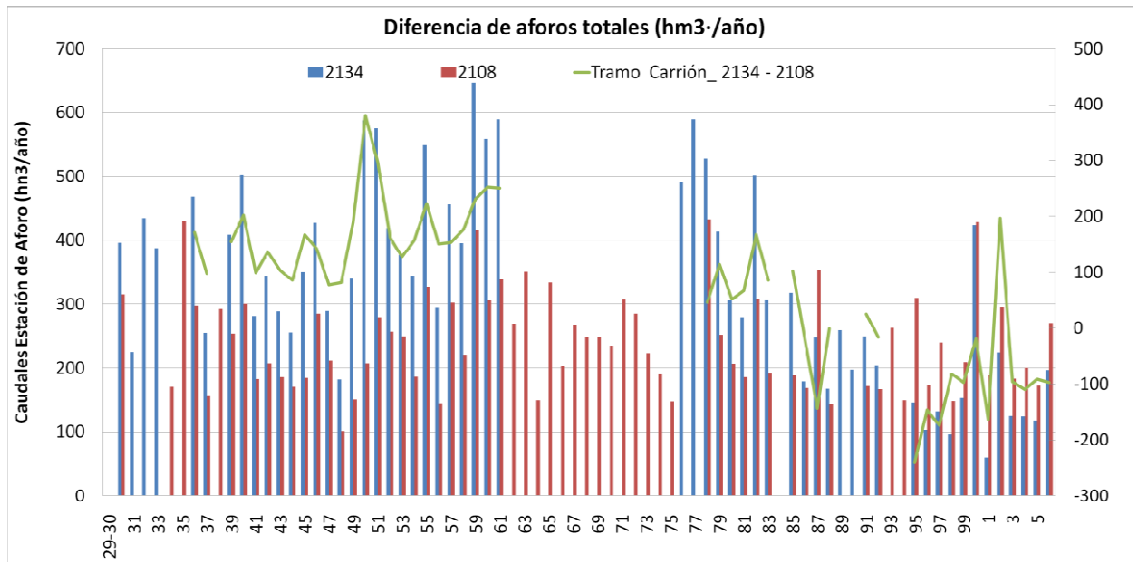


Figura 117: Series de aforos anuales en las estaciones 2134 y 2108 del río Carrión (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

Conclusiones

En base a los resultados anteriores parece que la relación entre el río y el acuífero parece estar en equilibrio, y que no existe intercambio entre ambos.

Es importante también ser consciente de la complejidad del tramo en cuestión, muy alterado por la afección del canal de Villalba y los embalses, y por su ubicación cerca de la cabecera del río, con el consiguiente régimen de precipitaciones que ello conlleva.

Río Arlanza-Tramo 1

Datos disponibles

Aforos

En la Figura 118 se muestra el río Arlanza y las estaciones de aforo sobre el mismo. El tramo 1 está ubicado entre las estaciones 2031 en Peral de Arlanza y 2030 en Covarruvias. Se observan también las MAS sobre las que se asienta.



Figura 118: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1 y 2 del río Arlanza.

Afecciones

	Demandas			Retornos	
	2000080	2000079	Total	2000079	Total
Junio	4.3	5.4	9.7	0.8	0.8
Julio	2.9	4.1	7.0	0.6	0.6
Agosto	0.7	1.0	1.7	0.2	0.2
Promedio	2.6	3.5	6.1	0.5	0.5
Diferencia Total	5.6				

Tabla 18: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Arlanza.

Se tiene información acerca de la detracción de 6 hm³/mes en verano para la satisfacción de las demandas de riego de las zonas Arlanza medio y Arlanza bajo, de las cuales retornan 0.5 hm³/mes.

Resultados restitución

En el periodo estival las diferencias entre los aforos son favorables a la estación de aguas abajo, por lo que en principio el río no estaría cediendo caudal al acuífero, y si cabría la posibilidad de que se diera el efecto contrario. Se aprecia un periodo relativamente constante de unos 20 años con valores en torno a 5 hm³/mes que desciende a partir de 1960 hasta valores en torno al cero, quizá ligeramente negativos, que se mantienen hasta la actualidad.

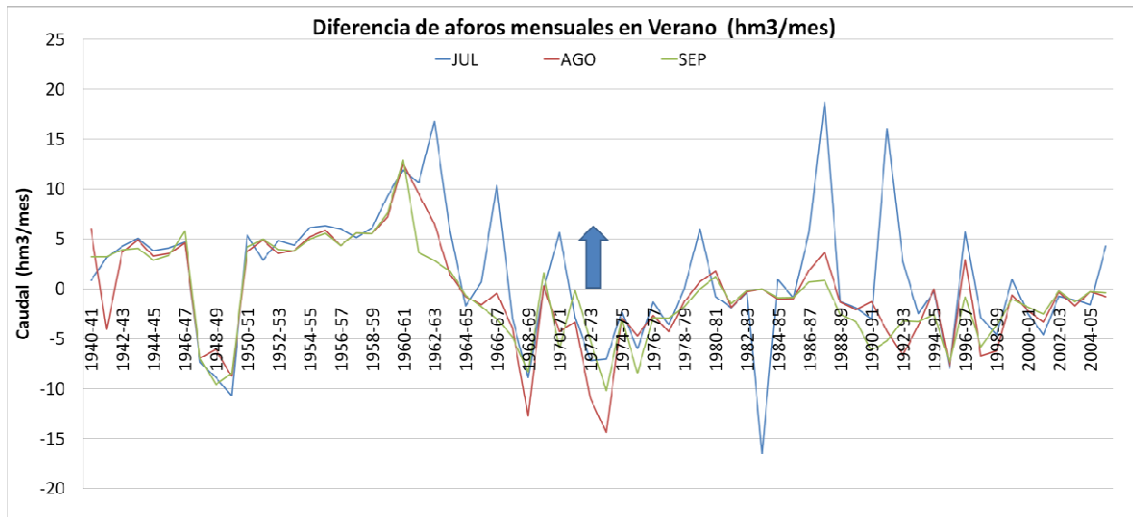


Figura 119: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2031 y 2030 del río Arlanza.

Se concluyó del análisis de afecciones que existe una detracción de 5.6 hm³/mes. A falta de conocer la fecha de comienzo de esta afección, parece que el descenso pudiera estar ocasionado por esta derivación, ya que luego la serie se mantiene constante. La hipótesis anterior no pierde sentido al analizar las diferencias de los meses de invierno (Anexo 3), ya que desaparece este escalón descendente y no se observan estas dos tendencias.

Tanto en la figura que muestra las diferencias de invierno como en la que muestra las diferencias totales anuales (Figura 120) se aprecia un pico brusco en el año 1960. En la última se puede apreciar como este ascenso se justifica en un periodo más húmedo (los datos de aportación subterránea de SIMPA en la MAS Burgos también lo confirman, Anexo 3).

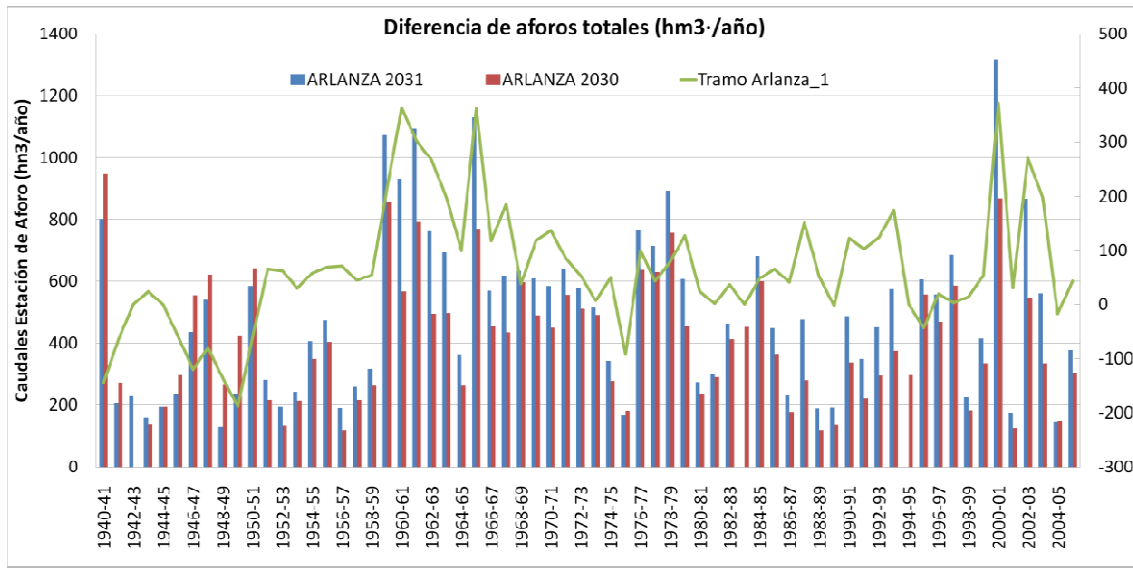


Figura 120: Series de aforos anuales en las estaciones 2031 y 2030 del río Arlanza (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

Por lo demás, en la Figura 120 se observa como la diferencia se mantiene normalmente por encima del cero con picos puntuales de 2 a 5 años como respuesta a fases de mayor precipitación.

Conclusiones

Así pues, las diferencias entre aforos que muestran las series de verano llevan a pensar que el río pudiera estar ganando en torno a 5 hm³/mes de forma relativamente constante.

El caudal medio mensual de la serie aforado en la estación 2031 es de 40 hm³/mes, por lo que una ganancia de 5 hm³/mes supone el 13 % del mismo. Si se calcula el caudal mensual medio con los meses de verano, 6.9 hm³/mes, la ganancia supone en cambio el 71 %, por lo que queda reflejada la importancia del drenaje para el río.

Arlanza-Tramo 2

Datos disponibles

Aforos

Este tramo es el siguiente aguas arriba del anterior, y está delimitado entre las estaciones 2030 y 2028, en Castrovido. Serie de datos para el periodo 1960-2006.

Afecciones

Demandas			Retornos		
DU 3000172	2000078	Total	DU 3000172	2000078	Total

Junio	0.0	1.5	0.0	0.0	0.2	0.2
Julio	0.0	1.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Agosto	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Promedio	0.0	0.9	0.9	0.0	0.1	0.1
<hr/>						
Diferencia Total	0.8					

Tabla 19: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 2 del río Arlanza.

Apenas existen afecciones a lo largo del tramo, y las existentes son de una magnitud muy pequeña, que se puede despreciar.

Resultados restitución

La Figura 121 muestra la serie de diferencias entre los aforos en la época estival. Estas diferencias, salvo en la etapa inicial entre los años 1960 y 1974, donde los valores son mayores, se muestran estables alrededor del cero, en el rango entre -5 y 5 hm³/mes.

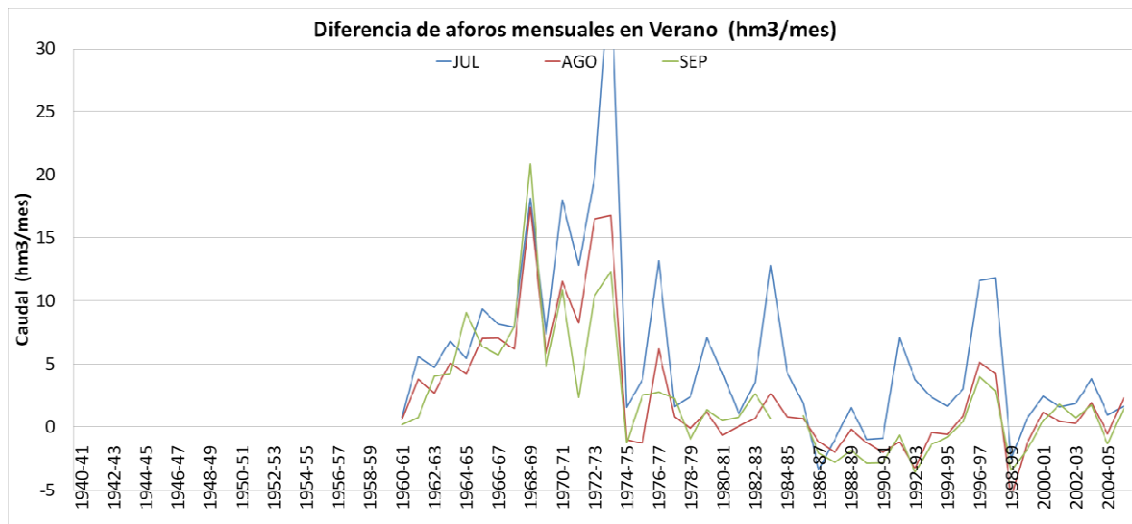


Figura 121: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2030 y 2028 del río Arlanza.

Conclusiones

El análisis anterior pone de manifiesto que no existe intercambio entre el río y el acuífero, dada la oscilación de los valores en torno al cero. Las diferencias mayores se dan entre 1960 y 1974, coincidiendo con una etapa más húmeda, en la que las estaciones de aforo registran mayores caudales. Esto último es si cabe más importante cuando se trata de tramos cercanos a la cabecera del río, como es el caso.

Cabe destacar que los caudales que registra la EA 2028 siguen una tendencia claramente descendente (Anexo 3), lo cual refleja una reducción de la aportación en cabecera. Los de

la EA 2030 también lo hacen, pero de un modo bastante más irregular, principalmente respondiendo de manera más brusca a los episodios de precipitación, véase el dato del año 2000/01.

Conclusiones del análisis de los tramos sobre el estrato de margas

Según los datos y el conocimiento que se tiene de esta zona, a priori sería factible que el río en estos tramos de cabecera se comportara como perdedor, infiltrando agua a los estratos inferiores en contacto con el acuífero terciario. El agua infiltrada circularía por el acuífero profundo para drenar posteriormente en los tramos medios y bajo del Duero.

Según trabajos anteriores desarrollados por el IGME, en el río Arlanza se podría esperar otra situación, ya que aparte del agua que pueda recibir de los estratos cercanos tras la infiltración de lluvia, podría también hacerlo desde los materiales mesozoicos ubicados en la región oriental de la cuenca, zona Ibérica.

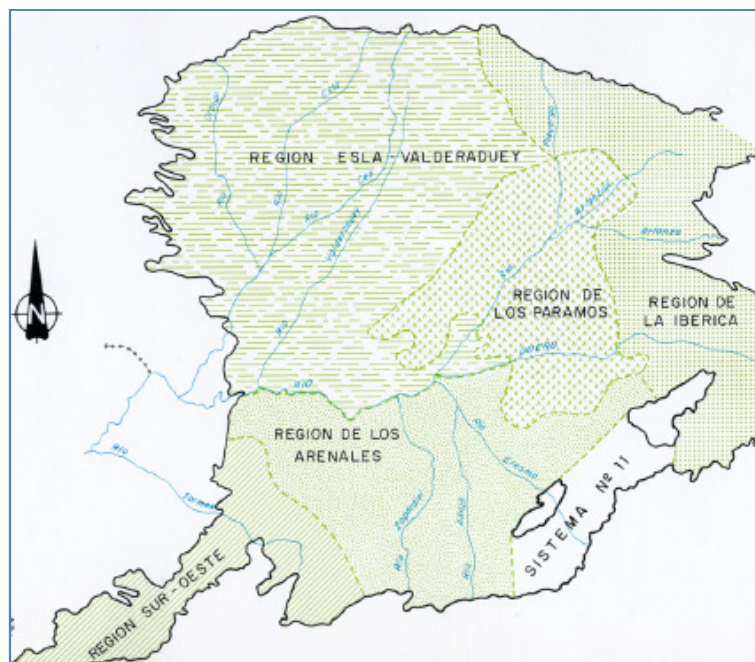


Figura 122: Regiones Hidrogeológicas del Terciario (Fuente: IGME, 1986)

El esquema de flujo que representa el proceso anterior se esquematiza en la Figura 123.

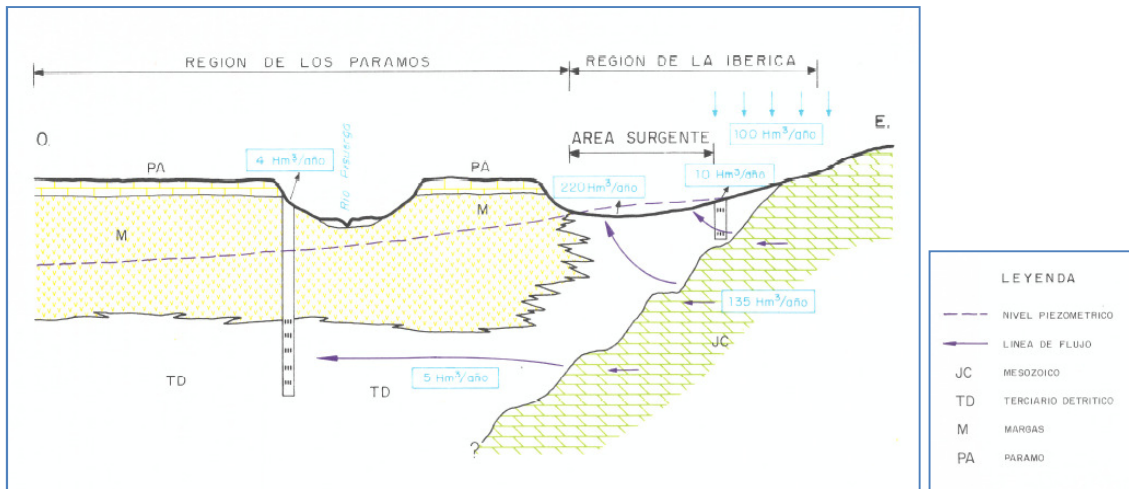


Figura 123: Esquema de flujo de las regiones Ibérica y de los Páramos¹¹ sobre perfil longitudinal. Fuente: IGME (http://aguas.igme.es/igme/publica/lib86/pdf/lib86/in_05.pdf).

Según datos extraídos de la página web de la CHD estima que los materiales del terciario puedan recibir alrededor de 158 hm³ anuales, de los cuales la mayoría drenan a los cauces, y una pequeña proporción lo hace al acuífero profundo bajo los páramos. Los cauces receptores de esta agua serán las cabeceras del Arlanza y del Duero.

Los resultados de los análisis de caudales en las estaciones de aforo no contradicen lo anterior, ya que en los tres tramos del Pisuerga se registran pérdidas leves pero constantes. En el río Carrión el tramo más largo también se ubica al comienzo de la serie en valores negativos, mientras que el otro tramo lo hace ligeramente por encima.

Para el caso del Arlanza en ambos casos las diferencias son generalmente positivas, aunque no resultó tan obvio que el origen de ese caudal fuera subterráneo, y lo más probable es una gran proporción de dicho caudal sea superficial

Conclusiones generales río Pisuerga

Los análisis anteriores arrojan conclusiones en la línea de lo esperado. Fuera del estrato de margas, los tramos altos de los ríos Carrión y Pisuerga (tramos 3, 4 y 5 del Pisuerga, y tramo 2 del Carrión) infiltran de manera constante entre 300 y 400 hm³ anuales, parte de los cuales drenan en el contacto de las margas con el terciario (tramo 2 del Pisuerga), alrededor 150 hm³ anuales, el resto se considera que van al acuífero terciario. En el caso

¹¹La denominación “Región de Los Páramos” y “Región de La Ibérica” que fue utilizada por el IGME en la fecha del estudio se corresponde en la actualidad con las MAS 25, 32, 29, 43 y 44, y MAS 4, 14, 16, 17, 18, 21, 27, 34, 35, 36, 37, 49, 50, 51, 42 y 30, respectivamente.

del Arlanza el río está drenando caudal ligeramente (alrededor de 60 hm³ anuales) del modo en que muestra la Figura 123, algo que se podía apuntar ya en la bibliografía existente.

El resto de tramos ubicados sobre las margas se muestran todos con diferencias positivas de origen superficial, o en torno a cero, de intercambio nulo, de modo que no tienen ninguna influencia sobre el acuífero terciario.

Ríos Riaza y Duratón

Río Riaza

Riaza Tramo 1

Datos disponibles

Aforos

Delimitado por las estaciones de aforo 2036 en el embalse de Linares del Arroyo y la 2009 en Riaza.



Figura 124 Mapa de la zona donde se ubica el tramo 1 del río Riaza.

Se trata del tramo justo anterior a su desembocadura en el río Duero. Discurre sobre la MAS Riaza.

Aguas abajo del embalse, muy cerca de éste se ubica la estación de aforos 2010 en Linares del Arroyo, con serie de datos en el periodo 1928–2007. Esta estación a pesar de tener la serie con mayor longitud que la del embalse, no ha sido utilizada porque tras la entrada en funcionamiento del mismo las diferencias con la estación 2009 cambian bruscamente (ver ejemplo en la Figura 102), y arroja valores que están claramente alterados y no nos sirven. Si se ha utilizado como referencia el periodo 1940-1952 (Recuadro en rojo de la Figura 125), cuando el embalse no estaba construido.

Afecciones

Afecciones sin influencia en el resultado.

	Demandas		Retornos	
	DU 3205	Total	DU 3205	Total
Junio	0.014	0.014	0.002	0.002
Julio	0.014	0.014	0.002	0.002
Agosto	0.013	0.013	0.002	0.002
Promedio	0.014	0.014	0.002	0.002
Diferencia Total		0.012		

Tabla 20: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Riaza.

Resultados restitución

Los valores que muestra la serie de diferencias en los meses de verano son muy pequeños, por debajo de 3 hm³/mes. Tras una etapa más húmeda en las décadas del 50 y 60 donde toma valores más elevados, la tendencia se estabiliza entre -0.5 y 0.5 hm³/mes.

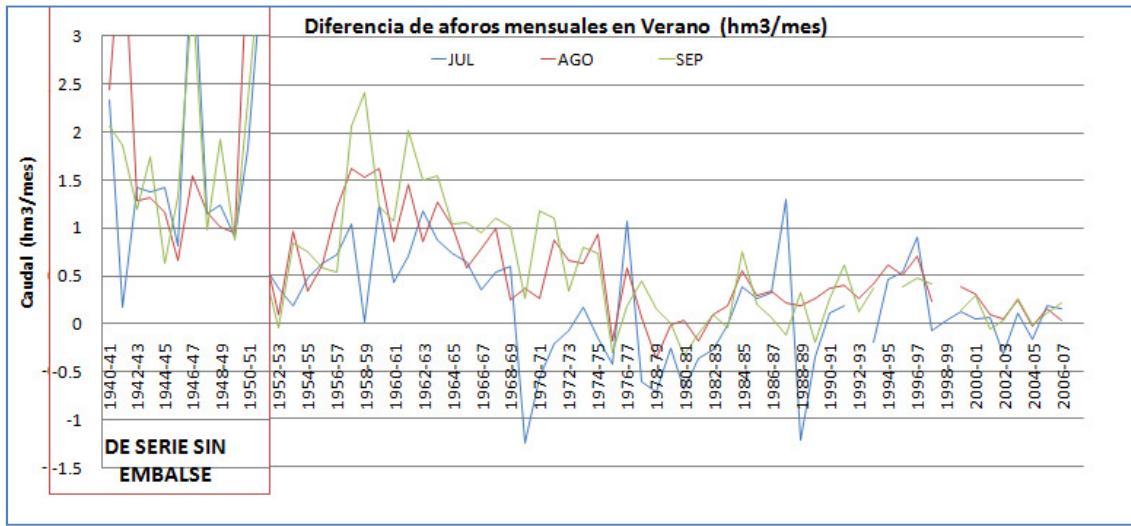


Figura 125: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2036 y 2009 del río Riaza. En el recuadro rojo, diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2010 y 2009 para el periodo 1940-1951.

Para el análisis en los meses de invierno (Anexo 3) los resultados no varían, en este caso con oscilaciones periódicas de mayor magnitud por ser una época de mayor aportación. La tendencia continúa estable en torno al cero. Lo mismo ocurre cuando se representan las diferencias totales anuales. Anexo 3.

Conclusiones

Así pues, y dado que no existe alteración del caudal importante que pueda enmascarar alguna tendencia de los datos, todo parece apuntar a que no existe intercambio de recurso entre el río y el acuífero, o bien que este se sitúa en la actualidad en equilibrio.

Río Duratón

Datos disponibles

Aforos

En la Figura 126 se pueden apreciar los tres tramos que se han delimitado en el río



Duratón.

Figura 126: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1, 2 y 3 del río Duratón.

El primero de ellos que transcurre entre los Páramos de Corcos y de Cuellar, delimitado por las estaciones 2130 en Peñafiel y la 2040 en el embalse de las Vencias. El segundo entre el embalse anterior y el embalse de Burgomillodo, EA 2037. Y

por último el segmento más cercano al nacimiento del río, desde el embalse de Burgomillodo hasta la estación 2012, en Sepúlveda.

Duratón Tramo 1

Datos disponibles

Aforos

Delimitado por las estaciones 2130 y 2040, cuya serie de datos se solapa entre 1977 y 1996

Afecciones

	Demandas				Retornos			
	DP Industrias Piscícolas	DP Truchas	RP 3015	Total	DP Industrias Piscícolas	DP Truchas	RP 3015	Total
Junio	1.840	2.102	4.454	8.396	1.840	2.102	0.668	4.610
Julio	1.840	2.102	3.214	7.156	1.840	2.102	0.482	4.424
Agosto	1.840	2.102	1.210	5.152	1.840	2.102	0.182	4.124
Promedio	1.840	2.102	2.959	6.901	1.840	2.102	0.444	4.386

Diferencia Total	2.515
-------------------------	--------------

Tabla 21: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Duratón.

Existen un par de demandas piscícolas, de las cuales se considera que retorna el 100 %, y una demanda agrícola que consume 2.5 hm³/mes.

Resultados restitución

Lo que muestra la serie de diferencias en los meses de verano (Figura 127) a simple vista es una tendencia descendente desde valores en torno a 10 hm³/mes hasta 2 hm³/mes, en el periodo entre 1977 y 1995. No obstante los valores iniciales de los tres meses de verano en año 1975 se sitúan en 4 hm³/mes, por lo que quizás que los valores elevados en los años siguientes tengan origen en la precipitación de un período más húmedo.

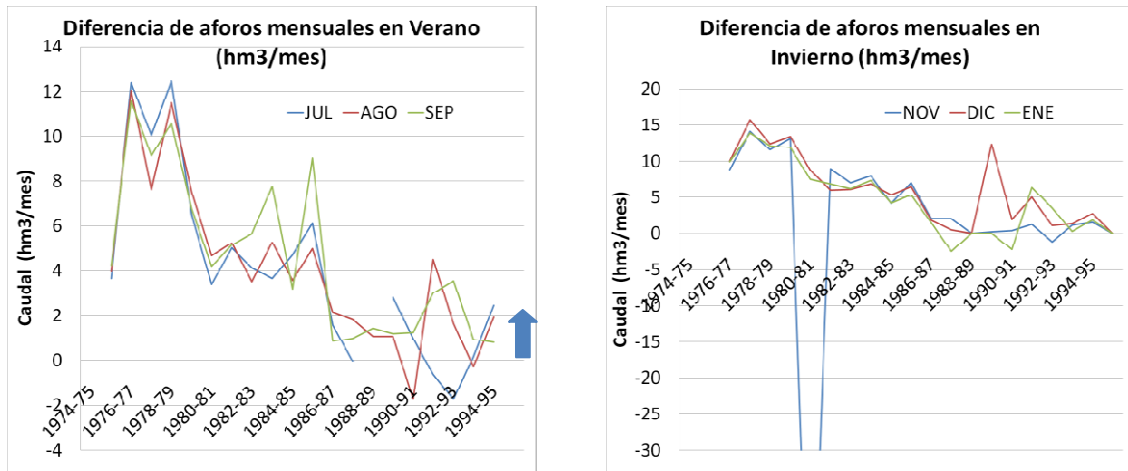


Figura 127: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2130 y 2040 del río Duratón.

Las diferencias en los meses de invierno reflejan la misma tendencia descendente hasta ubicarse en torno al cero. Analizando las diferencias totales anuales la tendencia descendente se mantiene, y se aprecia además que el periodo 1977-1980 es un periodo donde las precipitaciones fueron superiores a la media, de ahí que las diferencias tomen valores mayores.

Conclusiones

Con los datos existentes es complicado hacer un diagnóstico acerca de si existe intercambio entre el río y el acuífero, ya que faltan datos de los periodos actual y anterior al 1974. Además, la parte final de este tramo se ubica en límite sur del paquete de margas del que se habló con anterioridad, de ahí que circula entre los páramos de Cuellar y Corcos. De este modo, el caudal del río está condicionado parcialmente por la descarga de los páramos.

Lo anterior unido a la rapidez con que el río responde a la precipitación, llevan a considerar que no existe intercambio de recurso entre este tramo del río y los materiales del acuífero terciario.

Duratón Tramo 2

Datos disponibles

Aforos

Entre ambos embalses, en las estaciones de aforo 2040 y 2037. La serie de datos se solapa entre 1968 y 2007.

Afecciones

Sin afecciones

Resultados restitución

La Figura 128 muestra las diferencias mensuales de los caudales entre las estaciones de aforo para los meses de verano (derecha) e invierno (izquierda).

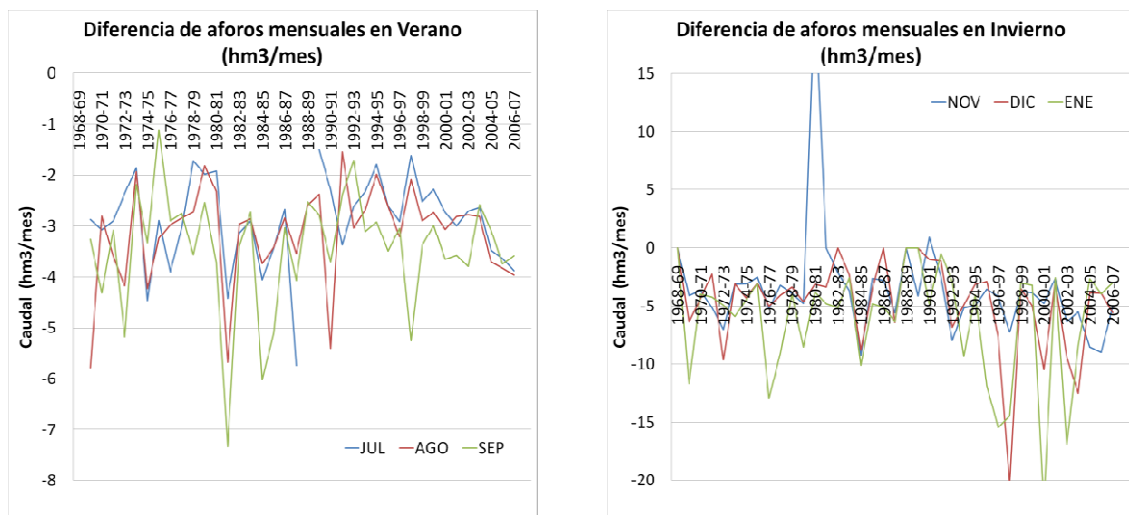


Figura 128: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2040 y 2037 del río Duratón.

Los valores durante el periodo estival se ubican en todo momento por debajo del cero, alrededor del valor -3 hm³/mes. En invierno estos valores siguen por debajo, y toman valores alrededor de -5 hm³/mes. Esta misma tendencia se aprecia analizando las diferencias totales anuales, Anexo 3.

Conclusiones

Dados los valores registrados en los análisis, el río parece comportarse a lo largo de todo el año como perdedor, con valores en torno a 4-5 hm³/mes. La pérdida total anual se sitúa entre -40 y -60 hm³/año. Puede suponerse que estos resultados se corresponden con el escenario alterado, ya que no hay datos anteriores a 1970 para el dato de entradas (aforo 2037). Sin embargo, los datos del aforo de salida (2040) sí son mayores en fechas anteriores a 1970

Ésta pérdida de caudal supone el 15 % del caudal mensual medio que se registra en la estación de aguas abajo, y algo más de dos veces y media de el mismo calculado solo para los meses de verano. Lo anterior es posible al tratarse de un tramo perdedor. Si en cambio se compara con los mismos promedios de la estación aguas arriba se habla de un 55 % del caudal promedio de la serie, y el 103 % si se calcula solo con los valores en verano.

Duratón Tramo 3

Datos disponibles

Aforos

La serie de datos comprende el periodo 1968-2007, y las estaciones de aforo que componen el tramo son la 2037 y la 2012.

Afecciones

	Demandas		Retornos	
	DA 3014	Total	DA 3014	Total
Junio	3.472	3.472	0.521	0.521
Julio	2.719	2.719	0.408	0.408
Agosto	1.074	1.074	0.161	0.161
Promedio	2.422	2.422	0.363	0.363

Diferencia Total	2.058
-------------------------	--------------

Tabla 22: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Duratón.

Resultados restitución

Para el caso del último de los tramos delimitados, en las gráficas se aprecia como los valores de las diferencias mensuales son muy pequeños tanto en verano como en invierno. En el periodo estival (Figura 129) se sitúan alrededor de 1 hm³/mes y en invierno 3 hm³/mes.

Considerando las afecciones, una detracción de agua de 2 hm³/mes, la curva de diferencias de caudales sería ligeramente mayor, igualmente se trata de valores muy pequeños dadas las magnitudes con que se trabaja.

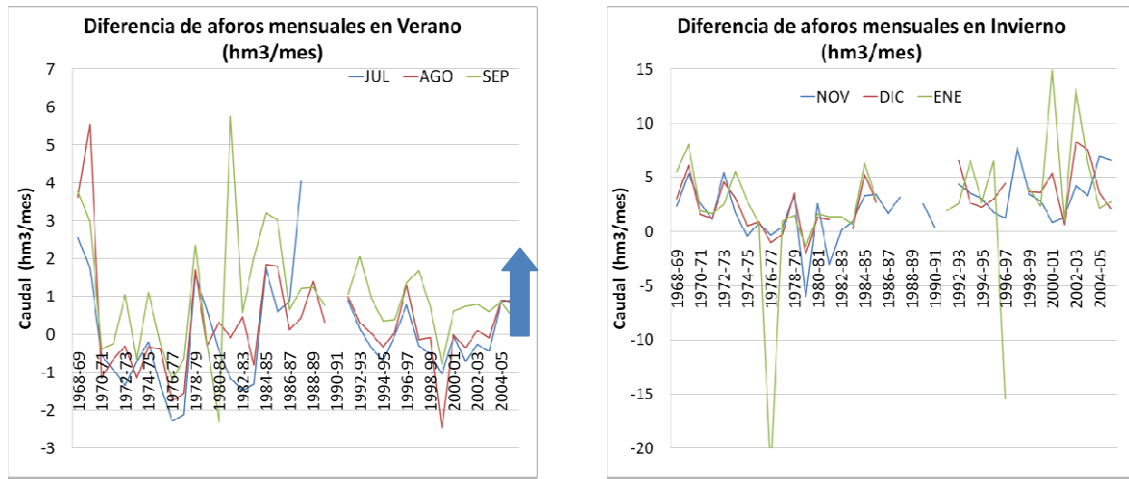


Figura 129: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2037 y 2012 del río Duratón.

La curva con las diferencias totales anuales (Anexo 3) se muestra en la línea de lo comentado anteriormente, en este caso con picos bruscos positivos y negativos.

Conclusiones

La oscilación que muestran las diferencias mensuales en verano, entre -2 y 3 hm³/mes, invitan a pensar que el río en este tramo se mueve en un equilibrio entre la ganancia y la pérdida. Los valores invernales y totales anuales son generalmente positivos por la influencia de la aportación superficial. Dicho lo anterior, parece lo más probable interpretar que no existe intercambio entre el río y los materiales inferiores.

Conclusiones ríos Riaza y Duratón

Del análisis de los Riaza y Duratón se concluye que difícilmente serán determinantes en los resultados finales dados los valores que toman las diferencias, algo que se intuía a priori conocidos los caudales circulantes en ambos ríos.

Al ser ríos relativamente cortos y estar ubicados en cotas altas se corre el riesgo de que los resultados estén condicionados por la influencia de la aportación superficial. Consecuencia de ello las diferencias varían de forma directamente proporcional con la precipitación.

No obstante, se puede apreciar una pérdida de caudal que no responde a procesos de aportación superficial en el tramo medio del río Duratón, que será tomada en cuenta en el balance.

Río Adaja

Datos disponibles

Aforos

Adaja T1: Entre las estaciones de aforo 2046 en Ávila y 2056 en Valdestillas.

Para el análisis del río Adaja se encontró un condicionante importante a la hora de dividir el río en tramos, y es que la ubicación de las estaciones de aforo no era la más idónea, y el registro de datos de cada una tampoco.

En la Figura 130 se muestra el río Adaja con sus afluentes, y las estaciones de aforo ubicadas sobre los mismos.



Figura 130: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1 y 1b del río Adaja.

La idea inicial era llevar a cabo el análisis de los ríos Adaja, Eresma, Voltoya y Moros por separado, pero los datos que se solapan en las diferentes estaciones de aforo no lo permiten.

Finalmente se optó por hacer dos análisis; el primero (T1) usando únicamente los datos de las EA 2056 y 2046 del Adaja, pues cuentan con los registros más largos; en el segundo

(T1b) se utilizan además de los anteriores los datos de las EA 2053 en el Eresma y 2047 del Voltoya, cuya serie solapa a partir de 1964, para eliminar lo ocurrido aguas arriba de estas estaciones.

El primero de los tramos engloba prácticamente toda la cuenca del Adaja incluidos sus afluentes, y nos permitirá observar el comportamiento general desde el año 1930, mientras que en el segundo lo que se pretende es aislar aquellos tramos del Eresma y afluentes que pasan por MAS diferentes a la MAS Los Arenales.

Afecciones

Demandas													Total
UDU 4101 Ávila	DA 4007 ZR Río Adaja	UDU 4102 Arévalo	UDU 4109 Manc. Tierras del Adaja	UDU Segovia: Canal Pontón Alto	UDU Manc. La Atalaya	DA 2000162 RP Río Frío	DA 2000163 RP Río Moros	DU Manc. Mun. Eresma	UDA Eresma Medio (tubería)	UDU Ávila	UDU 4106 El Espinar		
Promedio	1.6	4.9	0.1	0.3	0.5	0.2	1.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	10.4

Retornos												Total	Dif. Total
UDU 4101 Ávila	DA 4007 ZR Río Adaja	UDU 4102 Arévalo	UDU 4109 Manc. Tierras del Adaja	RP Cambrones (Ac.Mayor)	RP Eresma	DA 2000162 RP Río Frío	DA 2000163 RP Río Moros	DU Manc. Mun. Eresma	UDA Eresma Medio (tubería)	UDU 4106 El Espinar			
Promedio	0.2	0.7	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	8.9

Tabla 23: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Adaja.

Las afecciones en este tramo son numerosas, ya que en el caso del tramo 1 se cuenta con numerosos cauces. Finalmente para el análisis que incluye el Eresma y afluentes completos las afecciones ascienden a 8.9 hm³/mes.

Aguas debajo de la estación 2046 se sitúa el Embalse de Castro de Las Cogotas, de 56 hm³ de capacidad, operativo desde 1994.

Resultados restitución

Las diferencias mensuales en verano al comienzo de la serie (Figura 131), a pesar de que existan bastantes años sin registro, se intuyen muy cercanas al cero, ligeramente por encima, hasta valores de 3 a 5 hm³/mes.

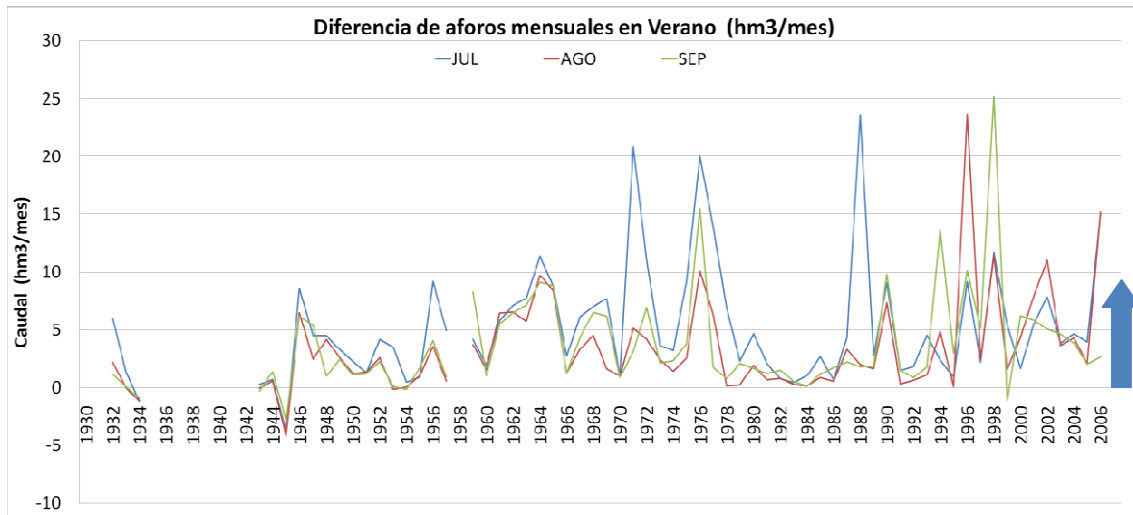


Figura 131: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2046 y 2056 del río Adaja.

En la parte media y final de la gráfica las diferencias se mantienen ligeramente entre 0 y 10 hm³/mes, los cuales serían mayores de considerar las afecciones. Parte del aumento que se da a partir de 1994 puede ser debido a la entrada en funcionamiento del embalse de Castro de Las Cogotas.

En invierno (Anexo 3) los resultados son muy similares, si bien son más comunes los valores negativos puntuales, sobre todo al comienzo de la serie, donde los valores oscilan en el rango entre 10 y -20 hm³/mes.

En los casos anteriores se hace patente un ascenso al comienzo de la década de los años 60, y más notablemente aún en la Figura 132, donde se representan las diferencias totales anuales.

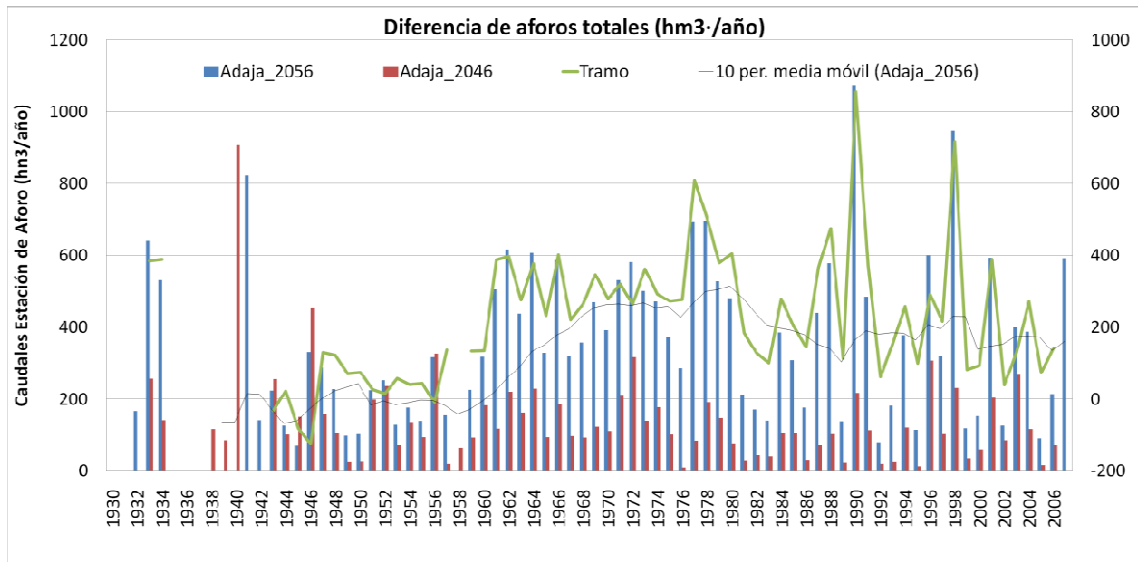


Figura 132: Series de aforos anuales en las estaciones 2056 y 2046 del río Adaja (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

En la misma figura se pueden observar los datos de aforo en ambas estaciones, y apreciar claramente como ese ascenso se corresponde con un periodo bastante más húmedo, donde se registran los mayores caudales de toda la serie. Cuando finaliza ese periodo las diferencias también descienden, ubicándose en torno a los 100-150 hm³/año.

A priori sería imprudente justificar los 100 hm³ anuales como una cesión del acuífero al río, sobre todo cuando se están analizando las diferencias totales anuales, y también tratándose de una superficie tan grande que incluye zonas de cabecera donde se registran precipitaciones más cuantiosas y estables a lo largo del año. Además, los valores que se registran al comienzo de la serie no sugieren ningún tipo de ganancia de recurso, por lo que se considera que no existe intercambio.

Adaja T1b

Datos disponibles

Aforos

Aparte de las estaciones anteriores, se hace uso de las estaciones 2053 en Bernardos y 2047 en Mediana de Voltoya.

En teoría, una de las principales variaciones con respecto al tramo 1 sería que los valores de la serie de diferencias mensuales deberían ser inferiores, ya que se están suprimiendo en este análisis los tramos de cabecera, donde se registran las mayores aportaciones.

Afecciones

Demandas							
UDU 4101 Ávila	DA 4007 ZR Rio Adaja	UDU 4102 Arévalo	UDU 4109 Manc. Tierras del Adaja	DU Manc. Mun. Eresma	UDA Eresma Medio (tubería)	UDU Ávila	Total
Prom.	1.6	4.9	0.1	0.3	0.3	0.3	7.8

Retornos							
UDU 4101 Ávila	DA 4007 ZR Rio Adaja	UDU 4102 Arévalo	UDU 4109 Manc. Tierras del Adaja	DU Manc. Mun. Eresma	UDA Eresma Medio (tubería)	Total	Dif. Total
Prom.	0.2	0.7	0.0	0.0	0.0	1.1	6.7

Tabla 24: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1b del río Adaja.

En este caso las afecciones son menores con respecto al tramo inicial, ya que en este caso se incluyen el río Eresma y sus afluentes solo parcialmente. La afección total se cuantifica en 6.7 hm³/mes.

Resultados restitución

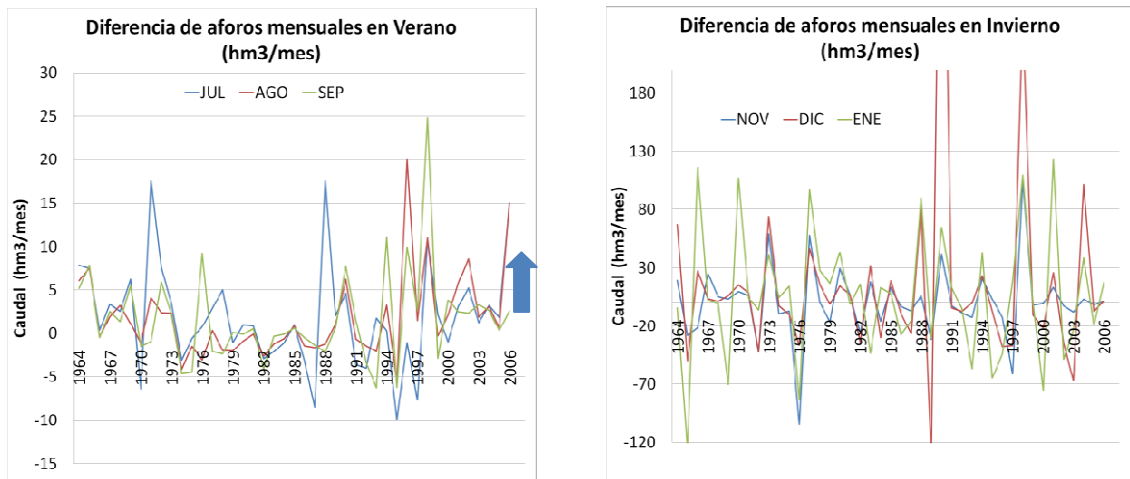


Figura 133: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2046 y 2056 del río Adaja.

En efecto, lo que más llama la atención es que se produce un descenso generalizado de las diferencias entre los datos de aforo. Para la época estival (Figura 133, izquierda) las diferencias oscilan entre 5 y -5 hm³/mes, ubicándose mayoritariamente a lo largo del cero, que marca el equilibrio. Se hace patente el ascenso de los niveles a partir de 1994, con la entrada en funcionamiento del Embalse Castro de las Cogotas. La presencia del embalse podría a su vez justificar el abastecimiento del regadío para el cual se extrae agua del río.

En invierno (derecha) la oscilación aumenta, y el rango se amplía hasta +/- 100 hm³/mes, con una tendencia central alrededor del cero.

En la Figura 134 se representan las diferencias anuales totales. Los resultados son coherentes con los mensuales, mostrando oscilación por encima y por debajo del cero.

Como se apuntó en el análisis del tramo 1, el periodo comprendido entre 1960 y 1980 es más húmedo, y eso queda reflejado en las diferencias entre aforos. Tras ese periodo se puede apreciar como las diferencias totales anuales también descienden ubicándose en valores negativos, salvo años puntuales con picos positivos muy bruscos. Según esto, la diferencia positiva de 100-150 hm³ anuales que se apuntó en el análisis T1 sería justificable fundamentalmente en base al régimen de precipitaciones.

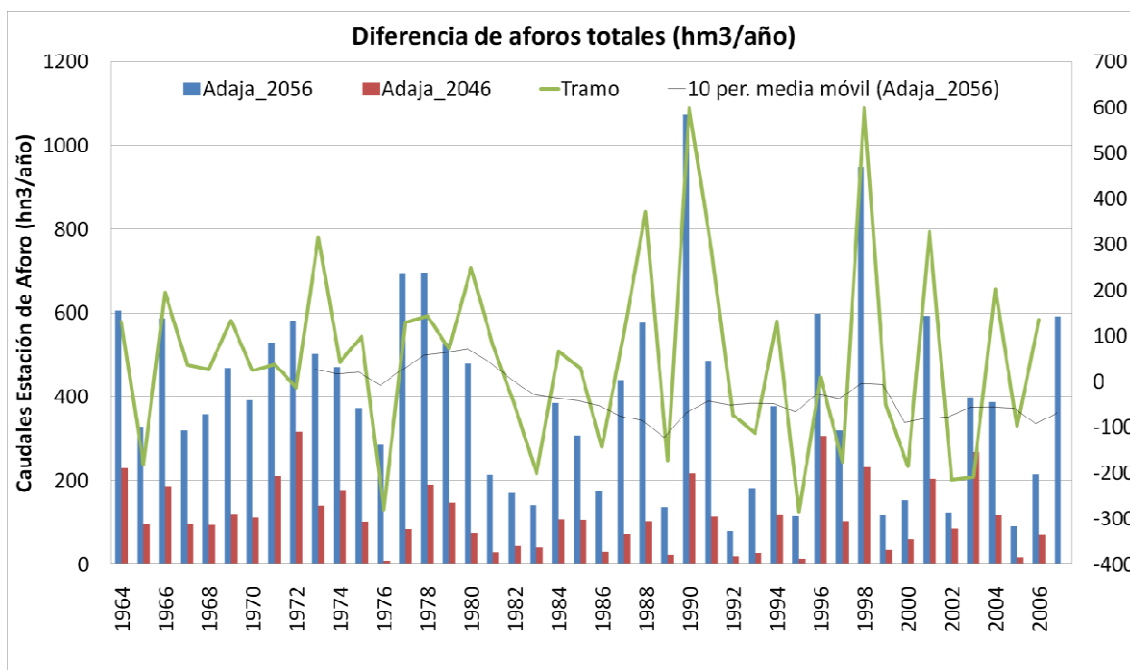


Figura 134: Series de aforos anuales en las estaciones 2056 y 2046 del río Adaja, tramo 1b, (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

Conclusiones Adaja T1 y T1b

Es importante tener en cuenta que en este análisis se está trabajando con una superficie muy grande, y que las conclusiones que se puedan sacar no deben ser muy rotundas debido al alto grado de incertidumbre. En cualquier caso, el efecto del embalse de Castro de las Cogotas parece claro, y en el periodo anterior no parece haber ganancias ni pérdidas del río. Queda la duda de si el río pudiera comportarse como ganador en el periodo anterior a 1965, donde las precipitaciones son considerablemente mayores.

El análisis en este tipo de tramos es complejo por la gran superficie con que se trabaja y por la falta de datos. Por ello, a pesar de que en el tramo en su conjunto no se puedan apuntar ganancias o pérdidas de gran magnitud, es muy probable que a una escala inferior haya tramos que se comportan como ganadores y otros como perdedores, cuyos efectos se compensan unos con otros.

Río Guareña

Datos disponibles

Aforos

Por la margen izquierda del río Duero, a la altura de Toro desemboca el río Guareña, que circula caudales muy pequeños. El río dispone de tres estaciones de aforo; 2129, 2128 y 2127, de las cuales tan solo la 2129 dispone de una serie de datos completa. Las otras dos tienen un registro inferior a los 26 años en la 2028 y a los 20 en la 2127.

Afecciones

Sin afecciones a falta de localizar demanda DA 2000103 RP Río Guareña, que detrae 0.13 hm³/mes en verano, lo cual no modifica los resultados del análisis.

Resultados restitución

En la Figura 135 se muestran las diferencias mensuales durante la época estival y las totales anuales entre las estaciones de aforo 2129 y 2128.

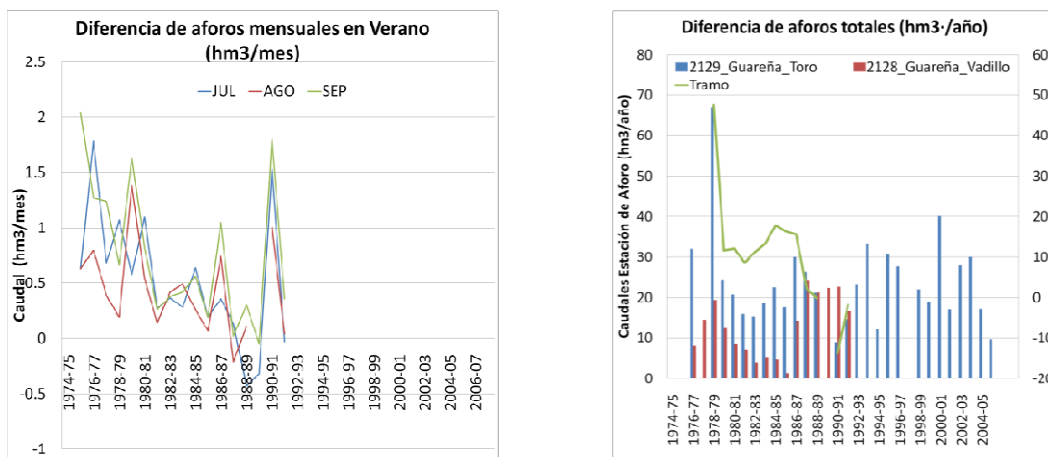


Figura 135: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) y serie de aforos anuales (derecha) entre las estaciones de aforo 2129 y 2128 del río Guareña.

En la época estival la diferencia entre caudales es muy pequeña, y aparentemente no sigue ninguna tendencia, con valores oscilantes entre -0.5 y 2 hm³/mes. Las diferencias totales anuales valores oscilan fuertemente entre años húmedos y secos, tomando valores tanto positivos como negativos, también sin tendencia aparente.

Conclusiones

De los análisis realizados se pueden sacar pocas conclusiones, ya que son pocos los datos disponibles y además los caudales son muy pequeños, por lo que las diferencias entre ambos son despreciables considerando la magnitud de los caudales del resto de ríos.

Río Tormes

Según los conocimientos previos que se tiene de esta zona, el comportamiento de la MAS Salamanca, sobre la que se asienta el río Tormes, es diferente según la profundidad a que se analice. Aparentemente, los materiales inmediatamente por debajo del río podrían seguir la dirección del flujo superficial de los ríos, y en los materiales más profundos (son la continuidad hacia el noroeste de los materiales de las MAS Tierra del Vino y Medina del Campo) el flujo en esta MAS sería de dirección NO-SE.

En función a este planteamiento cabría esperar que en el río Tormes no se den intercambios considerables de agua. No obstante, si los resultados del análisis por tramos en esta zona muestran ganancias del río, implicaría que no toda la infiltración de esta zona se dirige hacia el Duero, y habría de ser descontado de la recarga.

Los resultados del análisis se encuentran en el Anexo 3. A continuación se exponen las conclusiones del mismo.

Conclusiones

Las diferencias negativas que se aprecia en los meses de verano pueden llevar a pensar que el río está cediendo caudal, no obstante, al considerar las afecciones estas diferencias se ubican alrededor del cero, mínimamente por debajo, por lo que se considera que no existe ganancia del río.

Río Esla

Los análisis que se exponen a continuación, así como diversos trabajos bibliográficos revisados apoyan la hipótesis de que el flujo del terciario bajo la cuenca del Esla hacia el Duero es muy limitado. De este modo, en estado natural, de acontecer pérdidas de caudal en el río, cabría esperar que éstas queden dentro del sistema drenando posteriormente aguas abajo dentro del propio río.

Para el análisis del río Esla se ha llevado a cabo una división del mismo en 3 tramos, Figura 136.

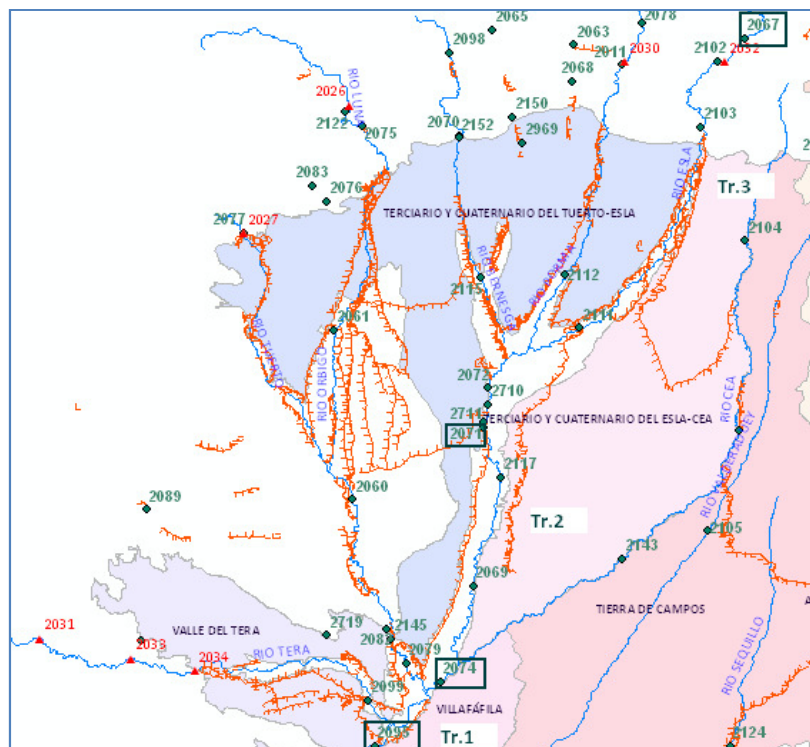


Figura 136: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1, 2 y 3 del río Esla y el tramo 1 del río Cea.

El análisis se centra entonces en confirmar lo anterior, por lo que se buscan series largas para observar el régimen natural del mismo, y se obvian las detracciones de caudal ya que la mayoría no existen para ésta época.

Los resultados del análisis se muestran en el Anexo 3. A continuación se presentan las conclusiones de los mismos.

Conclusiones

Con los resultados del análisis de aforos en el río Esla se puede apuntar que durante la época estival el río no está infiltrando ni drenando agua que salga de los límites de la propia cuenca. En invierno la mayoría de las diferencias entre los aforos son positivas, y

también lo son los totales anuales. Estas diferencias además responden de manera proporcional a las variaciones climáticas, aumentando en periodos húmedos y descendiendo en periodos más secos. No parece muy probable entonces la idea de que exista una ganancia clara del acuífero terciario por infiltración en el río que pudiera salir de la propia cuenca subterránea del Esla.

Relación entre la cuenca del Esla y el resto de materiales del acuífero terciario

En la línea del análisis anterior se plantea ahora un razonamiento para profundizar en la relación de la cuenca del Esla con el resto de materiales terciarios del acuífero.

En la bibliografía consultada, con respecto a la circulación general del agua en la cuenca del Duero, se describe un flujo general dirección N-S desde la cabecera hacia los tramos bajos de Esla. No obstante de cara a la realización del balance interesa conocer si existe un flujo importante desde esta zona en dirección SE o E que vaya a desembocar al tramo final del Duero (lo que se denominó tramo 9, entre EA 2062 y 2066). De ser así, este flujo debería ser considerado.

Para conocer más acerca de lo anterior se recurre a analizar la información disponible acerca de la MAS Villafáfila, por donde debería atravesar dicho flujo (ver mapa de la Figura 136), ya que en la última parte de su recorrido el Esla circula por los materiales impermeables de la MAS Aliste.

Según la CHD, el contacto de la MAS de Villafáfila con la MAS Tordesillas, al SE, es semipermeable. Éste contacto además tiene su límite superficial en el río Valderaduey, bajo el cual los espesores del terciario son pequeños con respecto al resto de la cuenca (100-200 m). Se podría pensar entonces que el Valderaduey pudiera recibir gran parte del flujo que lleve dirección SE, disminuyendo la cantidad de recurso que pudiera drenar finalmente al Duero. Como se verá en análisis posteriores, las ganancias que se aprecian en el río Valderaduey son ínfimas con respecto a las del Duero en el tramo final, lo cual no parece apoyar la presencia de un flujo considerable en ese sentido.

Al mismo tiempo, según datos obtenidos del sistema de información de la CHD, MIRAME, (www.mirame.chduero.es/DMADuero_09/index.faces), no se considera ninguna transferencia entre estas MAS. Por otro lado, dichos datos tasan la recarga media anual la MAS Villafáfila en 30 hm³/año (34 hm³ de recurso disponible considerando retornos), por lo que de considerar que existe un contacto directo y exclusivo entre las MAS Villafáfila y Tordesillas dicha transferencia resultaría casi despreciable dados los volúmenes de agua considerados en esta parte final del Duero.

Río Cea

El río Cea nace muy cerca del Esla y desemboca en el mismo a la altura de la estación de aforos 2074 en Castropepe. Supone el límite entre las MAS Tierra de Campos y Terciario y Cuaternario del Esla-Cea, dos MAS que son a su vez el límite entre la zona considerada para el balance. Por eso mismo se ha separado del análisis del Esla, por su ubicación estratégica y por los resultados del análisis, que se presentan a continuación:

Datos disponibles

Aforos

En el tramo 2 del río Esla ya se incluye todo el río Cea, pues no se utilizan los aforos de la estación 2143 para restituir. No obstante, dada su ubicación en el límite con otros cauces que descargan en el Duero, parece interesante la información que pueda arrojar el análisis acerca del comportamiento del río.

Se han utilizado para el análisis del río los datos de las estaciones de aforo 2104 y 2143, ubicadas en Almanza y Castrobol, respectivamente.

Resultados restitución

Las diferencias mensuales en verano se muestran en el gráfico de la izquierda de la Figura 137. La serie se extiende desde el año 1975 hasta el 2008. Al comienzo de la misma los valores son pequeños y se ubican entre 0 y -5 hm³/mes. A partir de 1994 ascienden hasta los 8-10 hm³/mes.

Si se consideran las afecciones que acontecen a lo largo del tramo de río (demandas, retornos de los Canales Alto y Bajo de los Payuelos, y salida del Canal Cea-Carrión), ingresa en el río alrededor de 18 hm³/mes en verano. A falta de datar el comienzo del funcionamiento de estos canales y sus reglas de explotación, las diferencias en verano deberían descender hasta colocarse en valores negativos, alrededor de 5-10 hm³/mes.

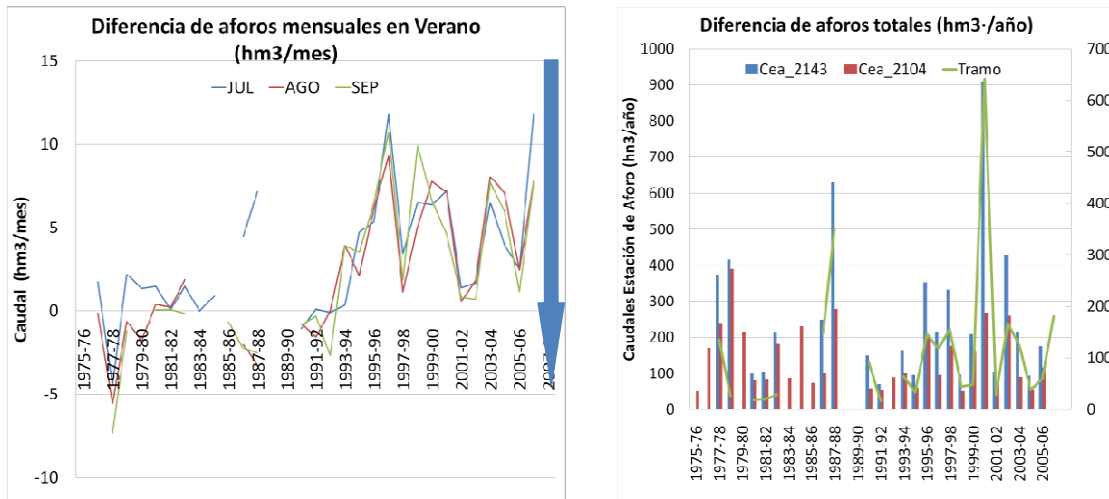


Figura 137: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) y serie de aforos anuales (derecha) entre las estaciones de aforo 2143 y 2104 del río Cea.

En la gráfica de la derecha se muestran los totales anuales, que toman un valor medio aproximado de 100 hm³ anuales, con ascensos puntuales ascendentes en años más húmedos. Se puede intuir también como las diferencias aumentan ligeramente los últimos 20 años.

Conclusiones

Se puede concluir entonces que es un tramo donde sería probable que el río pudiera estar infiltrando una pequeña parte del agua que transporta, un valor en torno a 5 o 10 hm³/mes., no obstante el régimen está muy influenciado por la las afecciones de los canales.

Río Valderaduey

Datos disponibles

Aforos

Las estaciones de aforo ubicadas en el río Valderaduey no disponen de una serie de datos completa y homogénea para su estudio. Por ello se ha tenido que llevar a cabo un procedimiento escasamente riguroso pero que puede ser útil para el análisis, como es juntar las series de datos de las estaciones de aforo 2064 en Villagodio con la 2148, muy cercana a la misma. La primera de ellas registra datos en el periodo 1968-2000, y la segunda lo hace a partir del año 2000. Con estas estaciones y la de aguas arriba en Villárdiga, 2126, se delimita el tramo. Se utiliza también la estación 2124 en Medina de Rioseco, ubicada sobre el río Sequillo, para aislar los caudales del mismo.



Figura 138: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 1 del río Valderaduey.

Trabajar con los datos juntos de dos EA diferentes para el estudio no tiene porqué implicar alteraciones de las conclusiones del análisis, ya que se ubican muy cerca (Figura 138) una de la otra y recogen caudales muy similares. No es riguroso pero es válido.

Afecciones

Sin afecciones considerables, sólo algún retorno de pequeña entidad, que no influye en los resultados.

Resultados restitución

La Figura 139 muestra las diferencias mensuales en verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo anteriormente comentadas.

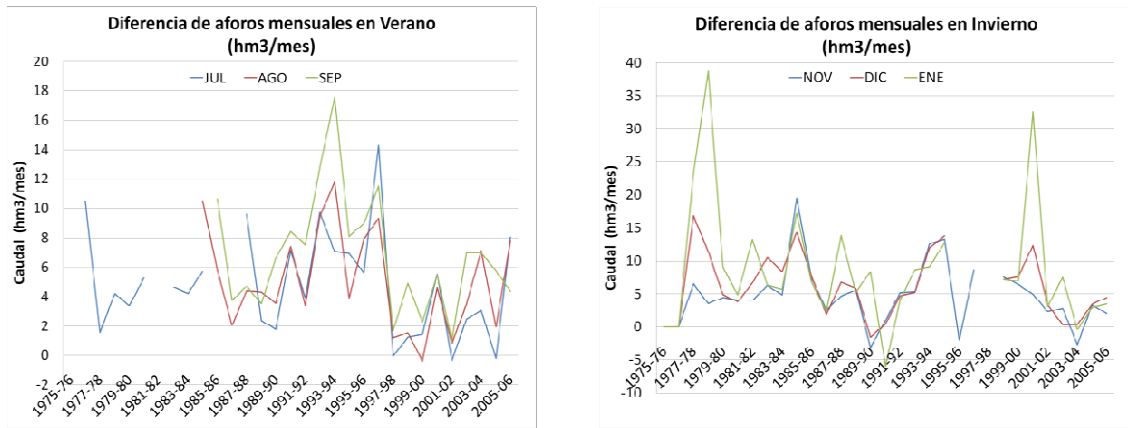


Figura 139: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2064 y 2126 del río Valderaduey.

En ambos casos se aprecian valores generalmente por encima del cero, con años puntuales donde éstos bajan hasta valores mínimamente negativos. En verano los valores oscilan alrededor de 4 hm³/mes y en invierno entre 0 y 15 hm³/mes. Tanto en verano como en invierno se observan ascensos y descensos bruscos puntualmente.

En cualquiera de los casos, considerando el valor de diferencias en verano más veraz por la menor probabilidad de alteraciones por aportación superficial, se podría considerar que el río podría estar drenando agua en cantidades muy pequeñas y de forma intermitente.

Conclusiones

Como se comentó anteriormente el Valderaduey supone el límite superficial entre las MAS Villafáfila y Tordesillas, bajo el cual pudiera existir un flujo subterráneo desde el Esla hacia el Duero. Según los resultados de los análisis anteriores no parece existir ese flujo en grandes volúmenes, y los valores de descarga del río son muy pequeños sino nulos con respecto a los que acontecen en el tramo final del Duero.

Río Duero

Los resultados de los análisis de aforos para los 6 primeros tramos del Duero se presentan en el Anexo 3, ya que están ubicados en zonas donde apenas se dan las extracciones, por lo que no resultan prioritarias en el estudio.

A continuación se presenta la delimitación y las conclusiones de estos tramos.

En líneas generales se podría asumir que el intercambio de agua en el río en estos tramos es prácticamente nulo. En aquellos tramos que circulan sobre materiales terciarios tan solo se registran ganancias en el tramo 3 que se infiltran posteriormente en el tramo 4.

Los tramos 1 y 2 discurren sobre los materiales mesozoicos de la cordillera Ibérica, por lo que los intercambios que acontecen en los mismos no están directamente relacionados con el acuífero terciario.

Duero Tramo 1

Ubicado entre las estaciones 2001 en el embalse de Cuerda del Pozo y la 2101, en Molinos de Duero.

Conclusiones

Por la escasa longitud del tramo no cabe esperar un gran intercambio, aunque se podría pensar que dado que en un tramo tan corto se observan ligeras pérdidas, sería factible que la continuación del mismo hasta su nacimiento se comportara de forma similar. No obstante sería necesario estudiar más concretamente la situación para poder afirmar lo anterior. Con los datos disponibles lo más prudente es decir que no está existiendo un intercambio de agua significativo.

Duero Tramo 2

Datos disponibles

Aguas abajo del anterior, delimitado por las estaciones 2002 y 2001, en el Embalse de Cuerda del Pozo.

Conclusiones

Se podría afirmar que el río está ganando agua, entre 5 y 15 hm³/mes, de los cuales, según los resultados del modelo SIMPA, entre 3 y 5 hm³/mes se podrían justificar con la aportación superficial, que es menos rara al tratarse de un tramo de cabecera. Así pues, se trata de un valor medio entre 8 y 12 hm³/mes.

Esta descarga supone entre el 40 y el 45 % del caudal mensual medio de la serie de datos registrado en la estación de aforos 2002 en Garray (25-30 hm³/mes).

En este tramo el río se ubica sobre formaciones mesozoicas de calizas más transmisivas situadas en cotas altas, y con nivel freático alto, por lo que la ganancia es comprensible. De cara al balance, las ganancias ocurridas en los tramos de río ubicados sobre las formaciones calizas que bordean el acuífero terciario no se considerarán. Si serán consideradas las pérdidas, pues éstas acaban drenando de un modo u otro al acuífero terciario.

Duero Tramo 3

El tramo 3 del río Duero es el primero que se asienta en su totalidad sobre los materiales detríticos pertenecientes al acuífero terciario. Está delimitado por las estaciones de aforo 2004 y 2002. La altura media de este tramo se sitúa en torno a 900 m.s.n.m. aproximadamente, lo cual es significativo ya que las precipitaciones en los meses de verano son mucho más frecuentes y en los meses de invierno mucho más cuantiosas.

Por otro lado se conoce del escaso desarrollo de las extracciones subterráneas en las zonas de cabecera, por lo que las ganancias y pérdidas de caudal serán en muchos casos directamente achacables a factores climáticos o antrópicos (detracción para demandas, presas...)

Conclusiones

De los análisis se obtienen principalmente dos resultados; el primero que el río parece estar ganando caudal, ya que las diferencias son en todo momento positivas con valores entre 20 y 40 hm³/mes; el segundo que desde los años 40 hasta la actualidad se podría haber producido un descenso de este drenaje de valores medios de 40 a valores de 20 hm³/mes.

Con respecto al primero de los resultados, simplemente cabría matizar que esta cifra entre 20 y 40 hm³/mes podría estar bastante condicionada por el efecto del embalse de Cuerda del Pozo y por la aportación superficial, ya que se observa cómo a partir del año 1941 el río registra un caudal considerablemente mayor que durante la primera década. De este modo los valores habrían de ser inferiores, entre 5 y 20 hm³/mes.

Acerca de la tendencia descendente desde el año 1941 hasta la actualidad, analizando los valores de caudal registrados en la EA 2004 se observa que estos decrecen hasta la actualidad, de modo que se podría explicar en su mayoría por el descenso generalizado en

las aportaciones. Si además se consideran las afecciones externas habría que sumar 8 hm³/mes a las diferencias en la época estival. Por todo lo anterior esta tendencia descendente no se relaciona con la descarga del acuífero.

El caudal mensual medio de la serie calculado en la estación 2004 es de 54.2 hm³/mes, sobre el cual la ganancia del río estimada supone un 23 %. Sobre el mismo caudal calculado solo con los valores de verano el porcentaje asciende al 29 %. En ambos casos supone un porcentaje considerable.

Duero Tramo 4

El tramo 4 es de gran longitud, está delimitado las estaciones de aforo 2013 y 2004 en Gormaz. Recoge las aguas del Río Ucero-Chico por su margen derecha (restitución con EA 2005). En el transcurso del tramo hay varias estaciones de aforo, como son la 2908, 2007 y la 2017, que no han sido utilizadas por que la serie solapada entre estaciones era inferior.

Conclusiones

En este caso parece lo más prudente apuntar que río y acuífero se encuentran en equilibrio prácticamente todo el año, no existiendo intercambio de agua entre ellos. Cabe también la posibilidad de que en la época estival el río pueda ceder caudal mínimamente, sobretodo en épocas más secas. El valor medio anual de la infiltración en estas épocas se situaría en valores muy pequeños, inferiores a 5 hm³/mes.

Como se comentó en el apartado de aforos, a lo largo del tramo 4 se encuentran las estaciones de aforos 2007 y 2017, ubicadas en San Esteban de Gormaz y entre San Esteban y Navapalos, respectivamente. La primera de las estaciones dispone de una serie de datos larga (1910-1990), y permiten conocer algo más del comportamiento de este tramo en su parte alta durante los primeros años, complementando así el análisis del tramo 4. El subtramo delimitado por las estaciones de aforo 2007, 2004 y 2005 recibe el nombre de tramo 4b. Los resultados del análisis de tramo 4b se muestran en el Anexo 3. De ellos se concluye que salvo en las primeras dos décadas donde se aprecian diferencias mayores, desde un punto de vista cualitativo la tendencia media de las series de diferencias se corresponde a grosso modo con los resultados obtenidos en el tramo 4, con valores en torno al equilibrio y saltos bruscos positivos y negativos. Se concluye entonces que no existe intercambio de recurso en este tramo.

Duero Tramo 5

El tramo 5 se sitúa entre las estaciones de aforo 2132 y 2013 en Aranda de Duero, y recibe la entrada por la margen izquierda de los ríos Duratón y Riaza. Para aislar el tramo del Duero de los caudales aportados por estos ríos se utilizan los datos de las estaciones de aforo 2130 y 2010 de los mismos.

Conclusiones

El tramo parece comportarse ligeramente como perdedor, muy cerca del equilibrio (valores entre 0 y -10 hm³/mes) entre los años 1977 y 1987 y luego asciende hasta valores generalmente entre 0 y 10 hm³/mes, llegando hasta 20 hm³/mes al considerar las afecciones.

Dado que parte de su recorrido final transcurre sobre el límite Sur del paquete de margas, no cabe esperar intercambio de recurso con el acuífero terciario. El porqué de esta tendencia ligeramente ascendente no se puede explicar por las afecciones externas. Una causa factible es que dado que el río circula entre los páramos de Corcos, Cuellar y Esgueva, la ganancia que se aprecia en el periodo actual tiene origen en la descarga de los mismos.

Duero Tramos 6 y 6b

Para el estudio del tramo 6 se han llevado a cabo dos análisis debido a que las series no eran lo suficientemente largas como para comparar el régimen no influenciado con el actual. La estación 2015 consta de una serie de datos desde el año 1912 hasta el 2007, la 2014 desde 1920 hasta 1976, y la 2132 desde 1976 hasta 2007. Como la estación 2014 y la 2132 son cercanas, se ha utilizado la primera de ellas para el análisis hasta el año 1976 (tramo 6) y la segunda hasta el 2007 (Tramo 6b), pudiendo de este modo completar la serie.

Conclusiones

En líneas generales, se puede afirmar que las diferencias se mueven en torno al cero, lo cual se interpreta como que a lo largo de este tramo el intercambio entre el río y el acuífero parece ser nulo. Además, el hecho de que no exista ninguna diferencia grande entre las diferencias de los tramos 6 y 6b, en cierta parte corrobora la idea de que el intercambio sea nulo o no exista conexión, ya que éste no se está comportando en función de la longitud del tramo (a mayor longitud hay mayor superficie de contacto y cabe esperar más intercambio).

El análisis es coherente entonces con la descripción geológica, ya que al igual que ocurre con el tramo 5, este tramo del Duero se ubica sobre el límite Sur del paquete de margas impermeables en el que se asientan los páramos, por lo que no debería existir intercambio con el acuífero profundo.

Duero Tramo 7

Datos disponibles

Aforos

El tramo 7 está acotado en el río Duero por las estaciones 2054, en Villamarciel y la 2015, en Herrera de Duero. Recibe por la margen derecha las aguas del río Pisuerga (se restituye con los aforos de la estación 2043 en Cabezón de Pisuerga y la 2044 del río Esgueva), y por la margen izquierda recibe a los ríos Adaja y Pirón. Los caudales del Adaja se restituyen con la estación 2056 en Valdestillas. En el caso del Cega y el Pirón se optó por no restituir ya que los registros de datos limitaban el análisis, y se consideró entonces de mayor utilidad conocer los resultados estando los dos cauces incluidos completamente.

La Figura 140 muestra el mapa con las estaciones utilizadas en el análisis (azul).

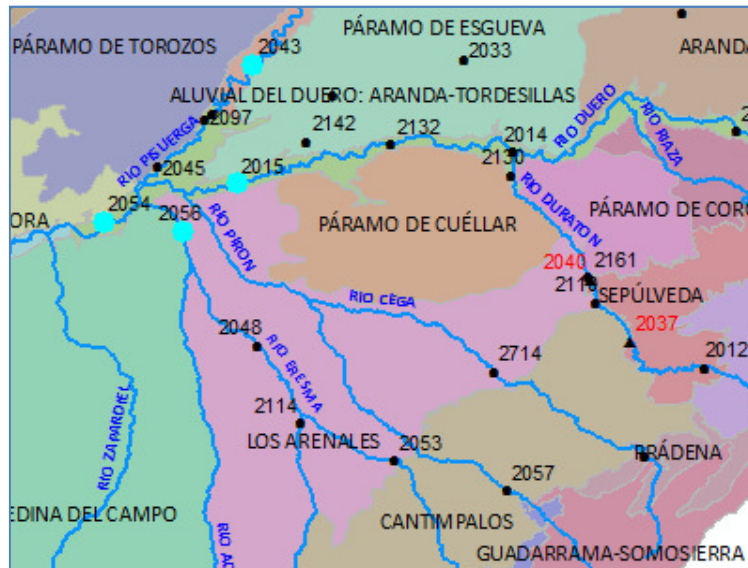


Figura 140: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 7 del río Duero. En azul las estaciones de aforo que lo delimitan.

Afecciones

	Demandas												Total
	Cega-Pirón						Pisuerga			Duero			
	DU 4111 Villa y Tierra de Pedraza	DU 4110 Mancomunidad de Pinares	DU 4112 Mancomunidad Cega	DA 4002 RP Cabecera Pirón	DU 4107 Cabecera del Piron	DA 4001 RP Río Pirón	DI Pisuerga aguas abajo Carrión	DU 3000035 Área metropolitana de Valladolid	Canal de Geria_a - DA 2000088 ZR Geria-Villamarciel	Canal de Tordesillas - DA 2000090 ZR Tordesillas	DA 2000096 RP MI río Duero	DA 6048 Riegos del Bajo Duero hasta San José	
Junio	0.1	0.1	0.1	1.6	0.1	0.3	0.8	6.8	1.6	5.5	1.3	10.7	28.9
Julio	0.1	0.1	0.1	1.2	0.1	0.2	0.8	6.8	1.6	2.9	0.7	5.6	20.2
Agosto	0.1	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.8	6.6	1.6	0.8	0.2	1.5	12.4
Promedio	0.1	0.1	0.1	1.1	0.1	0.2	0.8	6.7	1.6	3.1	0.7	5.9	20.5

Tabla 25: Afecciones por detracción de caudal en el tramo 7 del río Duero.

	Retornos																Total
	Duero				Cega-Pirón						Pisuerga						
	DA 3019 RP Canal del Duero	DU 3113 Laguna de Duero	DU 3112 Boecillo	DA 3020 RP Río Duero entre Duratón y Cega	DU 4111 Villa y Tierra de Pedraza	DU 4110 Mancomunidad de Pinares	DU 4104 Mancomunidad de Municipios Río Eresma	DA 4002 RP Cabecera Pirón	DU 4107 Cabecera del Piron	DA 4001 RP Río Pirón	Canal de Castilla Sur_h	DI Pisuerga aguas abajo Carrión	DA 2000086 ZR Castilla Sur	DU 3000173 M. Bajo Pisuerga	DU 3000035 Área metropolitana de Valladolid	Canal de Geria_a - DA 2000088 ZR Geria-Villamarciel	
Junio	2.2	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	5.0	0.1	1.4	0.0	1.0	0.2	10.8
Julio	1.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	5.0	0.1	0.9	0.0	1.0	0.2	9.3
Agosto	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	5.0	0.1	0.2	0.0	1.0	0.2	7.1
Promedio	1.3	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	5.0	0.1	0.8	0.0	1.0	0.2	9.0

Diferencia Total 11.4

Tabla 26: Afecciones por retorno de caudal en tramo 7 del río Duero.

Dados los numerosos cauces incluidos en el análisis, las derivaciones y retornos que tienen lugar son muy numerosas, si bien el resultado final no implica mucha modificación de los caudales naturales del río. En total se derivan 20.5 hm³/mes e ingresan como retornos 9 hm³/mes, por lo que la detracción total es de 11.4 hm³/mes.

Si bien en otros tramos una afección de 11.4 hm³/mes puede ser muy determinante en este no es así dadas las magnitudes con que se trabaja.

Resultados restitución

En la Figura 141 se aprecian los resultados de análisis para el Tramo 7 del río Duero durante los meses de verano. La curva muestra una gran oscilación para épocas anteriores a 1970. En este periodo los valores negativos que toman las diferencias en verano parecen inconsistentes, ya que en bastantes ocasiones el descenso solo es registrado en el valor de uno de los meses, mientras que los otros registran valores positivos. Los picos positivos se corresponden a grandes rasgos con épocas más húmedas, donde el río podría estar ganando entre 20 y 40 hm³/mes. En épocas secas los valores oscilan en torno al cero, en el rango entre 20 y -20 hm³/mes. Esta variabilidad de caudales podría manifestar un régimen natural de los ríos Cega y Pirón, que desaparece a partir de 1970 por causa de los descensos de nivel del acuífero.

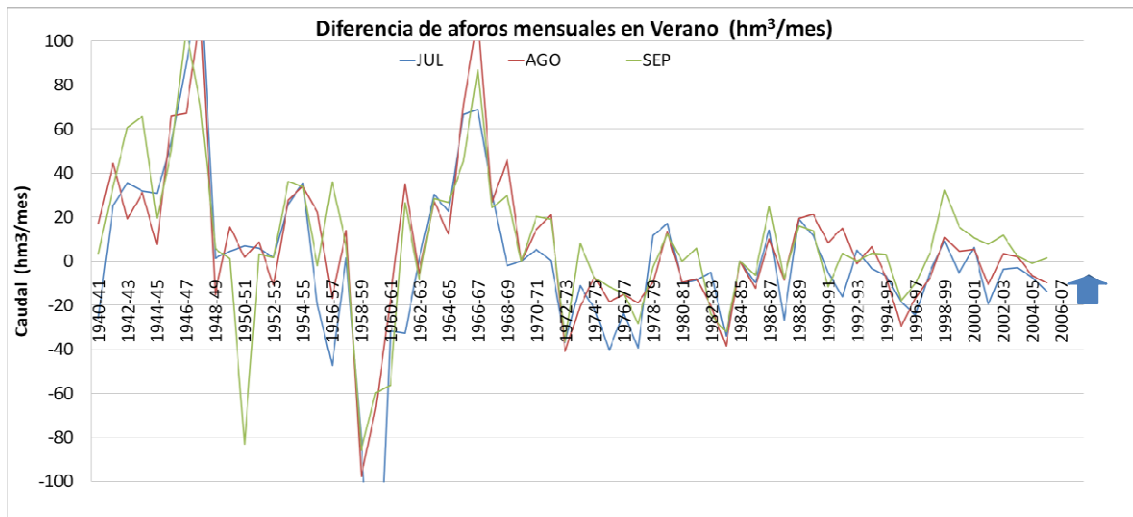


Figura 141: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2015 y 2054 del río Duero.

A partir de 1970 la curva se estabiliza y toma valores entre 20 y -20 hm³/mes hasta la actualidad. En el análisis de aforos anual (Anexo 3) se aprecia como los periodos donde se alcanzan las mayores diferencias positivas se corresponden con episodios más húmedos (véase en dicha figura la línea rosa discontinua, media mensual de 10 años de los caudales

recogidos en la estación 2043 del río Pisuerga). Las afecciones en el tramo no modifican los resultados del análisis dada la magnitud de los caudales del río.

Así pues, entre el periodo inicial y el actual se puede intuir un descenso desde los valores en el rango entre -20 y 40 hm³/mes hasta los valores de la actualidad, entre 20 y -20 hm³/mes, achacable probablemente al efecto de las extracciones sobre los ríos Cega y Pirón.

En el caso de los meses de invierno (Anexo 3), exceptuando ascensos puntuales debidos a episodios más húmedos, la mayoría de los valores sigue una tendencia relativamente estable oscilando entre -20 y 50 hm³/mes. Es una tendencia similar a la acontecida en verano salvo por el periodo 1983-1993 donde se produce un descenso más pronunciado del cual se recupera a posteriori. Este periodo se corresponde con uno de los de menor aportación en la cuenca.

Conclusiones

A la vista de los resultados se puede interpretar que en régimen natural (hasta 1970) el río podría drenar desde 20 y 40 hm³/mes en épocas húmedas hasta prácticamente cero hm³/mes en las más secas.

En la actualidad la oscilación de los valores se atenúa hasta valores entre -20 y 20 hm³/mes, localizándose principalmente alrededor del cero.

El concepto de equilibrio se refiere únicamente a que, en su conjunto, no tiene un comportamiento claro como ganador o perdedor en ningún momento, si bien a nivel local hay tramos que se comportan como ganadores y otros como perdedores, y cuyos efectos se compensan unos con otros.

Un drenaje de 20 hm³/mes supone sobre el caudal mensual medio de la serie de aforos en la estación 2054 (299 hm³/mes) un 7 %. Si se hace la anterior comparación calculando el caudal con los meses de verano únicamente el porcentaje asciende hasta el 19 %.

Duero Tramo 8

Datos disponibles

Aforos

El tramo 8 se sitúa entre las estaciones de aforo 2062 en Toro y la 2054 en Villamarciel. Recoge los caudales de los ríos Guareña, Zapardiel y Trabancos. De éstos, los últimos dos ríos no disponen de datos de aforo, no así el Guareña. En todos los casos los caudales

circulantes son inferiores a los del río Duero en más de dos órdenes de magnitud, por lo que no se han tenido en cuenta ya que las conclusiones del análisis no se ven alteradas en ningún caso.

Afecciones

	Demandas					Retornos						
	DA 2000091 ZR Pollos	DA 2000093 RP Río Duero	DA 2000092 ZR Castronuño	DA 2000094 ZR San José y Toro Zamora	Total	DA 2000090 ZR Tordesillas	DA 2000091 ZR Pollos	DA 2000093 RP Río Duero	DA 2000092 ZR Castronuño	DA 2000098 RP Río Zapardiel	DA 2000096 RP MI río Duero	Total
Junio	3.7	0.2	1.0	34.0	38.8	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	5.5
Julio	1.9	0.1	0.5	19.5	22.1	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.9
Agosto	0.5	0.0	0.1	4.2	4.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
Promedio	2.0	0.1	0.6	19.2	21.9	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.2

Diferencia Total	18.7
-------------------------	-------------

Tabla 27: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 8 del río Duero.

A lo largo de este tramo se deriva agua para varias demandas agrarias por un total de 21.9 hm³/mes, la principal de ellas la DA 2000094 ZR San José y Toro Zamora (19.2 hm³/mes). También se reciben 3.2 hm³/mes como retornos de otras tantas. En total existe una detracción de 18.7 hm³/mes.

Resultados restitución

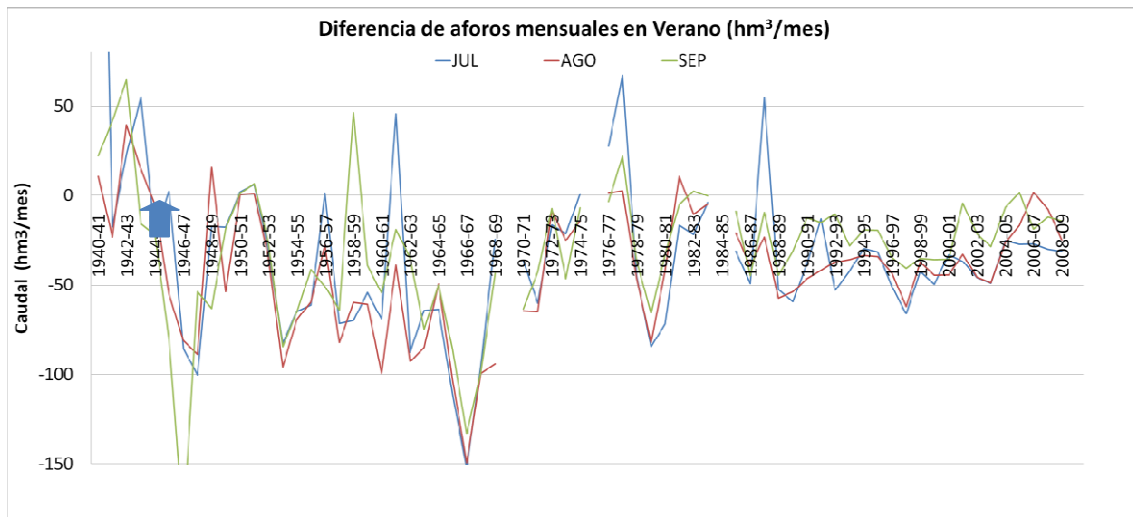


Figura 142: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.

Al analizar la diferencia de aforos en verano (Figura 142), la curva muestra una tendencia muy irregular, con varios comportamientos diferentes según el periodo; al comienzo de la serie los valores se ubican por encima del cero posteriormente se produce un descenso que dura hasta 1968, luego se recuperan de forma brusca en los siguientes 4-5 años, y por último una etapa más estable hasta la actualidad, quizás con tendencia ligeramente ascendente los últimos 8-5 años.

Con respecto al descenso que acontece entre los años 1944 y 1968 parece determinante la entrada en funcionamiento del Canal Toro Zamora y el Canal de San José, en 1945 y 1946, respectivamente, que retraen en los meses de verano un total de 81.3 hm³ (20.4 hm³/mes aprox.). No obstante el funcionamiento de los canales no explica el descenso en su totalidad.

Analizando la serie mensual de las diferencias en invierno (Figura 143) no aparece el descenso que se da en verano durante la primera década, solamente coinciden en un descenso brusco durante tres años tras el que se recupera. Este descenso brusco, junto con algún otro esporádico en el mes de Febrero entre las décadas del 60 y el 80 son los episodios más relevantes en los que la serie se ubica por debajo del cero, el resto se mueve a lo largo de esta línea de equilibrio de una forma relativamente constante con picos puntuales debidos a episodios de precipitaciones.

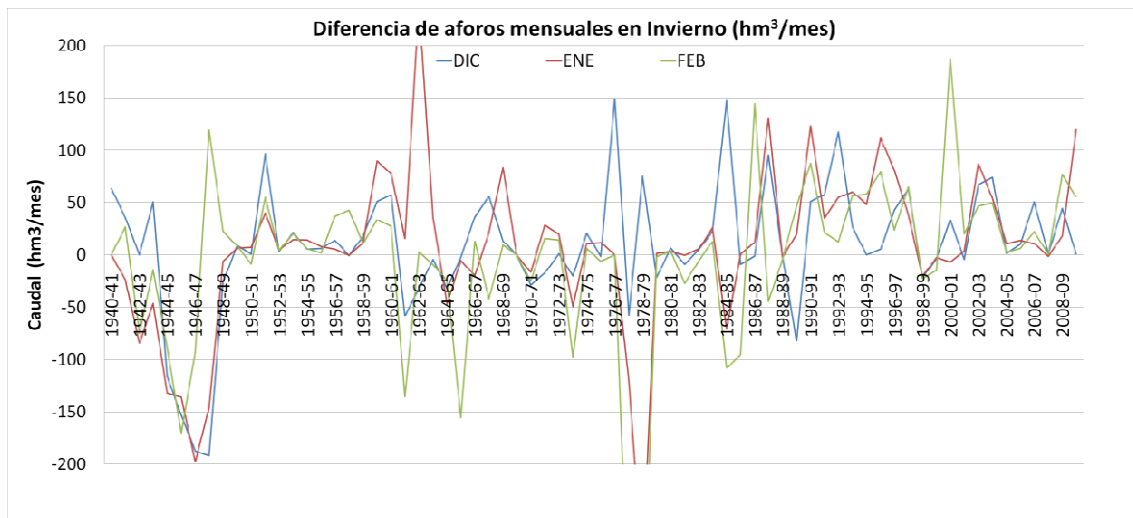


Figura 143: Diferencia de aforos mensuales de los meses de invierno entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.

El hecho de que los meses de invierno no reflejen el descenso que se da al principio de los meses de verano (hasta el año 1968 aproximadamente) lleva a pensar que este descenso debe ser provocado por un factor estacional.

La serie de diferencias totales anuales (Anexo 3) es muy irregular, con saltos bruscos por encima y por debajo del cero. Aunque se puede observar también el descenso brusco en los años 1943-48, aparentemente no se podría averiguar ninguna tendencia ascendente o descendente durante una serie larga de años sucesivos.

Conclusiones

El análisis de pone de manifiesto la dificultad para la completa comprensión del funcionamiento del acuífero en este tramo. No obstante, desde el punto de vista cualitativo, se podría decir que en verano hasta la entrada en funcionamiento de los canales se comportaba como ganador, quizás en equilibrio, a partir de este momento se comporta generalmente como perdedor durante gran parte de la serie, a pesar de que esta tendencia se mitigaría relativamente al considerar el caudal detráido. En invierno en cambio oscila alrededor del cero, con valores ligeramente positivos.

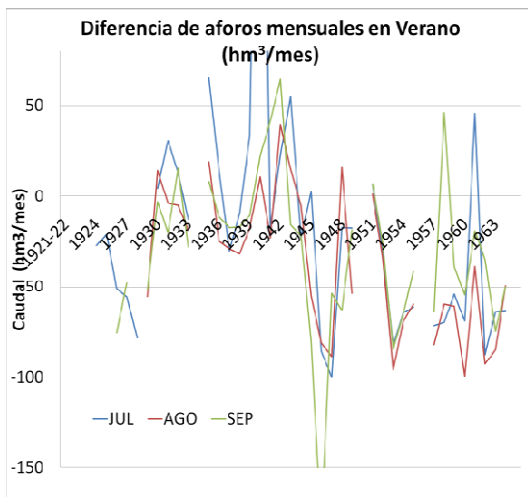


Figura 144: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.

En la Figura 144 se muestra el análisis anterior entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 en la época estival para el periodo 1920-1965, ya que las estaciones de aforo cuentan con un registro de datos largo, a pesar de ser discontinuo. Estos análisis arrojan similares conclusiones. Lo más llamativo es que las diferencias mensuales se ubican en la década de los años 30 en valores mayores a los que muestra la serien a partir de 1940, entre 50 y -20 hm^3/mes , lo cual sugiere que el río está drenando un caudal considerable procedente del acuífero.

Concluyendo, existe una etapa inicial de 10-12 años donde el río puede estar ganando caudal (valores entre -20 y 50 hm^3/mes) hasta 1945, donde coincidiendo con la entrada en funcionamiento del Canales de San José y Toro-Zamora el río cambia la tendencia a perdedor. Los valores oscilan alrededor de -70 hm^3/mes (de los cuales al menos 19 son justificables por las afecciones) hasta principios de los años 70 donde ascienden de forma rápida. De 1970 en adelante los valores oscilan entre 0 y -50 hm^3/mes (alrededor de -25 hm^3/mes).

Con los análisis anteriores no se encuentra explicación a los cambios de tendencia, y en consecuencia al comportamiento del río en este tramo. Sería conveniente acudir a otro tipo de análisis para intentar explicarlo.

Una transferencia de 50 hm³/mes, ya sea positiva o negativa, supone una gran proporción del caudal mensual medio aforado en la estación 2062, más concretamente un 17 %. Si se compara con el caudal mensual medio calculado en los meses de verano este porcentaje supone un 67.1 %, lo que indica la gran influencia del acuífero sobre el régimen de caudales del acuífero.

Varios trabajos anteriores documentan el cese de la aportación subterránea del acuífero hacia los ríos Zapardiel y Trabancos desde los años 70 debido a los fuertes bombeos en el acuífero. No obstante, no se puede buscar el efecto de la situación anterior en este análisis porque los caudales circulantes de estos ríos son muy pequeños en comparación con los que se están tratando aquí.

Duero Tramo 9

Para el estudio del tramo final del Duero se han añadido algunos análisis que no figuran en ninguno de los otros tramos, ya que los resultados obtenidos y las posibles conclusiones así lo exigían. De este modo se han conseguido una interpretación más exacta del funcionamiento del tramo y en consecuencia del acuífero.

Más concretamente, el estudio del tramo 9 consta de los análisis de las diferencias mensuales en verano e invierno, de las diferencias totales anuales, la restitución, la variación estacional media de las diferencias por meses, las series mensuales de diferencias agrupadas por décadas, el análisis de caudales diarios y algunas consideraciones con respecto a los datos de aportación.

Datos disponibles

Aforos

En la Figura 145 se muestra el mapa con el tramo 9, delimitado por las estaciones de aforo 2066, en Carrascal, y la 2062, en Toro. Cuando se habla de tramo final se hace referencia al último tramo en contacto con el acuífero terciario, ya que aproximadamente a partir de la EA 2066 el río circula por la MAS Aliste, de naturaleza impermeable.



Figura 145: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 9 del río Duero.

Entre las estaciones de aforo anteriores se ubican otras dos, la 2096 y la 2121, que no fueron utilizadas porque con las estaciones 2066 y 2062 se consigue una serie de datos mayor y además se abarca la superficie deseada para completar el

análisis del Duero sobre el acuífero terciario. La serie de datos entre las estaciones comienza en el año 1960 y finaliza en 2009.

Afecciones

	Demandas				Retornos			
	DI Duero entre Pisuerga y Esla	DA 2000095 RP San Frontis y Virgen del Aviso	DU 3000039 Zamora	Total	DI Duero entre Pisuerga y Esla	DA 2000094 ZR San José y Toro Zamora	DA 2000095 RP San Frontis y Virgen del Aviso	Total
Junio	0.3	7.1	0.6	7.9	0.0	5.1	1.1	6.2
Julio	0.3	4.1	0.6	4.9	0.0	2.9	0.6	3.6
Agosto	0.2	0.9	0.5	1.7	0.0	0.6	0.1	0.8
Promedio	0.3	4.0	0.6	4.8	0.0	2.9	0.6	3.5

Diferencia Total	1.3
-------------------------	------------

Tabla 28: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 9 del río Duero.

El tramo 9 recoge los retornos del Canal de Toro-Zamora, (1945, que a su vez recoge los retornos de las Acequias de Molacillos, Salado (1950), y el Canal de Elevación de Toro-Zamora ,1950), y los retornos del Canal de San José. Por otro lado, desde el tramo salen los canales de Villarabo, San Frontis (Virgen del Aviso) y la Acequia Morales (que retornan también dentro), y se distribuye agua a la ciudad de Zamora.

En total salen 4.8 hm³ de los que retornan 3.5 hm³, por lo que la modificación total supone 1.3 hm³/mes, una cantidad muy pequeña dados los caudales con que circulan por el tramo.

Resultados restitución

Serie de diferencias mensuales para los meses de verano

La Figura 146 muestra la diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre la estación de aforos 2062 en Toro y la 2066 en Carrascal.

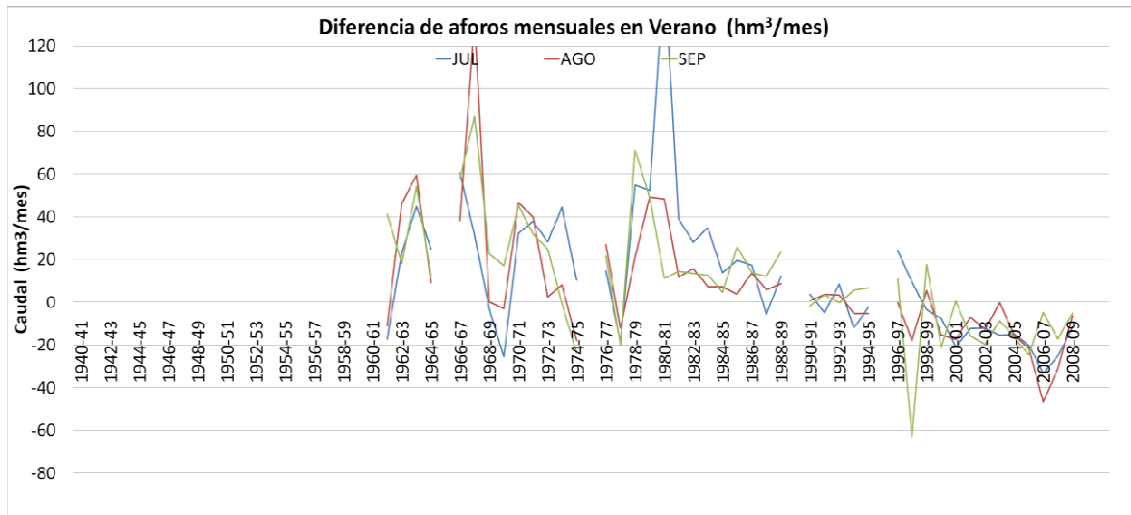


Figura 146: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.

La serie de datos empieza en el año 1961 y termina en el 2009, y la tendencia que marcan los tres meses estudiados es similar.

En régimen natural se aprecia una primera etapa con valores oscilantes hasta aproximadamente el año 1981, donde el río se comporta como ganador, recibiendo entre 40 y 20 hm³/mes con ascensos y descensos bruscos que generan picos desde más de 100 hm³ hasta -20 hm³/mes.

En la segunda etapa la tendencia es descendente hasta la actualidad, se pasa de un rango entre 20 y 40 hm³ a valores entre -10 y -30 hm³.

Serie de diferencias mensuales de invierno y totales anuales

La Figura 147 muestra la diferencia entre tramos para los meses de invierno. En ella se puede apreciar el descenso comentado en las figuras anteriores, en este caso el descenso es de una magnitud bastante mayor. Si en los meses de verano se situaba en torno a los 40-60 hm³/mes, en invierno oscila entre 50 y 140 hm³/mes, lo que supondría una disminución anual entre 600 y 1480 hm³. Es probable que la disminución observada en la aportación subterránea se concentre en estos meses, por lo que el descenso asociado a los bombeos sería tímidamente menor.

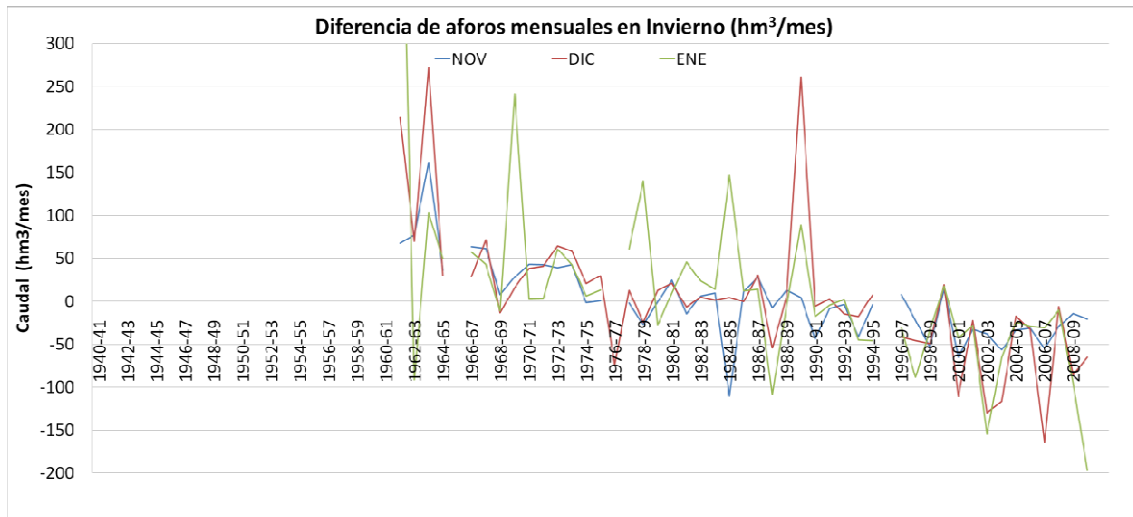


Figura 147 Figura 148: Diferencia de aforos mensuales de los meses de invierno entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.

La Figura 149 muestra los resultados obtenidos para el análisis a escala anual.

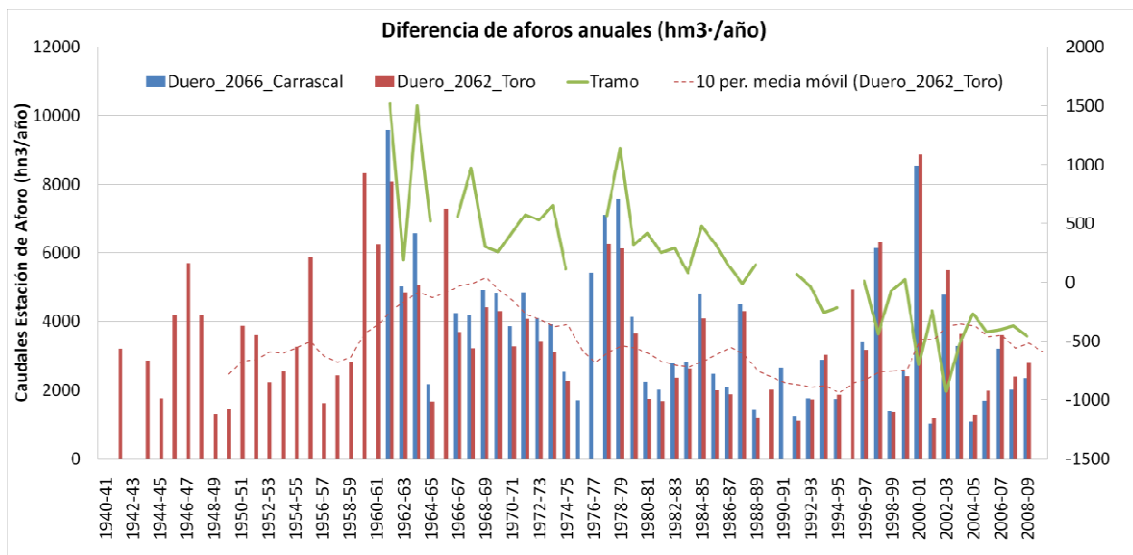


Figura 149: Series de aforos anuales en las estaciones 2066 y 2062 del río Duero (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).

Se aprecia claramente como desciende la descarga desde valores medios en torno a 400-600 hm^3 hasta los -400 o -500 hm^3 , aproximadamente (al igual que en verano e invierno los valores varían bruscamente). El descenso de la aportación subterránea anual total oscila entonces entre 800 y los 1100 hm^3 . En la Figura 146 se habla de una disminución de la descarga mensual entre 40 y 60 hm^3/mes , lo cual asumiendo recarga constante todo el año supone un descenso entre 480 y 720 hm^3 al año. Los resultados son razonables, hasta el hecho de que los anuales sean mayores, ya que éstos incluyen la aportación superficial entre los dos aforos.

La Figura 149 también muestra la media móvil de 10 años para los caudales registrados en la estación de aforos 2062, línea roja discontinua, en la que se aprecia como el comienzo de la serie tiene lugar en un momento donde los caudales son elevados, consecuencia de una mayor aportación subterránea, como comprobaremos posteriormente. Este hecho puede tener influencia en los valores elevados de descarga al río en ese momento, pudiendo falsear el descenso real debido a los bombeos, por lo que ha de ser tenido en cuenta. No obstante, a partir del año 2000 también comienza una época más húmeda en la que se registran caudales mayores, lo cual puede provocar que esté atenuando el descenso ya de por sí patente en esa década.

Otras valoraciones.

En este apartado se muestran los análisis que se comentaron en la introducción, para profundizar en la interpretación del resultado del tramo 9.

La Figura 150 muestra la diferencia de aforos anuales entre las estaciones y la serie de recarga de lluvia para la cubeta del Duero calculada con resultados oficiales del la simulación con el modelo precipitación-aportación SIMPA¹², y su media móvil de 10 años.

¹² Los valores de infiltración son la suma de los valores de las MAS de la cubeta terciaria, sin contar las MAS más superficiales (cuaternarias; páramos, arenales, rañas y aluviales) y las que se considera que están aisladas geológicamente. Estas son: Páramos de Cuellar, Corcos, Torozos, Astudillo, Escalote y Esgueva (MAS 43, 44, 32, 25, 51 y 29) Aluviales de Esla, Órbigo y Pisuerga-Arlanzón (MAS 8, 11 Y 20), Rañas del Órbigo y La Bañeza (MAS 15 y 19), Cantimpalos (MAS 55), Segovia (MAS 57), Ciudad Rodrigo (MAS 63) y La Fuente de San Esteban (MAS 59).

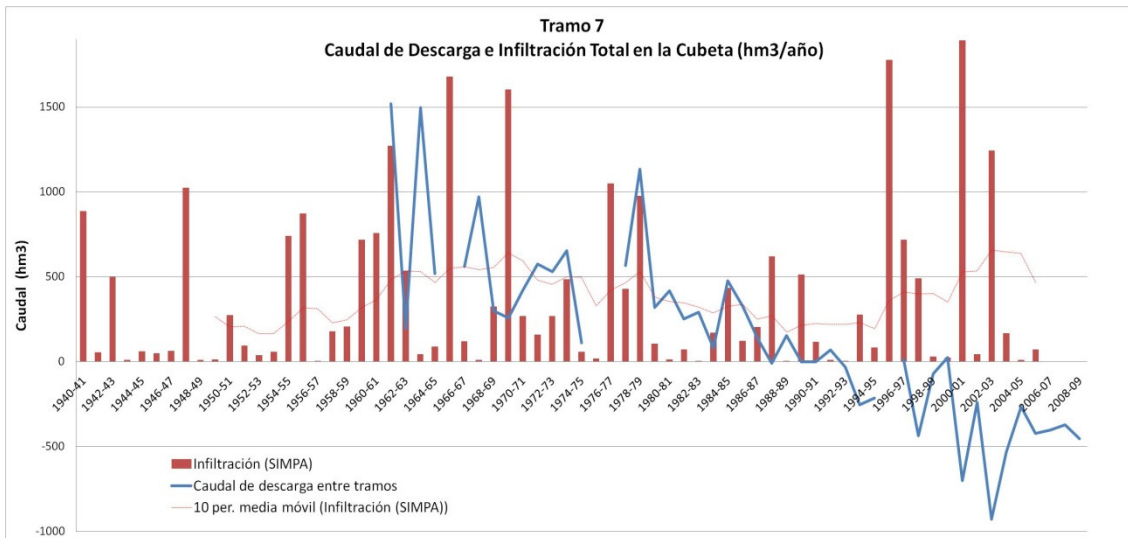


Figura 150 Diferencia de aforos anuales entre las estaciones 2062 y 2066. Y serie de recarga de lluvia para la cubeta del Duero calculada con el modelo precipitación-aportación SIMPA.

La principal lectura que deriva de la gráfica anterior es que la tendencia general descendente es independiente de la aportación subterránea.

Analizando los valores mensuales promedio de la infiltración en la cubeta terciaria para los periodos 1940-60 y 1980-06 (Figura 151), se observa que la reducción de la infiltración entre el comienzo y el final de la serie es tan sólo capaz de explicar como máximo 8 hm³ mensuales para los meses de invierno, los de mayor diferencia.

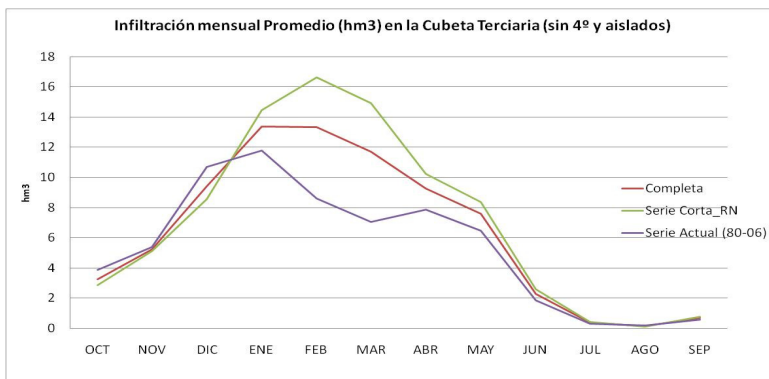


Figura 151: Infiltración media mensual en la cubeta terciaria los periodos 1940-60, 1980-06 y 1940-2006.

Así pues, se puede apuntar que la reducción

de la descarga que muestra la Figura 146 no se explica principalmente por la reducción de la infiltración.

Variación estacional

Pretendiendo esbozar una separación del hidrograma se ha calculado el promedio mensual de la serie de balance separando ésta en periodos de 10 años, Figura 152.

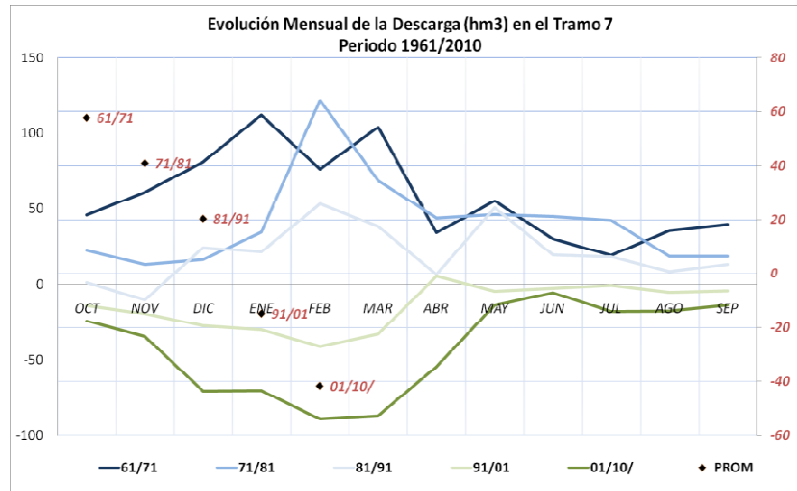


Figura 152: Valores medios mensuales del balance entre las estaciones 2062 y 2066 calculado para periodos sucesivos de 10 años (eje izquierdo). Y balance medio anual para los mismos periodos (eje derecho).

Si se compara la media anual, se observa un descenso en la ganancia media del tramo de 20 hm³/año las 2 primeras décadas y de 25 en las últimas.

Las medias mensuales presentan una variación difícil de explicar. En las primeras décadas la curva tiene la forma que se podría esperar, con valores más altos en invierno. Pero para la última década la forma se invierte, dando pérdidas menores en verano. Se puede aventurar varias explicaciones a este descenso de la ganancia media en invierno como son los retornos de regadíos superficiales en las márgenes del río o el efecto diferido de los bombeos del verano.

También se ha estudiado las series anuales que dan lugar a los promedios anteriores, Figura 153.



Figura 153: Serie de ganancias mensuales del tramo 2062 a 2066 clasificadas por años y agrupadas por décadas.

En estas series se aprecia que los valores de invierno presentan una mayor variabilidad, aunque manteniendo una mayor densidad de puntos en la franja marcada por los valores de verano. Los grandes desvíos de la moda son los causantes de la forma en la curva promedio de la Figura 152. Así, para el periodo 60-80 casi todos los desvíos son positivos, lo que se comprende perfectamente por los aportes de escorrentía superficial. El periodo 80-90 presenta desvíos en ambos sentidos. Y por último el periodo 90-10 presenta solo 2 episodios con desvíos positivos.

La mayor parte de los valores se agrupan en el periodo 60-70 con valores entre 20 y 50 hm^3/mes y en el periodo 00-10 con valores entre 0 y $-25 \text{hm}^3/\text{mes}$.

Las diferencias negativas en invierno pueden indicar una reducción a corto plazo causada por los bombeos del verano anterior en pozos situados más próximos a este tramo. Esta hipótesis es difícil de confirmar, porque sería necesario disponer del historial de extracciones detallado por zonas. En el Anexo 5 se incluye un tratamiento aproximado de este efecto mediante la fórmula de Theis.

Si se asume la hipótesis anterior, las ocasiones en que no se registra este descenso deberían corresponderse con aumentos de la escorrentía superficial. Esto se puede comprobar comparando la serie con las series de lluvias. En la Figura 154 se puede ver los meses en que se produce una recarga importante en la zona de la cubeta para el periodo 1989-2006.

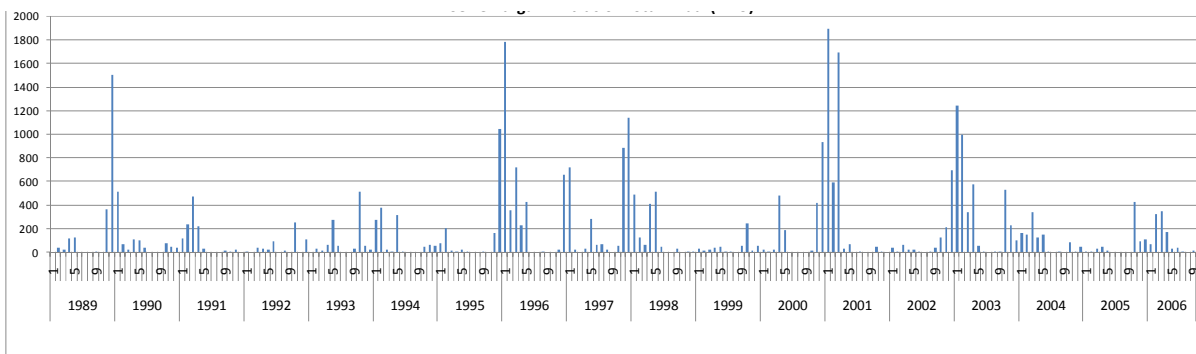


Figura 154: Serie de infiltraciones en la cubeta del Duero obtenidas de la simulación hidrológica con SIMPA.

Si se contrasta la Figura 146 con la Figura 154 puede verse por ejemplo que el año 2002-03 el tramo presenta las mayores pérdidas a pesar de ser presentar importantes filtraciones. También el años 2000-01 presenta importantes filtraciones que no se traducen en una reducción en las pérdidas del tramo.

Variación anual: análisis de caudales diarios (m^3/s)

La Figura 155 muestra los caudales medios diarios (m^3/s) registrados en las estaciones de aforo 2066 y 2062, y la diferencia entre ambos, para el periodo de tiempo comprendido entre Octubre de 2003 y Octubre de 2005.

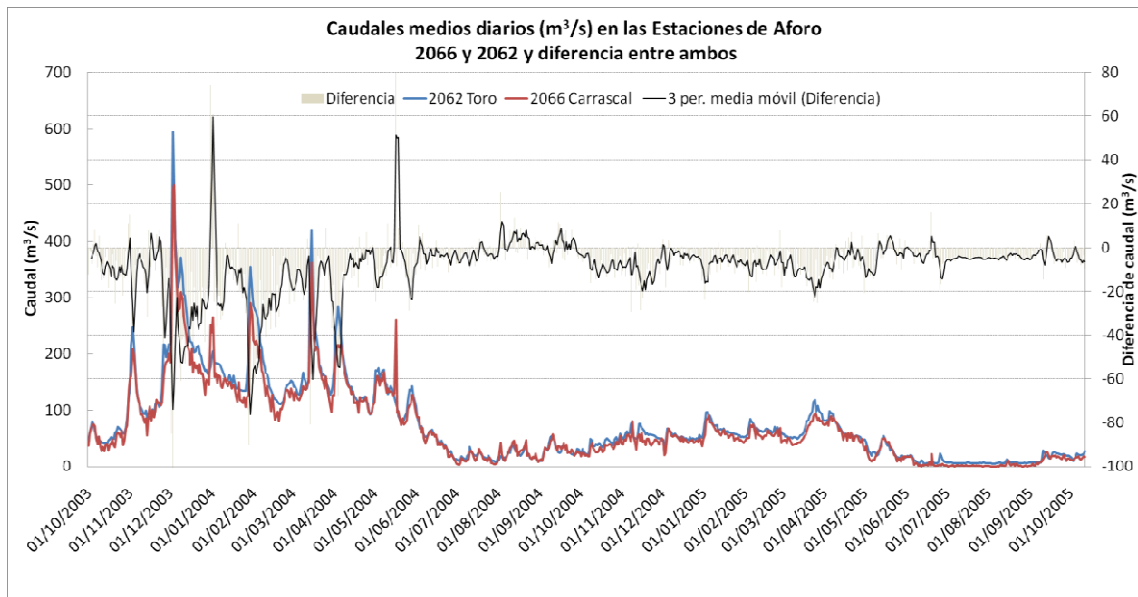


Figura 155: Caudales medios diarios (m³/s) entre las estaciones de Aforo 2066 y 2062 (eje izquierdo) y diferencia entre ambos (eje derecho)

En la Figura 155 se puede apreciar como los valores registrados en la estación de aguas arriba son mayores que los de aguas abajo, confirmando que el río se comporta como perdedor cediendo agua al acuífero terciario.

Además, se comprueba que esta cesión tiene lugar tanto en años húmedos como en secos, si bien en los primeros parece mayor. En el año 2005 el río en este tramo está cediendo en época estival en torno a 4 m³/s y 15-20 m³/s en invierno. En 2004 en torno a 7 m³/s en verano y hasta 40 m³/s en invierno.

Cualquier sección del río en este punto del curso fluvial es de unas dimensiones muy grandes, y una crecida del cauce se podría traducir fácilmente en un gran aumento de la sección mojada, y con ello de la superficie de contacto a través de la que intercambiar agua.

Conclusiones

La interpretación es clara, al comienzo de la serie el río se comportaba como ganador recibiendo entre 20 y 40 hm³ /mes del acuífero, y en la actualidad está cediendo agua al acuífero, entre -10 y -30 hm³/mes. Este fenómeno podría ser relacionado a priori con una disminución de la recarga subterránea, pero los análisis posteriores muestran que el verdadero factor determinante son las extracciones, pues los análisis con los datos de infiltración en la cubeta terciaria muestran como la tendencia es independiente al régimen de aportación.

Por otro lado, el análisis de los valores medios mensuales de la diferencia entre estaciones agrupados por décadas confirman la tendencia descendente desde la década de 1960 hasta la actual, y las series anuales de dichos valores ponen de manifiesto la presencia de una franja central plana donde se dan la mayor parte de los valores (puede confirmarse como un valor constante de drenaje subterráneo), que comenzaría en el periodo 60-70 con valores entre 20 y 50 hm³/mes y termina en el periodo 00-10 con valores entre 0 y -25 hm³/mes. Esto confirma la interpretación inicial de reducción de la ganancia media anual de entre 480 y 720 hm³/año.

La ganancia de caudal que presenta el río al comienzo de la serie (30 hm³/mes aprox.) supone un 10 % del caudal medio mensual en la estación de aguas abajo (2066), y un 35 % del caudal mensual medio en los meses de verano. Aplicando el procedimiento anterior, las pérdidas que se registran en el periodo actual (20 hm³/mes) suponen el 7% con la serie completa y el 23 % con los meses de verano.

Por último, a pesar de que el análisis de los caudales diarios entre las estaciones no es oportuno para cuantificar el proceso que se está estudiando, respalda las conclusiones anteriores ya que confirma las hipótesis desde el punto de vista cualitativo, y no las descarta desde el punto de vista cuantitativo.

Conclusiones Río Duero

Según los resultados de los análisis anteriores, se puede dividir el río Duero en varias zonas según comportamiento, desde cabecera hasta la estación 2066 en Zamora, donde aproximadamente deja de circular sobre el acuífero terciario.

En primer lugar los tramos ubicados en cabecera sobre materiales calizos. En estos tramos el río se comporta como ganador porque la cota del agua en esta zona es elevada, gracias a las cuantiosas precipitaciones que se dan en cabecera sobre esta zona. Así es como se comporta el tramo 2, el más largo, que gana entre 100 y 150 hm³/año. En el tramo 1, de escasa longitud, no se aprecia intercambio.

A continuación de los tramos calizos se encuentran los tramos 3 y 4, ya sobre materiales terciarios. En éstos tramos no cabrían esperar resultados muy diferentes a los anteriores, pues reciben agua de las formaciones mesozoicas sobre las que se asienta el acuífero terciario en la región Este. El tramo 3 refleja este comportamiento, ganando alrededor de 120 hm³/año. En el tramo 4 parece que el río infiltra parte del caudal drenado aguas arriba.

Los tramos 5 y 6 son sobre el papel tramos inconexos debido a la presencia en profundidad del estrato de margas. En el tramo 6 se aprecia claramente como no existe intercambio alguno de agua. El tramo 5 se sitúa en el límite entre este estrato de margas y el resto de materiales terciarios, y en el periodo actual registra una ligera ganancia que podría responder al ascenso de agua en la confluencia con las mismas, no obstante no se dispone de información anterior a 1977 achacable a un régimen natural, por lo que parece que las afecciones pueden tener algo que ver.

Los tramos 7 y 8 son de una gran importancia ya que circulan gran cantidad de caudal, y también las diferencias entre las estaciones son muy grandes, pudiendo modificar considerablemente los resultados de los análisis. Aparentemente se podría esperar que se comporten de forma similar al tramo 9, drenando agua, aunque en menores dimensiones. No obstante no es claramente así, y presentan grandes variaciones.

El tramo 7 comprende gran parte de los ríos Cega y Pirón. En régimen natural se comporta aparentemente como ganador en periodos húmedos (gana entre 40 y 20 hm³/año en verano) y en periodos secos oscila entre -20 y 20 hm³/mes. En el periodo actual parece encontrarse en equilibrio oscilando entre -20 y 20 hm³/mes. En el caso del tramo 8, los resultados no son suficientemente esclarecedores como para explicar su comportamiento, ya que existen cambios de tendencia difíciles de explicar, probablemente debidos a la entrada en funcionamiento de varios canales de entidad. En líneas generales, las diferencias oscilan en torno a valores negativos (-50/-20 hm³/mes) toda la serie excepto al comienzo de la misma.

Los resultados más contundentes los arroja sin duda el tramo 9, ya que recibe la mayor ganancia de caudal y registra las mayores modificaciones hasta la actualidad. En régimen natural el río se comporta claramente como ganador durante los primeros 20 años de la serie, ganando entre 120 y 480 hm³/año. Sin embargo, desde el año 1980 hasta la actualidad la descarga desciende hasta colocarse en la actualidad en valores negativos de hasta 360 hm³ anuales, que ponen de manifiesto que el río está perdiendo una cantidad considerable de agua en este tramo.

La propia morfología de la cuenca justifica de inicio que este tramo se comporte como un gran dren de toda la cubeta, no obstante inicialmente cabría esperar que el efecto se repartiera más en los tramos siguientes. Esto último no es descartable, aunque con la información disponible y los análisis llevados a cabo no se puede afirmar.

Resumen

En la Tabla 29 se muestra un resumen con los resultados del análisis de aforos. Los valores negativos implican pérdidas en el río y los positivos ganancias. En color rojo se muestran aquellos los valores de los tramos que serán utilizados en el balance final. Como ha explicado en los análisis de aforos, y se expondrá en el apartado de balance, no serán considerados porque los flujos no ingresan en el acuífero terciario.

Análisis del balance de recursos en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.

Río	Afluente	Zona	Tramo	EA Aguas Arriba	EA Aguas Abajo	Serie de datos	Régimen Natural (máx/mín)	Régimen Actual (máx/mín)
DUERO	Duero	C	1	2101_Molinos de Duero	E_2001_Cuerda del Pozo (E)	1959-2007		-
		C	2	E_2001_Cuerda del Pozo (S)	2002_Garray	1947-2007	120	120
		T	3	2002_Garray	2004_Gormaz	1930-2007	120	120
		T	4	2004_Gormaz	2013_Aranda	1973-2007	-50	-50
		T	5	2013_Aranda	2132_Quintanilla	1977-2007	-	120
		T	6	2014_Peñafiel	2015_Herrera	1940-1975	-	-
		T	6b	2132_Quintanilla	2015_Herrera	1977-2007	-	-
		T	7	2015_Herrera	2054_Villamarciel	1940-2007	480 / 0	240 / -240
		T	8	2054_Villamarciel	2062_Toro	1941-2007	120 / -360	240 / -240
		T	9	2062_Toro	2066_Carrascal	1941-2010	480 / 180	-180 / -360
PISUERGA	Pisuerga	M	1	2029_Cordovilla	2043_Cabezón	1941-2007	60	60
		M	2	2133_Herrera del Duero	2029_Cordovilla	1987-2007	120	120
			3	2133_Herrera del Duero	2024_Alar del Rey	1987-2007	-120	-120
		-	5	2106_Requejada	2020_Aguilar de Campoo	1962-1996	-120	-120
		-	4	2020_Aguilar de Campoo	2024_Alar del Rey	1953-2008	-50	-50
	Arlanza	T	1	2030_Covarrubias	2031_Peral de Arlanza	1940-2007	60	60
		C	2	2028_Castrovido	2030_Covarrubias	1960-2007	-	-
	Arlanzón	M	T2	2032_Villasur	2116_Villavieja	1979-2007	-	-
		M	T1	2116_Villavieja	2036_Quintana del Puente	1976-2007	-60	-60
	Carrión	-	2	2134_Guardo	2040_Villodo	1940-2007	-120	-120
		-	3	2108_Camporedo	2134_Guardo	1937-2007	-	-
		M	1	2040_Villodo	2042_Palencia	1940-2007	-	-
	Esgueva	M	1	2049_Cabñes de Esgueva	2044_Valladolid	1946-2007	-	-
ADAJA	Adaja	Mixto	1	2046_Ávila	2056_Valdeestillas	1932-2007	-	-
		T	1b	2046_Ávila	2056_Valdeestillas/2053/2047	1968-2007	-	-
GUAREÑA	Guareña	T	1	2128_Vadillo	2129_Toro	1976-2007	-	-
DURATÓN	Duratón	C	3	2012_Sepúlveda	E_2037_Burgomillodo	1968-2007	-	-
		C	2	E_2037_Burgomillodo	E_2040_Las Vencias	1969-2007	-50	-50
		CA	1	E_2040_Las Vencias	2130_Peñafiel	1976-2007	-	-
RIAZA	Riaza	C	1	2009_Riaza	E_2036_Linares del Arroyo	1952-2007	-	-
ESLA	Esla		1	2074_Castropepe	2095_Breto	1943-2005	-	-
			2	2071_Benamariel	2074_Castropepe	1943-2005	-	-
			3	2067_Riaño	2071_Benamariel	1943-1973	-	-
	Cea		1	2104_Almanza	2143_Castrobol	1976-2008	-60	-60
VALDERA-DUEY	Valderaduey	T	1	2126_Villárdiga	2148_Mixto(Villagodio)	1976-2007	-	-

Tabla 29: Resultados del análisis de aforos, en hm³. Los valores negativos significan pérdidas, los positivos ganancias.

A continuación se comparan los resultados expuestos en la tabla 30 con los del trabajo “DGOHCA, 2002”, en el cual se estima el balance en la U.H. Región de Los Arenales (ver Figura 156).

En dicha figura se muestra la evolución del balance del acuífero en la Región de Los Arenales por medio de la evolución de los diferentes términos del mismo. Se presta atención a los valores relacionados con la infiltración y descarga en ríos, ya que el resto de factores han sido analizados en los apartados anteriores.

El tramo del Duero al que hace referencia este trabajo está comprendido entre las estaciones 2066 y 2015, equivalente a los tramos 9, 8 y 7 del presente estudio, y los afluentes son el Guareña, Zapardiel, Trabancos, Adaja y Cega.

Balance de la U.H. Región de Los Arenales					
		Estacionario (1940)	De 1940 a 1973	De 1973 a 1999	1998-99
Entradas	Recarga	222,1	214,3	199,5	21,7
	Afluentes	0,9	0,9	2,3	3,0
Salidas	Bombeos	-	48,4	173,3	193,7
	Duero	66,4	62,3	49,3	43,5
	Afluentes	152,2	126,1	70,1	40,3
	Evapotranspiración	4,1	3,6	1,9	0,6
Disminución del almacenamiento		-	25,2	92,8	253,4

Figura 156: Balance en la U.H. Región de Los Arenales. Fuente: “DGOHCA, 2002”.

Según dicho trabajo la descarga en el río Duero en régimen natural es de alrededor de 66 hm³ anuales, y se reduce hasta los 44 hm³ anuales en 1998-99 consecuencia de las extracciones.

En los afluentes la reducción es mayor, y los 152 hm³ anuales que descarga en régimen natural se reducen a 40 hm³ anuales en el año 1998-99.

Según el análisis de aforos, la mayoría de la descarga tiene lugar en el tramo 9 del Duero, donde descargan entre 400 y 500 hm³ anuales. Si bien las cifras no son comparables por tratarse de superficies diferentes, queda claro que el comportamiento del acuífero que se expone en ambos trabajos es totalmente distinto, y en consecuencia los resultados también.

Además, en el trabajo “DGOHCA, 2002” se asume que el efecto derivado de las extracciones se refleja prácticamente en su totalidad en los afluentes del Duero, cuya descarga desciende de 152 a 42 hm³ anuales, mientras que en el Duero lo hace de 66 a 44 hm³ anuales. En el análisis de aforos se muestra que la afección en los afluentes no tiene tanta importancia desde el punto de vista cuantitativo (no así cualitativo), y que la afección se

refleja principalmente en el tramo final del Duero, donde el río pasa a comportarse como perdedor infiltrando hasta 240 hm³ anuales.

4. Balance del Acuífero

4.1. Introducción

En este apartado se aborda el estudio del balance del acuífero terciario, que se presenta como algo fundamental para la comprensión del funcionamiento del acuífero, y para analizar el resto de términos que intervienen en el mismo, cuyo conocimiento y estimación está asociada a gran incertidumbre.

En primera instancia se muestra la zona considerada para la realización del balance y los criterios para su selección. Posteriormente se aborda el tema de la incertidumbre asociada a este procedimiento, y las asunciones consideradas.

Finalmente, se estudia la situación en régimen natural, se describe el régimen influenciado por los bombeos y se presentan la situación actual y las previsiones futuras. Para ello se hace uso de los análisis anteriores presentando una síntesis de los mismos.

Delimitación de la zona de balance

El primero de los pasos para el estudio del balance es delimitar la zona para posteriormente entrar a valorar los flujos de entrada y salida sobre la misma.

Uno de los aspectos importantes que pretende abordar el estudio dentro de la estimación del balance, es la afección de la descarga a los ríos consecuencia de las fuertes extracciones subterráneas. Las extracciones más intensas están localizadas en torno a las MAS Los Arenales (45), Medina del Campo (47), Tierra del Vino (48), MAS Tordesillas (38) y MAS Terciario detrítico (67), principalmente en los estratos más profundos de éstas.

No obstante, si bien los análisis manifiestan que la afección de los bombeos se hace notar sobre los tramos finales de los ríos de la vertiente Oeste (Guareña, Zapardiel, Trabancos, Adaja y Cega), el análisis por tramos muestra que son los tramos finales del Duero los que más se ven afectados por estas extracciones (véase Tramo_9 Duero del apartado anterior). El hecho de que la afección se refleje principalmente en el tramo final del Duero, siendo éste la principal zona de descarga, invita a pensar la afección no es solo consecuencia de los bombeos de esta zona central, sino que la mayoría de los bombeos que tengan una profundidad considerable probablemente se manifiesten en tramos aguas abajo de los mismos, por lo que se decidió ampliar la zona de estudio planteada inicialmente a toda la Cuenca Terciaria del Duero (en color morado, Figura 157) para el estudio del balance.

No obstante, a pesar de la acumulación de bombeos en esta zona, considerando que la transmisividad vertical del acuífero es muy baja.

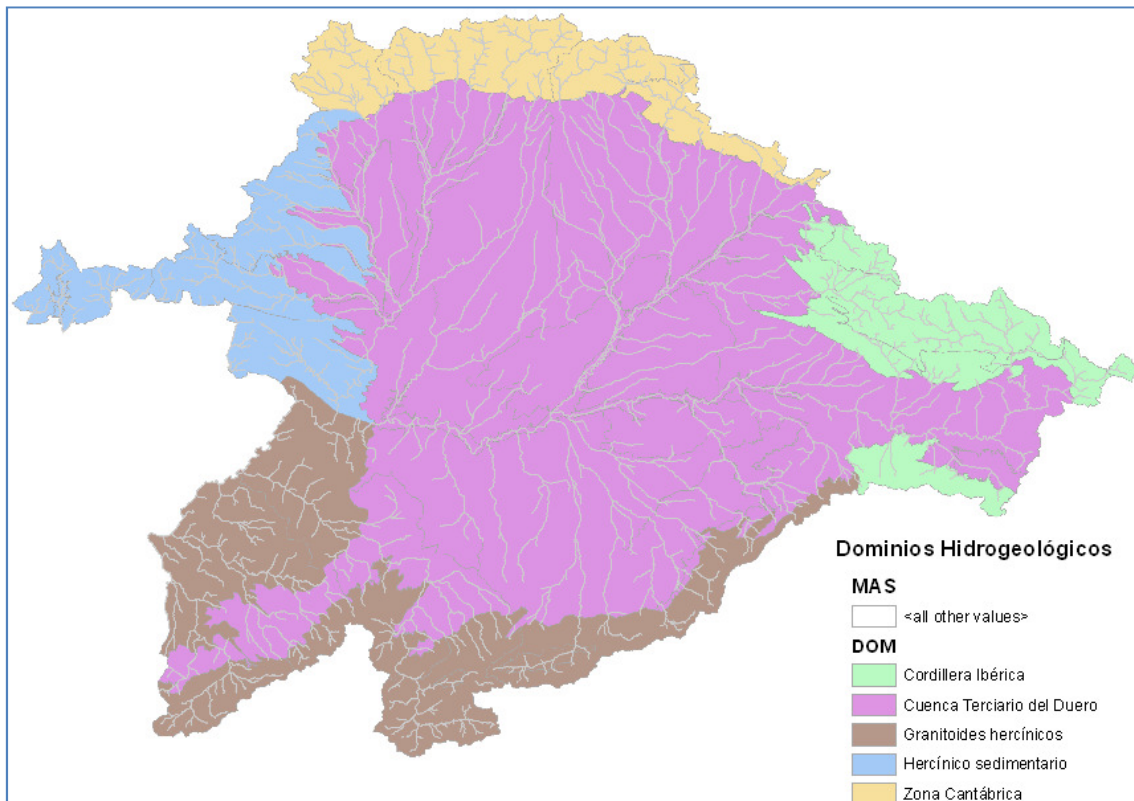


Figura 157: Dominios hidrogeológicos de la cuenca del Duero.

Sobre esta superficie, en función a las consideraciones que se exponen a continuación, se selecciona la zona final de balance:

a) De todas las MAS ubicadas en la cubeta, parte de ellas están formadas por materiales mayoritariamente cuaternarios, que pueden ser diferenciados del resto del acuífero terciario por su estructura y comportamiento. Se trata de los páramos, arenales, rañas y aluviales. Estos materiales se ubican sobre el acuífero terciario, con espesores menores (bombeos menos profundos) y materiales generalmente mucho más transmisivos. Se considera que éstas unidades descargan directamente la infiltración que reciben a los ríos (cuya afección se restituye al restar los aforos) pudiendo ser excluidos a la hora de hacer el balance global.

b) Además de los materiales cuaternarios, existen varias MAS que se encuentran aisladas geológicamente del resto. De cara al funcionamiento global del acuífero se puede considerar que el comportamiento de estas MAS no tiene influencia sobre el resto de MAS intervinientes en el balance. Es el caso de la MAS 55; Cantimpalos (no en su totalidad pues

parte del límite NE puede estar abierta), MAS 57; Segovia, y MAS 63; Ciudad Rodrigo y 59; La Fuente de San Esteban.

Un caso especial se da en la zona de los páramos, donde se ubica el paquete de margas sobre el que se asientan éstos. Las margas se extienden hacia el norte bajo la MAS Castrojériz (ver mapa de la Figura 104), por lo que a efectos de comportamiento dicha MAS también se considera aislada.

c) Por otro lado, como se confirmó en el apartado de análisis de aforos, prácticamente la totalidad de la cuenca del río Esla se comporta de manera independiente al resto de MAS terciarias, de modo que lo ocurrido en esta zona no tiene influencia sobre el resto de masas de agua, superficiales y subterráneas, y por ello no se consideran en el balance.

Las relaciones entre las MAS seleccionadas para el balance y las del resto de la cuenca se consideran por medio de transferencias laterales. Un caso especial son las relaciones con los materiales que se ubican en la periferia bordeando el acuífero terciario donde, como se vio en los análisis de aforos, en algunos casos existe intercambio a través de los ríos. En estos casos, si el río se comporta como ganador no se considera en el balance pues se trata de recurso que no llega a entrar nunca en el acuífero terciario. Si en cambio el río se comporta como perdedor, se considera que el caudal infiltrado tiene como destino el acuífero terciario, por lo que esta ganancia del acuífero si es considerada.

Así pues, el conjunto de MAS con presencia en superficie utilizadas para el balance se muestran en color amarillo en el mapa siguiente:

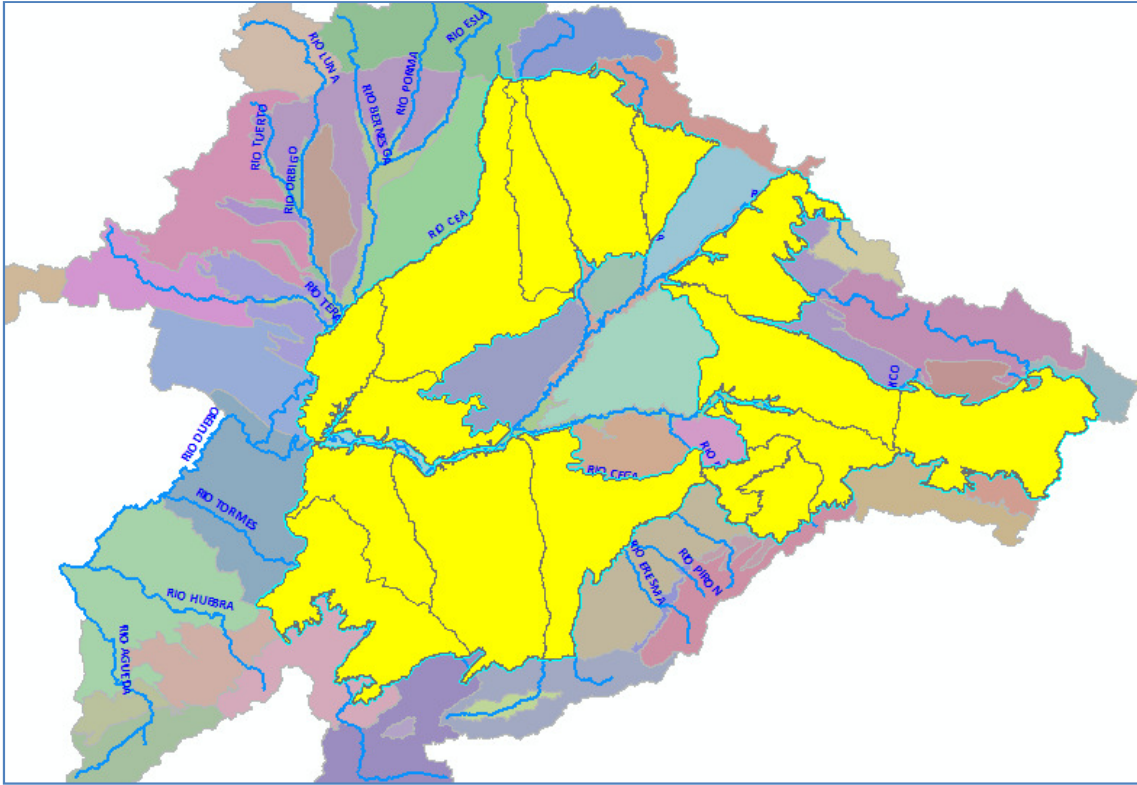


Figura 158: MAS con presencia en superficie consideradas en el estudio del balance del acuífero terciario de la cuenca del Duero, en color amarillo.

Las MAS seleccionadas en la figura anterior tienen todas continuidad en profundidad, debajo de las MAS aluviales y en la zona de los páramos (por medio de la MAS 67).

Incertidumbre y asunciones del análisis

Al igual que ocurre con los análisis anteriores, la incertidumbre asociada al estudio del balance es muy grande, más aún si cabe que en los otros casos ya que en este procedimiento se trabaja con los datos anteriores. Es por esto que no se trabajará con valores concretos sino con rangos para cada una de las variables.

El problema es que se trata de variables que no son medibles directamente que requieren de estimación indirecta.

En régimen natural el principal inconveniente es la falta de datos, ya que existe un mayor desconocimiento tanto de la infiltración en el acuífero, como de los flujos entre MAS y entre las MAS y los ríos. Por ejemplo, en el caso de la estimación de la descarga e infiltración en cauces en muchos casos no existen registros foronómicos suficientemente largos, o no de suficiente fiabilidad. Con las transferencias laterales ocurre de forma similar, y es que son complejas de determinar.

Para el caso del régimen influenciado por los bombeos la complejidad aumenta, ya que además de lo comentado para el régimen natural, se ha de considerar la incertidumbre en la cifra de las extracciones y su evolución y, lo que es más complejo aún, la afección de las extracciones sobre el resto de términos del balance (descarga e infiltración en cauces y transferencias entre MAS), aparte de la afección sobre el estado del acuífero, principalmente su almacenamiento.

Además de la incertidumbre asociada a los diferentes términos del balance, se ha de considerar que la propia conceptualización del balance se basa en simplificaciones de la realidad que llevan implícitas una serie de asunciones, las cuales también aportan un alto grado de incertidumbre.

Asunciones

Conforme a lo visto anteriormente, no es sencillo plantear un balance para el acuífero terciario, no obstante, en base a los estudios realizados se puede plantear una conceptualización bastante coherente. Esta conceptualización lleva implícita una serie de consideraciones asumidas en base a los estudios anteriores (descripción, análisis de aforos...)

La cuenca subterránea del Esla drena al Esla: esto implica que no cede agua en dirección O. En la dirección SO (atravesando la MAS Villafáfila) tampoco se tiene constancia de que exista ninguna transferencia. Además, de considerar que existiera se estima que se trataría de un valor muy pequeño, según los datos de infiltración y transferencias laterales.

La región de los Páramos se asienta sobre un paquete de margas de gran espesor, que provoca que la recarga sobre dichas MAS no pueda infiltrar, que desemboque en su totalidad en el río Pisuerga. Estas margas se extienden por debajo de los páramos, cubriendo gran parte de la MAS Catrojeriz y contactando mínimamente con la parte baja de las MAS Villadiego, Burgos y Aranda de Duero. En consecuencia se considera que la MAS Catrojeriz queda totalmente aislada.

Se asume que todo tramo que infiltre en las zonas de cabecera tiene como destino el acuífero terciario. En este punto cabe comentar que los límites físicos pueden ser bastante difusos, entonces del mismo modo que se asume que lo infiltrado en cabecera va a parar al acuífero terciario, se analizarán los tramos en el límite superior de las margas, y en caso de en dichos tramos se aprecien ganancias sustanciales, se asumirá que proviene de la infiltración en el cauce aguas arriba y se restará de la recarga por cauces al acuífero.

Con respecto a las MAS consideradas aisladas geológicamente, se tendrán en cuenta las transferencias de éstas hacia el acuífero terciario (Cantimpalos)

4.2. Régimen natural de acuífero

4.2.1. Relaciones río-acuífero

A continuación se analizan las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas en régimen natural, obtenidas en función a los resultados análisis de aforos. La propuesta se presenta en las figuras que siguen a continuación, divididas en tres zonas. En la primera de ellas se muestran los ríos Cea, Valderaduey y Pisuerga y sus afluentes. En el mapa de la Figura 160 se muestran los ríos Rianza, Duratón y la parte alta del río Duero. Por último, en la Figura 161 se representan los tramos medio y bajo del Duero, con sus afluentes por la margen izquierda; Cega-Pirón, Adaja y Guareña.

Se lleva a cabo la división en tramos ganadores (color azul), perdedores (color rojo) y desconectados/sin intercambio (en color amarillo). El límite del estrato de margas impermeables se representa en color gris.

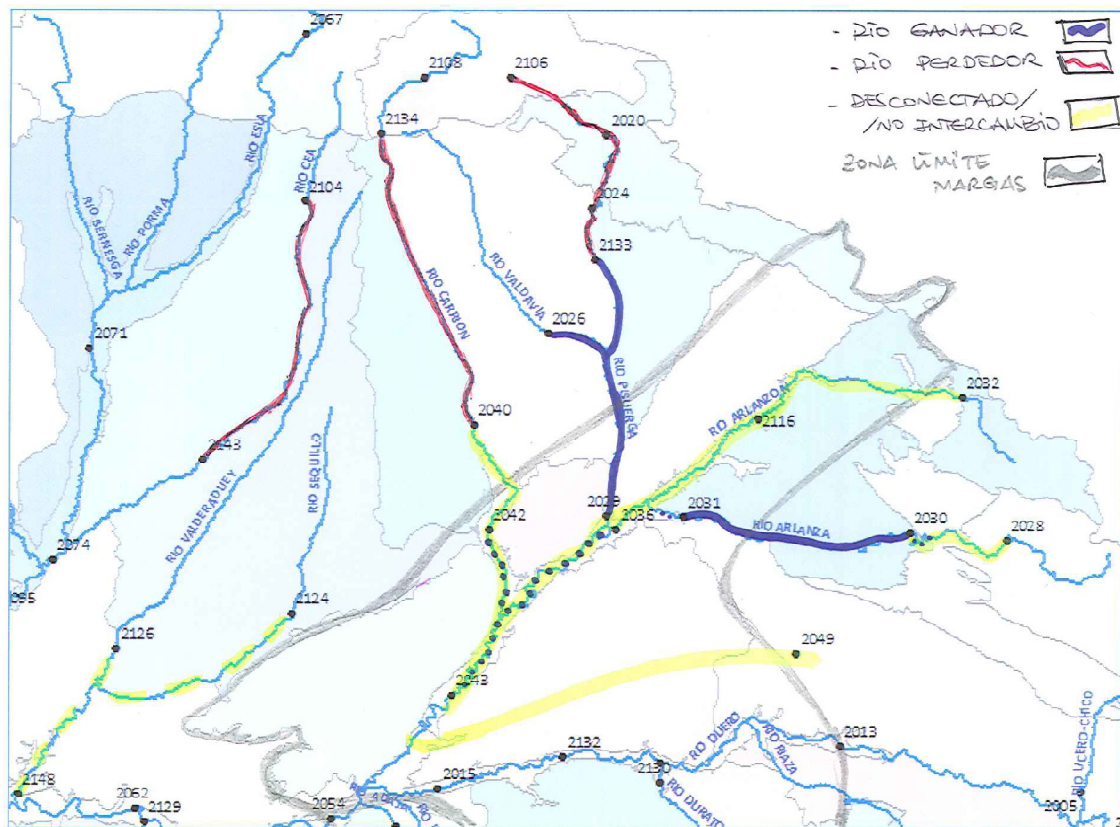


Figura 159: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente a los ríos Pisuerga y Cea.

En este primer mapa se muestra como los tramos altos de los ríos Cea, Pisuerga y Carrión se comportan como perdedores, y los tramos 1 del río Arlanza (entre las estaciones 2030 y 2031) y 2 del Pisuerga (entre las estaciones 2029 y 2133) como ganadores. En el caso de

este último tramo del Pisuerga, dada su longitud, se podría esperar que en la parte alta se comporte como perdedor, al igual que lo hace el tramo aguas arriba, y que esta tendencia cambie conforme se desciende aguas abajo. Se aprecia también como en los tramos ubicados sobre el estrato de margas la ganancia es prácticamente nula. Además la parte baja de los dos tramos ganadores (Arlanza y Pisuerga 3) se ubica sobre el estrato de margas o en el límite, lo cual puede explicar parcialmente el carácter ganador de los mismos, pues el contacto con las margas puede favorecer el ascenso del agua.

En los ríos Valderaduey, Arlanzón y Sequillo no hay indicios de ganancia ni pérdida de agua, por lo que se consideran desconectados.

Por otro lado no hay que obviar que los límites reales en que el río se comporta como ganador o perdedor no son coincidentes con la delimitación utilizada en función a las estaciones de aforo. El hecho de trabajar con estaciones de aforo tiene a su vez la limitación de que solo es considerada la red fluvial donde existen estaciones de aforo, por lo que se pierden numerosos cauces de menor entidad. Es bastante probable que el comportamiento de estos cauces más pequeños sea el mismo que el de aquellos ríos ubicados en su entorno, sin embargo no pueden ser considerados desde el punto de vista cuantitativo.

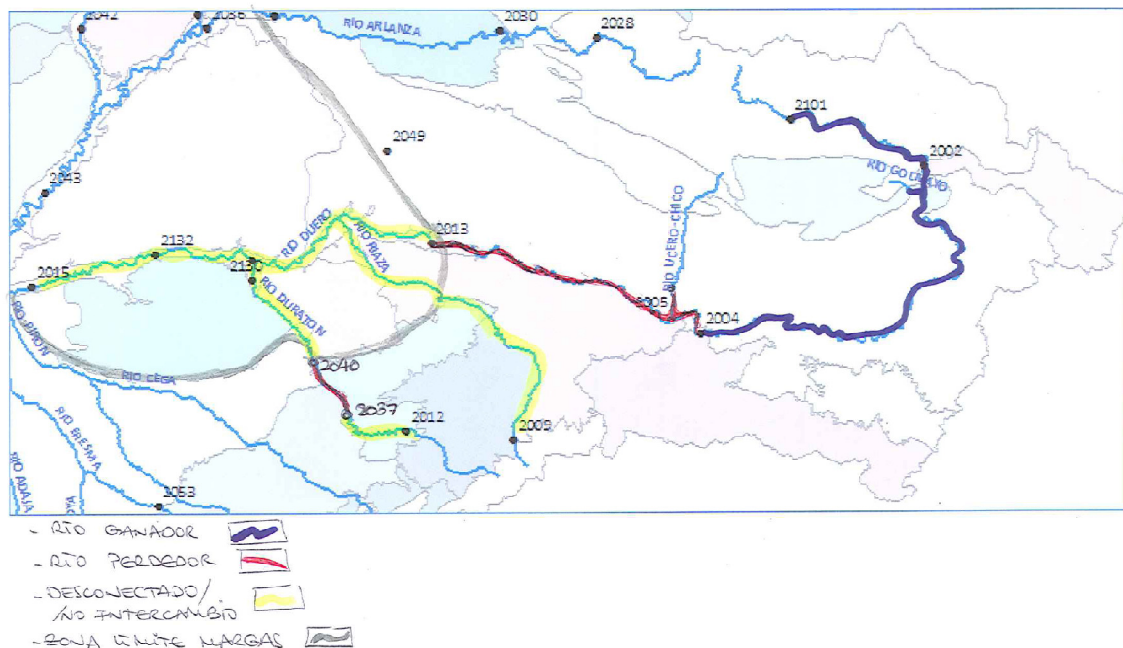


Figura 160: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente a la cabecera del Duero, y los ríos Rianza y Duratón.

La figura anterior muestra la definición de los ríos Rianza, Duratón, y el tramo alto del Duero.

En la gran mayoría de los tramos en esta zona no se han encontrado muchas evidencias de intercambio de agua entre el río y el acuífero. Se aprecian ganancias en los dos tramos aguas abajo del embalse de Cuerda del Pozo hasta la estación 2004 en San Esteban de Gormaz, parte de la cual infiltra en el tramo siguiente, que se extiende hasta la estación 2013 en Aranda de Duero. Desde aproximadamente este punto hasta la estación 2015 en Herrera de Duero no se aprecia ganancia ni pérdida alguna en el río. Este comportamiento es lógico dado que el tramo transcurrido entre las estaciones 2013 y 2015 se ubica sobre el límite sur del estrato de margas.

En el caso de los dos afluentes del Duero por su margen izquierda, Riaza y Duratón, los resultados no varían mucho. En el río Riaza no se aprecian ganancias ni pérdidas, y en el Duratón el río infiltra una pequeña cantidad de agua en el tramo entre los embalses de Las Vencias y Burgomillodo, y en el resto del río no se aprecia intercambio.

La zona correspondiente al tronco central del Duero y sus afluentes por la margen izquierda se muestra en la Figura 161.

RÉGIMEN NATURAL

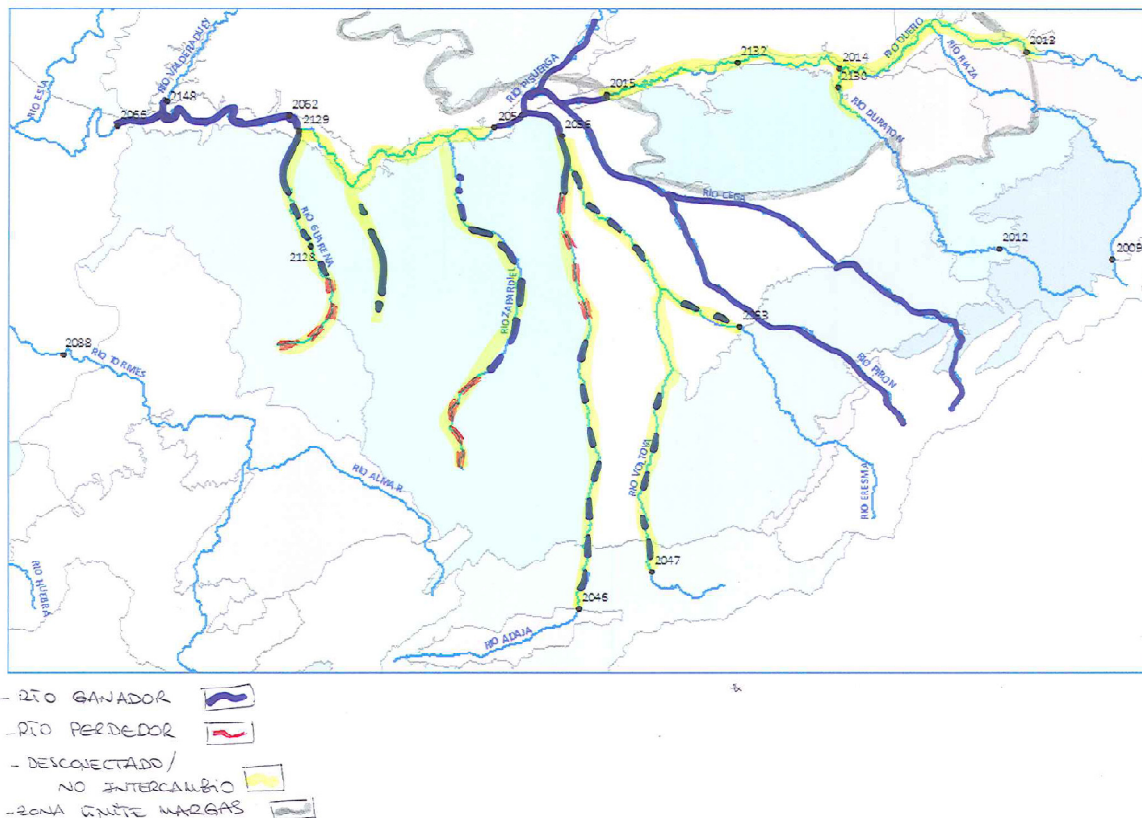


Figura 161: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente al tronco central del Duero y sus afluentes por la margen izquierda.

La simbología se mantiene con respecto a los otros mapas, no obstante en este caso se utilizan líneas discontinuas para definir algunas zonas como ganadoras o perdedoras dentro de cada tramo (estimadas con un análisis comparativo de las cotas de los ríos (según el modelo digital del terreno proporcionado por la OPH, 2009) y el nivel piezométrico del acuífero en puntos cercanos, Anexo 6)).

Según el análisis de aforos, en el río Duero no existe intercambio de agua hasta aproximadamente la estación 2015, ubicada aguas arriba de la confluencia de los ríos Cega, Pisuerga y Adaja. En el tramo entre la estación 2015 y la 2054 en Villamarciel el río aparentemente se comporta como ganador, por lo menos en periodos húmedos. En periodos secos el intercambio es prácticamente nulo. Cabe comentar en este punto que el análisis que concluye lo anterior (ver Tramo 7 del río Duero en el análisis de aforos) incluye la totalidad de los ríos Cega y Pirón, por lo que esta calificación se refiere también a los mismos.

En el tramo inmediatamente después a este, hasta la estación 2062 en Toro, según el análisis de aforos sería más factible que se produjeran pérdidas en el río, aunque el comportamiento es irregular debido a las numerosas afecciones.

Aguas abajo de éste se ubica el tramo final del Duero, en el que los análisis muestran una ganancia de caudal considerable.

De los ríos ubicados por la margen izquierda del Duero, en el caso del Guareña no se aprecia intercambio en los tramos estudiados, y en el caso del Adaja tampoco, si bien en este caso se cree muy probable que pudieran existir ganancias o pérdidas de forma local.

4.2.2. Balance en régimen natural

En un hipotético régimen natural las entradas del sistema son iguales a las salidas del mismo, respondiendo a un proceso estacionario. Los términos de que se compone la ecuación son los siguientes:

$$\sum \text{Infiltración por lluvia} + \sum \text{Infiltración en cauces} \pm \sum \text{Transferencias laterales} = \sum \text{Drenaje en cauces}$$

Esta igualdad se vería alterada por las variaciones en el almacenamiento del acuífero, que dado que es un acuífero de gran extensión, incluso en régimen natural puede sumar un volumen muy importante con duración de varios años. Esto también contribuye a dificultar el cálculo de un balance medio en régimen natural.

La recarga subterránea por infiltración de agua de lluvia se obtiene del modelo SIMPA. Los datos de transferencias laterales fueron obtenidos de la Memoria del PHC 2009. Los

términos de filtración y drenes a cauces se estimaron mediante el análisis por tramos. No cabe considerar bombeos en este caso por estar en el escenario de régimen natural, donde no existen este tipo de acciones externas.

Infiltración y drenaje en cauces

Conforme a los resultados del análisis por tramos, se estimaron los siguientes intercambios de agua con el acuífero terciario a través de los cauces:

En el río Carrión se infiltran aproximadamente 120 hm³ anuales, y en el tramo alto del río Pisuerga alrededor de 290 hm³ anuales, de los cuales 120 hm³ anuales drenan aguas abajo. Además, en el río Arlanza se produce un pequeño drenaje de unos 60 hm³ anuales. En total, alrededor de 200-250 hm³ anuales se infiltran por los cauces del Pisuerga y sus afluentes.

En el río Cea se produce una infiltración de aproximadamente 60 hm³ anuales.

En el tramo alto del río Duero se drenan bajo el embalse de Cuerda del Pozo unos 120 hm³ anuales, de los cuales infiltran prácticamente la mitad antes de la estación 2004 en San Esteban de Gormaz.

En el río Duratón se infiltran alrededor de 50 hm³ anuales en el tramo ubicado entre los embalses. En los ríos Guareña y Adaja no se ha visto una descarga significativa.

En la parte media del río Duero, en el tramo entre las estaciones 2015 y 2054 (que contienen a su vez a los ríos Cega y Pirón), se produce una ganancia de entre 240 y 360 hm³ anuales en periodos húmedos, que queda reducida prácticamente a cero en periodos secos.

En el tramo siguiente, hasta la estación 2062 el río se comporta de forma irregular, pudiendo ganar alrededor de 120 hm³/año al comienzo de la serie. Posteriormente parece comportarse como perdedor desde la entrada en funcionamiento de los canales de San José y Toro-Zamora, infiltrando una cantidad considerable de agua. En la actualidad, tras un aumento de la serie a comienzos de los años 70, los valores se estabilizan en torno a -25/-35 hm³/mes (de los cuales 19 hm³/mes tienen origen en las afecciones), e incluso más cercanos aún al cero en los últimos 5-10 años. En base al análisis no se tienen argumentos suficientes para la explicación del comportamiento este tramo, por ello se ha considerado que está desconectado y que no se produce intercambio en ninguno de los dos sentidos.

En el último tramo del Duero tiene lugar la descarga de una gran cantidad de caudal, y el río ganan entre 240 y 480 hm³ anuales.

En total, se infiltra entre 200 y 250 hm³ anuales en la zona del río Pisuerga, y otros 100-120 hm³ anuales entre el río Cea y el Duratón. Y descarga entre 840 y 360 hm³ anuales.

Infiltración por agua de lluvia

Según se comenta en el apartado de infiltración, a lo largo de la serie los valores de infiltración no han sido constantes, y su variación ha de ser considerada de cara al establecimiento del balance.

Se diferenciaron tres periodos donde la infiltración varía considerablemente, 1940-1954, 1954-1979 y 1979-2006, siendo el periodo 1954-1979 el más húmedo. De estos tres periodos, para la estimación del balance en régimen natural se considera el primero como muestra de la infiltración en periodos secos y el segundo como muestra para los periodos húmedos. De este modo, se trabaja con una cifra que oscila entre 857 hm³/año en periodos secos y 1446 hm³ /año en periodos húmedos. El valor promedio es aproximadamente 1230 hm³/año, con máximos superiores a 3000 hm³ anuales y mínimos en torno a 200 hm³ anuales.

Transferencias laterales

La determinación de las cifras de transferencias laterales se llevó a cabo en el apartado de infiltración, con los extraídos del MIRAME (CHD, 2009).

El mapa de la Figura 84 muestra un esquema de las transferencias entre MAS, donde se aprecia que la mayoría de las mismas se reciben a través de los materiales de la cordillera Ibérica. Del agua que entra a través de los materiales mesozoicos de la zona cantábrica, gran parte tiene como destino la cuenca del Esla, por lo que no entran en la zona de balance, y el resto ingresa a la cuenca del Pisuerga, de los cuales se estima que alrededor de 16 hm³/año pueden ser descargados a las MAS ubicadas sobre las margas, por lo que tampoco llegan a entrar nunca al acuífero terciario.

Según esta concepción, las conexiones entre la cuenca del Duero y aquellas con las que limita son prácticamente nulas, tan solo se considera que puede existir una cesión de alrededor de 65 hm³ anuales hacia la cuenca del Duero. El resto de los límites de la cuenca se consideran cerrados.

En total se asume qué entran al acuífero un total de 165 hm³ y dado que no se dispone de ningún dato con el que validar esta información se mantendrá la cifra, aunque con un gran

margen de incertidumbre. Tampoco se dispone de información acerca de la posible modificación de este flujo en régimen influenciado, por lo que se considera constante en el tiempo e independiente de las acciones externas que actúan sobre el acuífero.

4.2.3. Discusión

Aplicando las cifras estimadas anteriormente a la ecuación del balance:

$$\Sigma \text{Infiltración por lluvia} + \Sigma \text{Infiltración en cauces} \pm \Sigma \text{Transferencias laterales} = \Sigma \text{Drenaje en cauces}$$

En la Tabla 30 se muestran las cifras utilizadas inicialmente para la estimación del balance en régimen natural. Los términos de entrada son la infiltración en cauces, la recarga por lluvia y las transferencias laterales de otras MAS. Como término de salida figura únicamente el drenaje en cauces, ya que según los datos no existen transferencias laterales hacia fuera de los materiales terciarios.

Los términos de entrada suman un total 1785 hm³/año, de los cuales 390 hm³/año son atribuibles a infiltración en cauces y 1395 hm³/año se corresponden con la suma de la infiltración por lluvia más las transferencias laterales.

Las salidas del sistema suman 720 hm³/año, correspondientes al drenaje en cauces.

Régimen Natural		Escenario Estacionario		
Entradas (hm ³ /año)				
Termino balance	Descripción	max	min	Considerado
Infiltración en cauces	Zona Pisuerga	250	200	230
	Cea	70	50	60
	Duración	60	40	50
	Duero T4	60	40	50
	Duero T8	360	-120	0
	Total	800	210	390
Recarga por Lluvia + Transferencias	Recarga	1446	857	1230
	Transferencias	165	165	165
	Total	1611	1022	1395
Total				1785
Salidas (hm ³ /año)				
Termino balance	Descripción	max	min	Considerado
Drenaje en Cauces	Duero T9	480	180	360
	Duero T8	120	-360	0
	Duero T7	480	0	240
	Duero T3	150	90	120
	Total	1260	-90	720
Total				720
Balance = 1785 - 720 = 1065				

Tabla 30: Datos para la estimación del balance en régimen natural.

En régimen natural las entradas y las salidas del sistema deben ser las mismas, como respuesta a un proceso estacionario, por lo que las cifras de entrada o de salida que se están barajando son incorrectas.

En este punto cabe plantearse dos cuestiones, por un lado si las entradas podrían ser inferiores, y en el otro sentido, si bien las salidas podrían ser mayores.

Analizando primero las salidas, se podrían elegir valores de descarga en el tramo final del Duero mayores al valor considerado inicialmente, que representa aproximadamente el valor medio. Según lo analizado a lo largo del trabajo y el conocimiento que se tienen del acuífero, sí sería viable que en esta zona final del Duero la descarga sea mayor. Según los valores estimados en el análisis de aforos, podría ser que la descarga real sea de casi 1000 hm³/año en lugar de los 720 hm³/año estimados inicialmente.

Con respecto a las entradas, el término relativo a la infiltración en cauces tampoco dispone de mucho margen de reducción, se podría reducir en 50 hm³/.

El otro término de entradas se corresponde con las transferencias laterales y la recarga subterránea. De las transferencias laterales no se dispone de más información que las

cifras, por lo que no se tiene ningún criterio fundado como para modificar los valores. En el caso de la recarga subterránea se conoce mejor las limitaciones asociadas a su estimación.

La variación de los valores de infiltración con que se ha trabajado hasta la actualidad ha sido siempre descendente, y en cada uno de los trabajos de actualización las cifras han sido inferiores a los anteriores, por lo que parece claro el sobredimensionamiento de este término. La estimación de cuanto se podría disminuir este término es compleja, pero conociendo el resto de términos, la suma de las transferencias y la recarga debería oscilar en torno a 600 hm³/año.

En la Tabla 31 se muestran los valores propuestos para la estimación del balance en régimen natural. En color rojo aquellos modificados con respecto a los valores medios utilizados en la situación inicial.

Régimen Natural		Escenario Estacionario b		
Entradas				
Termino balance	Descripción	max	min	Considerado
Infiltración en cauces	Zona Pisuerga	250	200	210
	Cea	70	50	60
	Duratón	60	40	50
	Duero T4	60	40	50
	Duero T8	360	-120	0
	Total	740	170	370
Recarga por Lluvia + Transferencias	Recarga	1446	857	
	Transferencias	165	165	
	Total	1611	1022	590
Total				960
Salidas				
Termino balance	Descripción	max	min	Considerado
Drenaje en Cauces	Duero T9	480	180	480
	Duero T8	120	-360	0
	Duero T7	480	0	360
	Duero T3	180	90	120
	Total	1260	-90	960
Total				960

Tabla 31: Datos para la estimación del balance en régimen natural ajustando las cifras de entrada y salida al acuífero.

El valor de infiltración en el balance supone aproximadamente un 50 % de la considerada inicialmente, lo que supone una cantidad muy grande. No obstante parecen cifras razonables dadas las salidas que se dan en el acuífero.

4.3. Régimen influenciado por los bombeos

4.3.1. Introducción

A continuación se presenta el análisis del régimen influenciado por los bombeos. Se exponen las características principales de las extracciones y el efecto que han tenido sobre el estado del acuífero.

Como se vio en el apartado correspondiente a las extracciones, es complejo determinar la evolución de las extracciones en el tiempo, así como caracterizar la situación actual, desde el punto de vista cuantitativo y de la distribución espacial de las mismas. Por ello, al igual que con el resto de variables, se ha de ser consciente de que los datos están sujetos a una gran incertidumbre, y aún más las estimaciones de la evolución histórica de las extracciones.

4.3.2. Bombeos

Evolución

En el apartado de bombeos se propone una estimación de la evolución de las extracciones desde el año 1940 hasta la actualidad, que se representa en la Figura 162.

En la propuesta de evolución se considera que en 1940 comienzan a desarrollarse las extracciones mediante pozos poco profundos (inferiores a 200 metros), y aumentan de forma moderada y progresiva hasta ubicarse en torno a los 200 hm³/año a principios de 1970. Es en este momento donde se comienzan a desarrollar pozos de extracción a profundidades mayores, y donde durante aproximadamente la siguiente década se produce un gran desarrollo de las extracciones, tanto en las más profundas como en las más someras, hasta alcanzar valores máximos en torno a 1100-1200 hm³/año a comienzo de los años 80. En este momento las extracciones profundas son ya más cuantiosas que las más someras. Los siguientes veinte años los valores se mantienen entre 1000 y 1200 hm³/año de forma relativamente constante, y a partir del año 2000 aproximadamente comienzan a descender ligeramente hasta ubicarse en la actualidad alrededor de los 800 hm³/año, de los cuales prácticamente el 60 % son bombeos a profundidad superior de 200 metros.

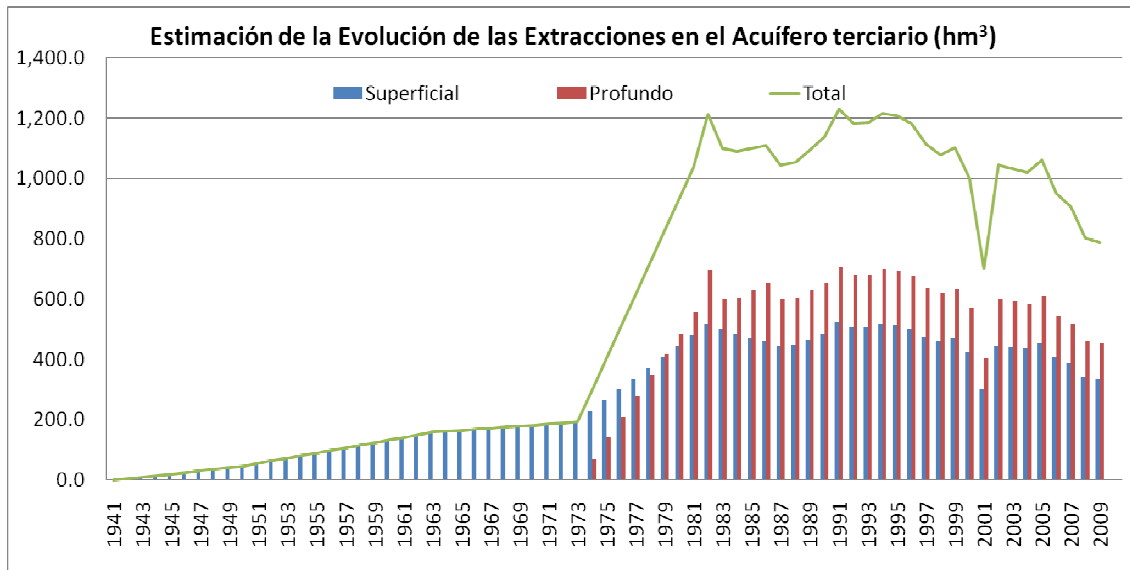


Figura 162: Estimación de la evolución de las extracciones en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.

Por otro lado, es importante comentar que en el conjunto compuesto por las MAS 52, 45, 47, 48, 38 y 67, correspondientes a las zonas de Arenales, el acuífero bajo los páramos y la MAS Salamanca, se bombean alrededor de 639 hm³, que suponen el 86 % del total de las extracciones, lo cual permite hacerse una idea de la concentración de las extracciones en la zona central. Además, del total de los bombeos en esta zona central, 417 hm³ son profundos, el 98 % de todos los bombeos profundos de la cuenca.

En la figura siguiente se muestra la zona central donde se acumulan la mayoría de las extracciones. Las MAS en dicha zona están señaladas con borde azul. Las MAS correspondientes a los páramos no pertenecen a este grupo, y están seleccionadas para representar de forma aproximada la superficie de la MAS 67 Acuífero Profundo Bajo Los Páramos, ubicada debajo de éstas.

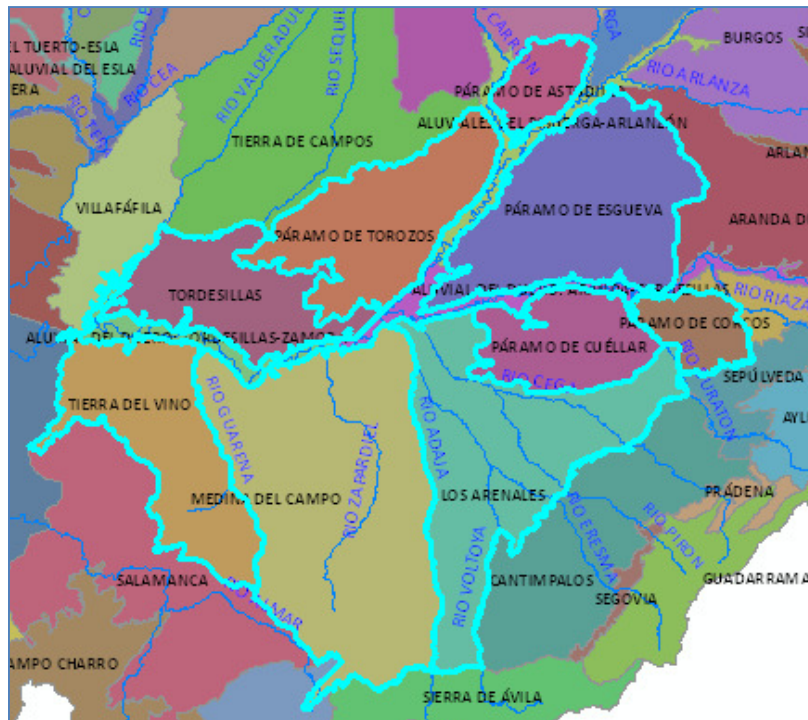


Figura 163: Mapa de la zona central de la cuenca donde se concentran la mayoría de las extracciones.

La Figura 164 muestra la serie de extracciones anterior conjuntamente con las entradas al acuífero en concepto de infiltración por agua de lluvia y transferencias laterales (datos de SIMPA, y OPH-2009, respectivamente). Se aprecia como a partir del año 1980 las extracciones superan a la recarga. La diferencia es aún mayor de lo que muestra la figura, ya que como se concluyó en el balance en régimen natural los datos de SIMPA están sobredimensionados.

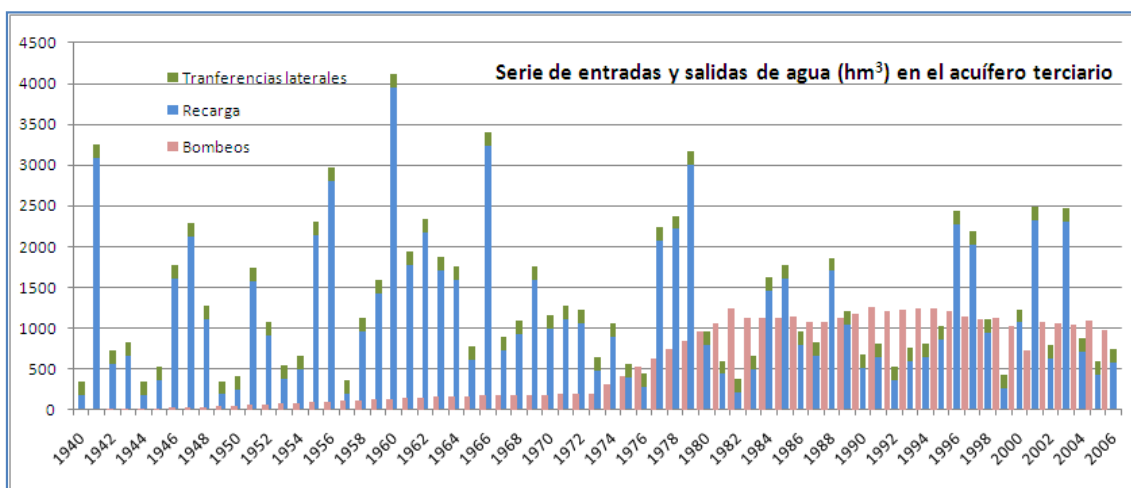


Figura 164: Serie de entradas (infiltración por agua de lluvia y transferencias laterales) y salidas del acuífero (extracciones) en el periodo 1940-2006.

4.3.3. Evolución del acuífero

La situación anterior ha provocado una serie de modificaciones en el estado natural del acuífero, las cuales se comentan a continuación:

1. Descenso de niveles piezométricos

En el apartado de piezometría se pusieron de manifiesto fuertes descensos en una parte de las MAS de la zona. Los descensos se aprecian en el periodo 1972-2000, principalmente en las MAS ubicadas en la zona central, donde se concentran la mayoría de las extracciones.

Fuera de esta zona se pueden apreciar descensos de menor entidad en la zona inferior de la MAS Tierra de Campos (por debajo de 735 m.s.n.m.), y también en las MAS de Villafáfila y Ayllón. Los descensos de las MAS Villafáfila y Tierra de Campos tienen origen en los bombeos que se dan en las propias MAS, bastante concentrados en las zonas más bajas de las mismas. En el resto de MAS no se aprecian descensos de niveles, (el escaso desarrollo de las extracciones tampoco invita a ello).

Por otro lado, en esta zona central donde se acumulan los bombeos, los descensos han sido registrados por piezómetros ubicados a diferente profundidad, por lo que se puede afirmar que el descenso es generalizado a partir de los 50-70 metros de profundidad, si bien la magnitud de los descensos si varía espacialmente, tanto en superficie como en profundidad.

La Figura 165 confirma lo anterior, en ella se muestra la evolución de los niveles piezométricos entre 40 y 100 metros de profundidad. La línea discontinua muestra las isopiezas para el periodo de referencia (1970), y la continua para el periodo actual. En color naranja se muestran las zonas de mayores descensos, y en amarillo aquellas zonas que se han mantenido estables (principalmente las zonas más altas de las MAS).

Los mapas con las isopiezas han sido proporcionados por la OPH, y se ha trabajado sobre ellos en función a los datos de piezometría presentados en este trabajo. Como se comenta en el apartado de piezometría del presente trabajo, la heterogeneidad del acuífero provoca el comportamiento variable de la piezometría en profundidad, y la incertidumbre asociada al análisis es grande, no obstante los mapas son válidos para explicar los descensos que suceden en el acuífero.

Se puede ver como los niveles en la actualidad han descendido considerablemente debido a las extracciones, y de ahí que las isopiezas retrocedan. La distribución de los descensos

no es homogénea espacialmente, y su variación parece asociada a la distribución de bombeos.

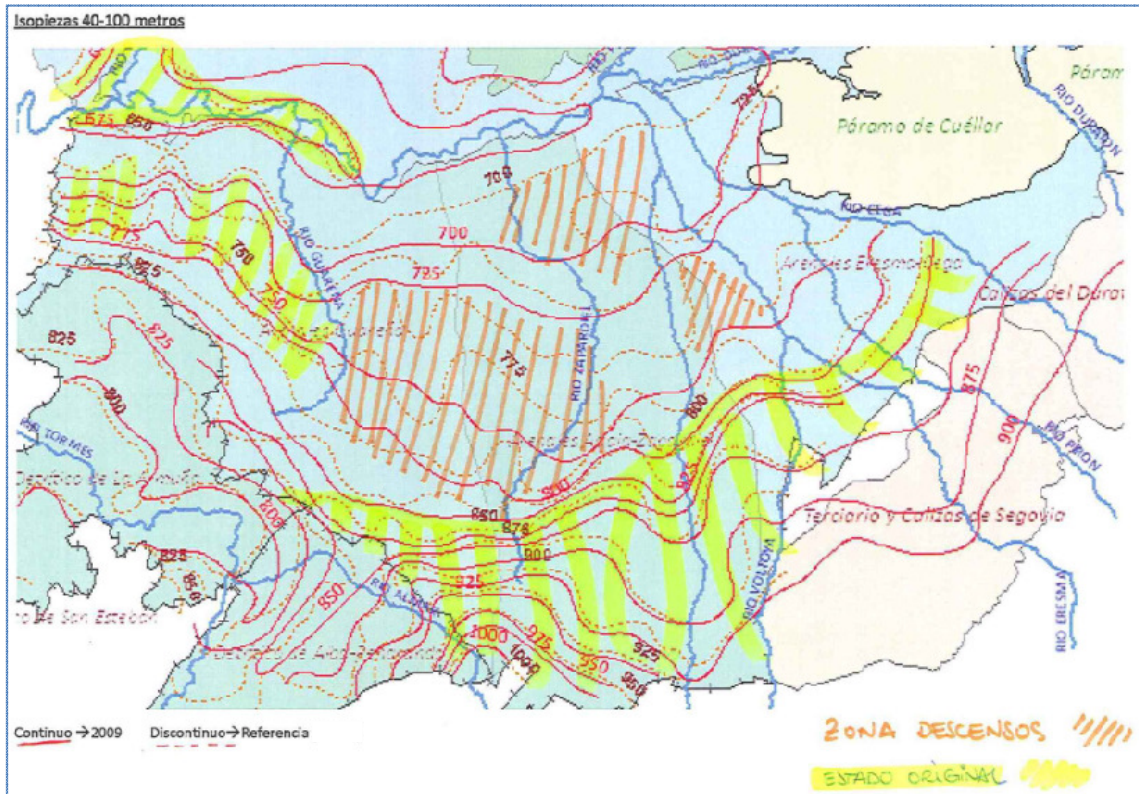


Figura 165: Comparación de las isopiezías de profundidad entre 40 y 100 metros en la zona de Los Arenales.

En el caso de los bombeos profundos ocurre algo similar, si bien los resultados son menos explícitos porque los datos piezométría en niveles más profundos son menores, y en consecuencia las isopiezías cubren una menor superficie. La simbología es la misma que en el mapa de arriba.

Se aprecian fuertes descensos en zonas cercanas a donde acontecen los descensos en estratos superficiales. En este caso los descensos parecen extenderse por la margen derecha del Duero, incluyendo la zona de los páramos, no obstante la escasa densidad de piezómetros profundos no permite conocer bien la evolución.

Al igual que ocurría en estratos más superficiales, se mantienen constantes los niveles en la parte occidental de la MAS Tierra del Vino. También hay una zona donde extrañamente, según las isopiezías, se podría haber producido un aumento del nivel piezométrico, el cual no se puede explicar bien.

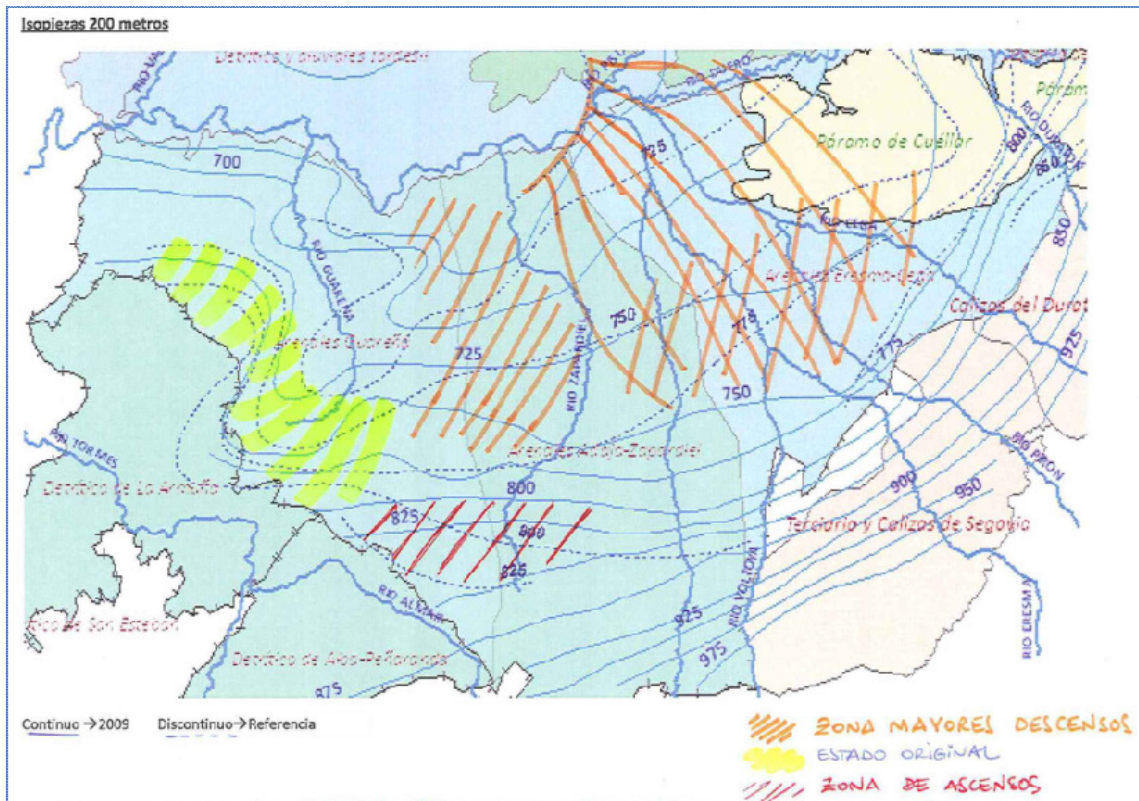


Figura 166: Comparación de las isopiezas de profundidad superior a 200 metros en la zona de Los Arenales.

2. Desconexión de cauces

Otro de los fenómenos ocasionados por las extracciones es la desconexión de cauces. El descenso de niveles en esta zona central provoca que se pierda el contacto entre el río y el nivel freático del acuífero.

Este hecho se pone de manifiesto en varios trabajos anteriores. El caso más conocido es el de los ríos Zapardiel y Trabancos, cuyo caudal estival era de componente subterránea. Se produjo la desconexión de los mismos cuando los niveles comenzaron a descender a raíz de los bombeos. Como ejemplo se muestra la Figura 167, del estudio “Los grandes acuíferos de la Cuenca del Duero” (F. J. Sánchez San Román, Universidad de Salamanca, Dep. Hidrogeología), donde se esquematiza el proceso comentado.

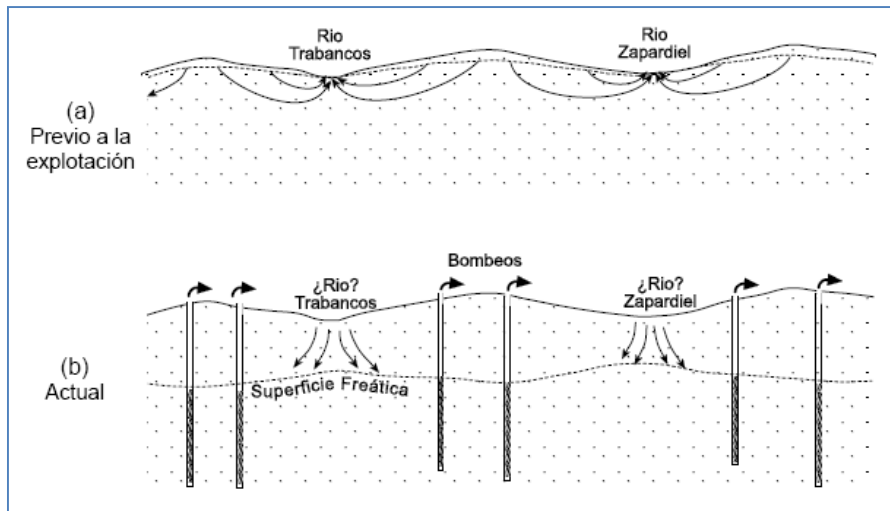


Figura 167: Esquema de la desconexión de los ríos Zapardiel y Trabancos por el descenso de la superficie freática provocado por los bombeos. Fuente “Sánchez San Román”.

Por otro lado, en el Anexo 6 se muestra un análisis comparativo de la cota de los ríos de esta zona y los niveles piezométricos registrados en los piezómetros cercanos, que se llevó a cabo con objeto de analizar este efecto. Según dicho análisis, el descenso de niveles no solo provoca la desconexión de los ríos Zapardiel y Trabancos, sino que el nivel registrado por los piezómetros (ubicados en un rango amplio de profundidad, 20-500 m) cercanos al resto de ríos (Guareña, Adaja, Eresma, Voltoya y Pirón) en todos de los casos pasa de estar por encima de la cota del río a estar por debajo, o en el límite.

Además de este trabajo, en el estudio “DGOHCA, 2002” se muestra la evolución del comportamiento de los ríos en función a un análisis similar al anterior. Se muestra en la Figura 168, y respalda los argumentos expuestos anteriormente.

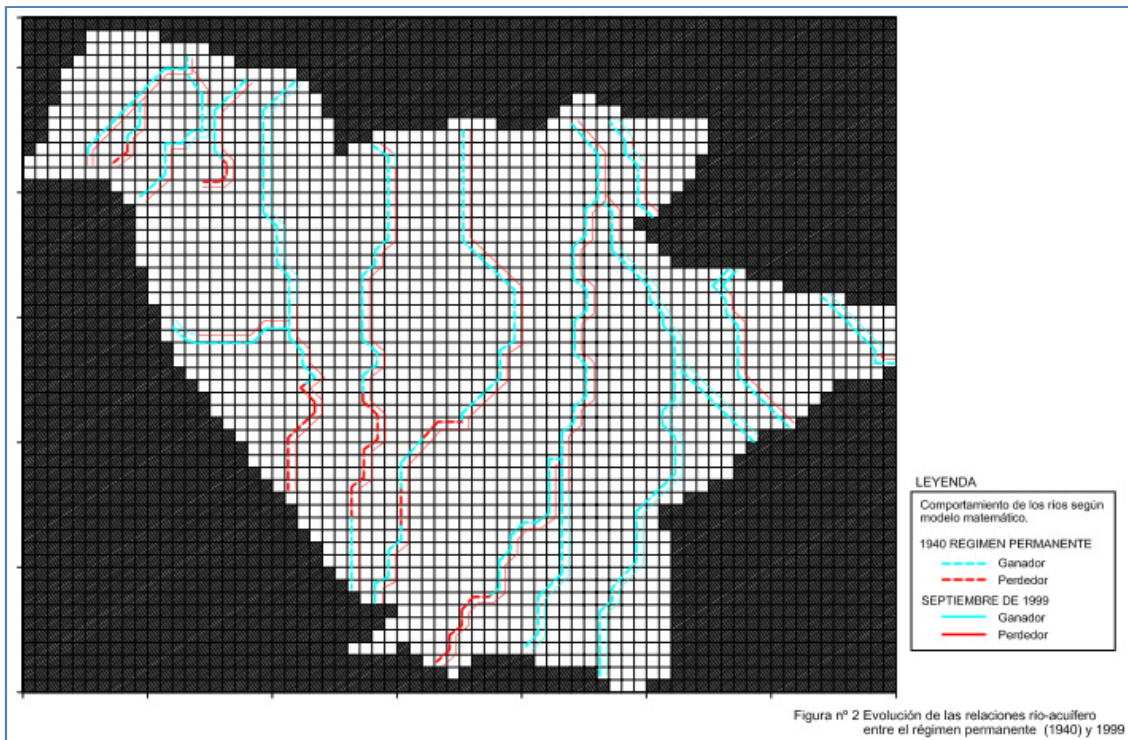


Figura 168: Evolución de las relaciones río-acuífero en la Región de Los Arenales entre los periodos 1940 y 1999. Fuente: "DGOHCA, 2002".

Aparte de los análisis de piezometría, los análisis de aforos presentados en el apartado 3 pueden arrojar bastante información a este respecto. En este caso, al analizar las diferencias entre los aforos del tramo 7 (ver Figura 141), se observa cómo a partir de 1970 las diferencias disminuyen, y sobre todo, la variabilidad de las mismas también. La interpretación es que esta variabilidad de caudales podría manifestar un régimen natural de los ríos Cega y Pirón, que desaparece a partir de 1970 por causa de los descensos de nivel del acuífero.

El proceso se esquematiza en los dibujos de las figura 169 y 170. En la primera de ellas se muestra como sería el flujo subterráneo en régimen natural del acuífero, se aprecia como el río Duero (izquierda) recibe una importante componente de flujo subterráneo profundo, infiltrado en la cabecera de la cuenca, y como los afluentes del río se alimentan del flujo de los materiales más superficiales.

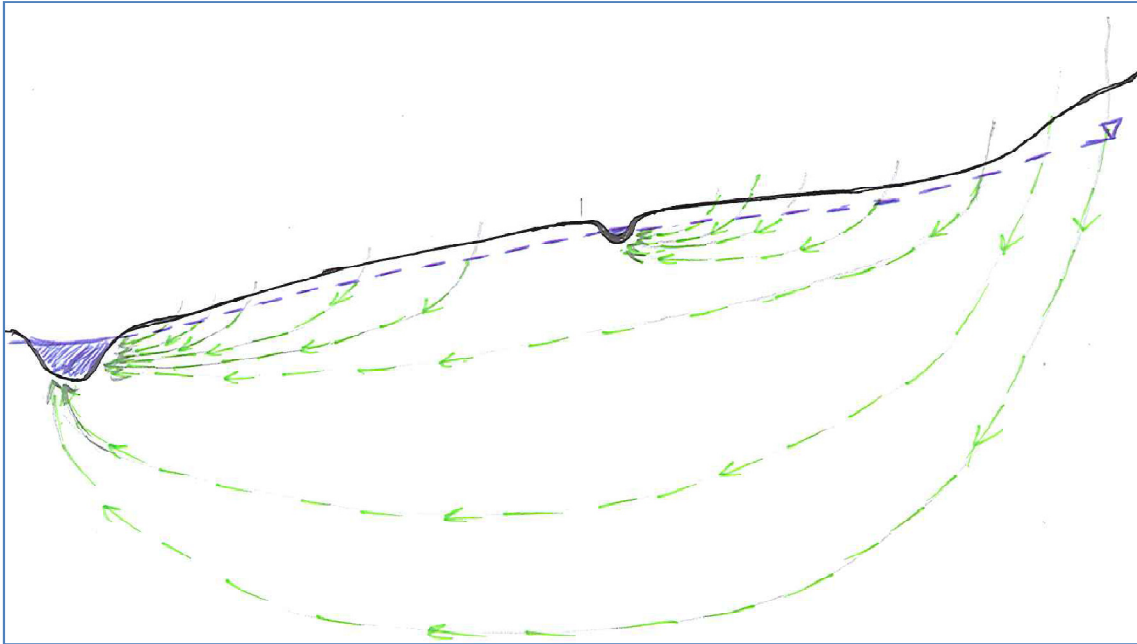


Figura 169: Esquema del funcionamiento en régimen natural del acuífero.

En régimen influenciado (Figura 169) se aprecia como el cauce intermedio queda descolgado por el descenso de niveles ocasionado por los bombeos y comienza a infiltrar agua. Se observa también la afección ocurrida en el río Duero consecuencia de las extracciones más profundas, la cual se explica a continuación.

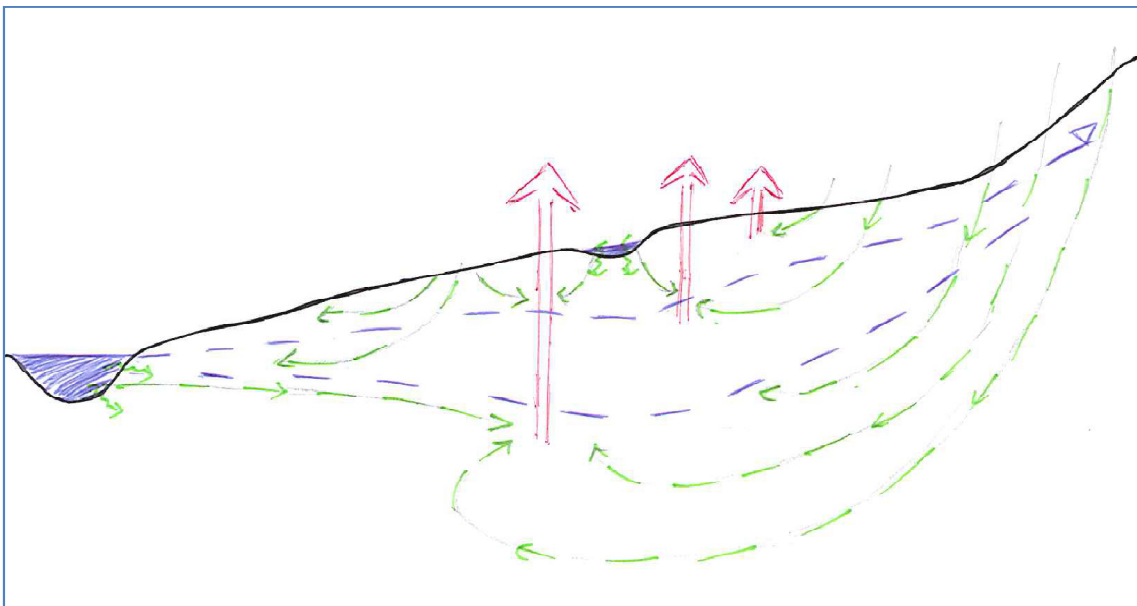


Figura 170: Esquema de la alteración del funcionamiento en régimen natural del acuífero a causa de los bombeos. Se aprecian el descenso de niveles, la desconexión de cauces y la disminución de la descarga al río.

3. Disminución de la descarga en cauces

Uno de los efectos más notables provocado por las extracciones es la disminución de la descarga en cauces.

En el apartado anterior donde se expone el problema de la desconexión en cauces, se está hablando de forma indirecta de modificación de la descarga en el río, siempre y cuando las características del lecho del río lo permitan.

Con respecto a los valores en régimen natural, en el escenario actual se ha apreciado una disminución considerable de la descarga en cauces, principalmente en los tramos finales del río Duero. En base a los resultados del análisis de aforos, la ganancia del tramo 7 del Duero prácticamente ha desaparecido en la actualidad, al igual que ocurre con el tramo 8, y sobre todo el fenómeno se aprecia en el tramo 9, que se explica a continuación.

El proceso se representa también en el esquema de la Figura 170, donde, aparte del descenso de niveles y el descuelgue de los afluentes, se aprecia como el régimen del río principal cambia de efluente a influente por el descenso de niveles que ocasionan los bombeos.

La Figura 171 se muestra la diferencia de aforos mensuales en el tramo 9 del río Duero en la época estival. Los valores de descarga se ubican en torno a un valor medio de 20 a 40 hm^3/mes en el periodo entre 1960 y 1980, y a partir de 1980 comienza un descenso de la descarga hasta la actualidad, donde las diferencias son negativas, en torno a $-20 \text{ hm}^3/\text{mes}$.

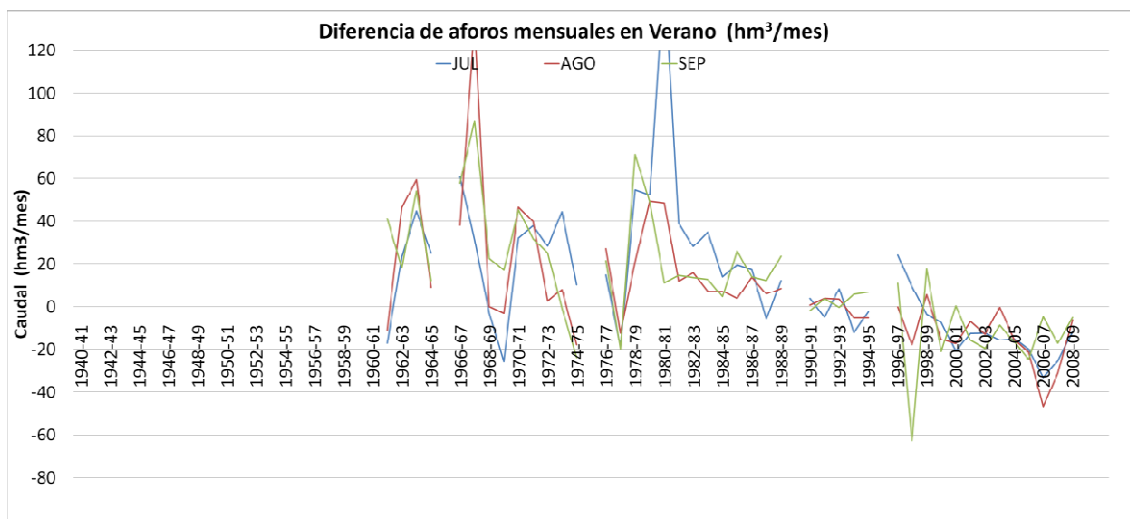


Figura 171: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.

Si bien se comentó en el apartado de infiltración que el periodo entre 1960 y 1980 era un periodo más húmedo, también es cierto que la infiltración media desde el año 1996 hasta

la actualidad es mayor que en el periodo entre 1980 y 1996, por lo que la tendencia descendiente que se aprecia en la actualidad se podría estar enmascarando.

Considerando lo anterior, así como otros aspectos ya comentados a lo largo del trabajo como la baja transmisividad vertical del acuífero, la distribución regional del flujo en el acuífero... se hace patente que la disminución de la descarga en el tramo final del Duero se debe a las extracciones.

4. Estratificación-Potencialidad de Flujo vertical

En el apartado de piezometría se muestran los mapas con las isopiezas a profundidades entre 40-100 metros y a más de 200 metros, y se comparan para seleccionar aquellas zonas donde las diferencias entre las isopiezas son grandes y se podrían dar flujos verticales, ascendentes o descendentes. En el escenario actual la situación se complica por el desarrollo de las extracciones. La principal implicación de lo anterior, más que la modificación de las zonas donde existe la posibilidad de que haya flujo vertical, ya sea ascendente o descendente, tiene que ver el modo en que el efecto de las extracciones se hace notar.

En el escenario sin bombeos los afluentes del Duero por su margen izquierda, así como los tramos posteriores al tramo 9 del mismo (tramos 7 y 8 fundamentalmente) se estarían alimentando del agua almacenada durante los primeros 200 metros de profundidad del mismo, por lo que se rigen según una dinámica de flujo a escala más local. En cambio, prácticamente la totalidad del flujo subterráneo profundo estaría descargando en el último tramo del Duero, tramo 9, una idea que estaría justificada tanto por las propias características hidrogeológicas del acuífero (morfología y parámetros hidrodinámicos principalmente), como por los resultados del análisis de aforos del propio tramo. Este límite comentado anteriormente, 200 metros, es difuso y variable, y está determinado en realidad por factores que tienen más que ver con el flujo regional en el acuífero, las relaciones con los cauces...

Al desarrollarse las extracciones (aprox. el 60 % se dan a profundidades mayores a 200 metros), aparte de la consiguiente modificación de niveles piezométricos y en consecuencia de la diferencia piezométrica entre estratos superficiales y profundos, lo que estaría ocurriendo es que el efecto de las mismas se hace notar en puntos diferentes. Las extracciones menos profundas han provocado el descenso de los niveles en los materiales del acuífero hasta 200 metros de profundidad, lo cual se ha traducido en disminución de la descarga y en ocasiones desconexión de los afluentes de la margen izquierda del Duero y

los tramos 7 y 8 del mismo. Cuando se desarrollan las extracciones más profundas, se generan descensos a 300, 500 metros o más profundidad, lo que se interpreta como que se está bombeando el agua que tiene como destino el tramo final del Duero, por lo que comienza a disminuir la descarga en esta zona.

La idea que se expone es un comportamiento hidrogeológico diferente en profundidad de los materiales terciarios, con un límite en profundidad dinámico establecido por las relaciones con los ríos (alrededor de 200 metros), por encima del cual drena en los afluentes o tramos medios del Duero (tramos 7 y 8 principalmente), y por debajo del cual el flujo (de carácter regional) se dirige hacia el último tramo del Duero. (ver figuras 169 y 170) En este escenario las extracciones en una misma zona a profundidades diferentes afectan de un modo diferente y en diferentes puntos.

5. Corrección de niveles → Estabilización y recuperación

El descenso de niveles y sus efectos asociados consecuencia de las extracciones se han hecho patentes en los apartados anteriores, no obstante, en los análisis de piezometría se ha constatado otro fenómeno consecuencia de las extracciones, que es la estabilización de los descensos y en ocasiones el ascenso de niveles en varias MAS.

Al analizar los datos de extracciones se aprecia como aproximadamente en la última década se produce una disminución de las extracciones, que descienden de valores de 1000 hm³/año hasta cerca de 800 hm³/año.

Así pues, esta disminución de las extracciones se manifiesta en el registro de muchos piezómetros, que cesan en su descenso e incluso aumentan los niveles. Es complicado explicar correctamente este fenómeno porque no se disponen de muchos registros de suficiente longitud, ya que gran parte de los piezómetros dejan de medir a partir del año 2002.

La estabilización de los niveles se aprecia en las MAS Medina del Campo, Los Arenales, Tordesillas, el acuífero profundo bajo los páramos y en algunos piezómetros de la MAS Tierra de Campos.

Como ejemplo se muestra la Figura 172, con los registros de una serie de piezómetros ubicados en la MAS Medina del Campo donde se aprecia claramente el ascenso del nivel registrado por los piezómetros. Nótese también como los ascensos son registrados por piezómetros ubicados en un rango de profundidad amplio, entre 200 y más de 500 metros.

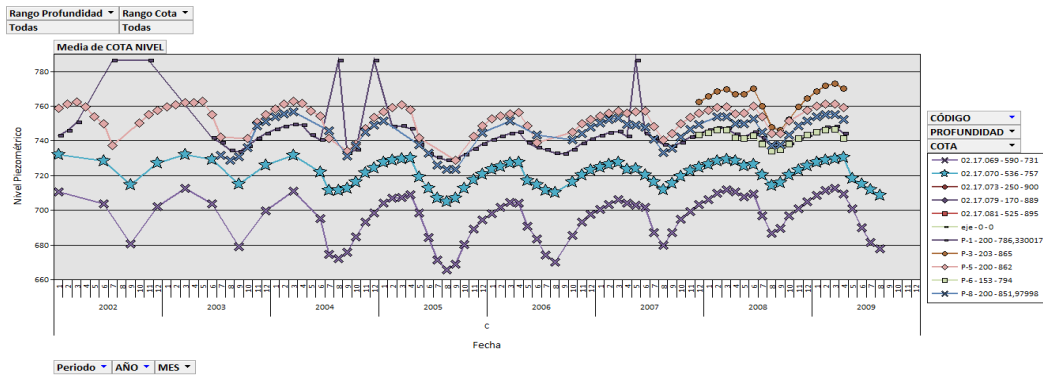


Figura 172: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.

El periodo a partir del cual el descenso se estabiliza comienza alrededor de 1996-1997 y termina sobre 2003-2004.

Después del periodo de estabilización de niveles, en la mayoría de los casos comienza un periodo de ascenso, aproximadamente sobre 2004-2005. La magnitud de estos ascensos es variable, y oscila entre los 5-10 metros que registran varios piezómetros de la zona de Tordesillas y los páramos, hasta más de 20 m que se registran en la MAS Medina del Campo.

En líneas generales, los ascensos parecen mayores en aquellas zonas donde los bombeos han sido intensos (y aparentemente mayores aún en profundidad), lo cual parece lógico si se trata de una respuesta a la disminución de las extracciones. No obstante, no se puede afirmar con certeza lo anterior pues la disminución de las extracciones no habrá sido homogénea en toda la zona.

La estabilización de los descensos, y el posterior ascenso de niveles, no implica una recuperación del sistema, simplemente son una respuesta a la modificación de una acción externa, pero el proceso no es estable. De hecho, aunque los niveles en algunas MAS comiencen a ascender, parece lo más probable es las extracciones no se hayan manifestado por completo, como muestra el análisis de aforos en el tramo 9 del río Duero. Esta discusión se abordará a continuación en el apartado 4.

4.3.4. Interpretación de la variación de la descarga

Conforme a los resultados observados, en este punto se pretende analizar la interpretación de la disminución de la descarga por efecto de los bombeos desde el punto de vista cuantitativo.

Para ello se puede plantear mediante un balance la variación de las entradas y las salidas en el acuífero hasta la actualidad comparando el año promedio para los periodos 1980-1955 y 1980-2009. Es necesaria la inclusión del término de la variación del almacenamiento por tratarse de un proceso transitorio. La igualdad sería la siguiente:

$$\Sigma \text{Bombeos} + \Delta \text{Infiltración por lluvia} = \Delta \text{Descarga en cauces} + \Delta \text{Almacenamiento en el acuífero}$$

En dicha ecuación se interpreta que la variación de las extracciones con respecto al régimen natural más la variación de la infiltración por lluvia (reducción) se traduce en la disminución del drenaje en cauces y la variación en el almacenamiento del acuífero. Lo que es lo mismo, se podría aproximar la variación de almacenamiento restando la disminución del drenaje en cauces menos la suma de las extracciones y la disminución de la infiltración por lluvia.

La cifra de bombeos en el periodo 1980-2009 oscila entre 750 hm³/año y 1200 hm³/año, con un bombeo medio en el periodo 80-95 es de 1120 hm³/año, y en el periodo 80-09 de 1057 hm³/año, aproximadamente. La infiltración por lluvia se ha reducido en torno a un 24 % (ver Tabla 5) sobre la cifra estimada tras el balance en régimen natural, lo cual supone aproximadamente unos 140 hm³/año (considerando como cifra de infiltración la estimada del balance en régimen natural). La variación de la descarga en cauces reflejada en el análisis de aforos hasta el año 1995 es de aproximadamente 900 hm³/año (el tramo 9 del Duero en el año 2000 no infiltra lo que infiltra en la actualidad), y para el periodo completo 1080 hm³/año. Las cifras se muestran en la Tabla 32.

$\Delta \text{ Almacenamiento acuífero} = \Sigma \text{ Bombeos} + \Delta \text{ Infiltración} + \text{ lluvia} - \Delta \text{ Descarga cauces}$	<i>Año medio 1980-95</i>	<i>Año Medio 1980-09</i>
Bombeos (hm ³ /año)	1120	1057
Variación infiltración(hm ³ /año)	140	140
Variación descarga en cauces (hm ³ /año)	900	1080
Variación almacenamiento en el acuífero (hm ³ /año)	-360	-117

Tabla 32: Datos para la interpretación de la disminución de la descarga por efecto de los bombeos, para los periodos 1980-1995 y 1980-2009.

Según los resultados, desde que se produce el gran desarrollo de los bombeos hasta la actualidad (periodo 1980-2009) se ha producido una variación media anual del almacenamiento de aproximadamente - 120 hm³/año durante 29 años, lo cual implica una disminución del almacenamiento del acuífero total de alrededor de 3000-3500 hm³.

Se podría interpretar como que las extracciones han provocado no solo la disminución de la descarga en cauces, sino también la disminución de almacenamiento del acuífero, sin la cual la disminución de la descarga en cauces hubiera sido mayor. Considerando estables

las cifras de bombeos y disminución de la infiltración por lluvia, si la variación de la descarga en cauces fuera inferior, como se consideró en primera instancia para la estimación del balance en régimen natural (ver Tabla 30), la variación de almacenamiento sería incluso mayor en todos los casos.

Si se observa la comparación para el periodo 1980-1995 la disminución de almacenamiento del acuífero es mayor, alrededor de 360 hm³/año, lo que supone alrededor de 5400 hm³ durante los 15 años que dura el periodo. Esta cifra comparada con la de 3500 deducida para el periodo 80-09 indicaría que ha habido una recuperación de las reservas en el acuífero durante los últimos 15 años. Esta conclusión es difícil de creer o de justificar. Sobre todo porque la descarga a cauces ha continuado reduciéndose. Si se da como válido el balance de la tabla 32 se estaría pronosticando que en el futuro se debería corregir la descarga a cauces aumentando esta.

La Figura 173 muestra a groso modo mediante un esquema la situación que podría ocurrido, en el cual la flecha roja refleja la variación de almacenamiento total en el periodo 1980-2009 y la azul en el periodo 1980-1995.

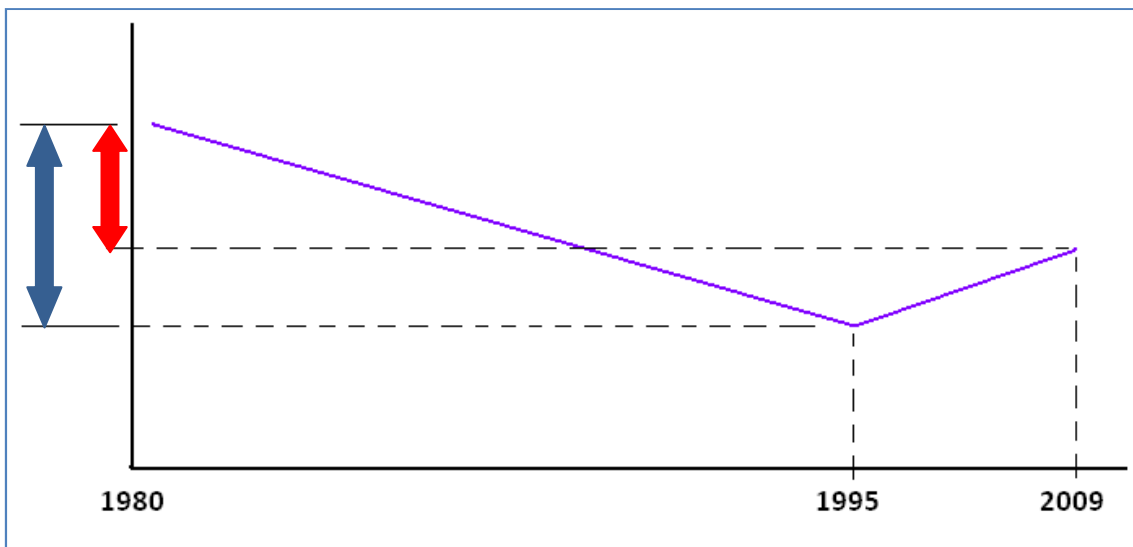


Figura 173: Esquema básico de la evolución del almacenamiento en el acuífero.

El planteamiento llevado a cabo en este apartado es una aproximación en base a valores promedio de variables que a su vez están sujetas a una incertidumbre considerable, no obstante muestra con claridad la evolución que ha sufrido el acuífero con respecto a la situación de explotación.

Con independencia de las cifras propuestas en la tabla 32, cuya exactitud es discutible. Se destacan dos hechos importantes:

- que las extracciones han disminuido significativamente en los últimos 15 años. Lo que se puede confirmar por la tendencia ascendente de los niveles en las zonas de bombeo.
- que la anterior tendencia no se ha manifestado en el drenaje a ríos. Lo cual es muy claro en el balance del tramo 9. Por lo que la situación actual del acuífero es transitoria y en el futuro debiera corregirse. En el apartado siguiente se hace una reflexión más detallada de esta conclusión.

4.4. Situación actual y previsión futura

4.4.1. Introducción

Para el análisis del escenario actual la situación es más compleja a consecuencia de las extracciones. De cara al planteamiento del balance, al no haber cesado las extracciones (acción externa) y haber existido modificaciones en la intensidad de las mismas hasta la actualidad, no se puede hablar de un proceso estacionario sino transitorio.

En este apartado se pretende profundizar en la discusión anterior por medio del planteamiento del balance en el escenario actual y considerar las previsiones futuras. Para ello se estudiarán los diferentes términos del balance del mismo modo en que se hizo en régimen natural, y se analizarán los resultados, para abordar la discusión del estado del sistema y las perspectivas futuras.

4.4.2. Planteamiento del balance

En este nuevo escenario la ecuación de balance es la siguiente:

$$\sum \text{Infiltración por lluvia} + \sum \text{Infiltración en cauces} \pm \sum \text{Transferencias laterales} - \sum \text{Drenaje en cauces} - \sum \text{Bombeos} = \Delta \text{ Almacenamiento en el acuífero}$$

Se analizan los términos a continuación:

Infiltración y drenaje en cauces

Como se vio en el apartado anterior, el efecto de los bombeos ha modificado las relaciones río-acuífero y los valores de infiltración y drenaje en cauces con respecto al régimen natural.

Las modificaciones han tenido lugar principalmente en los tramos finales del río Duero. En la zona del Pisuerga y en la Cabecera del Duero los resultados del análisis de aforos demuestran que no han existido modificaciones considerables entre el comienzo de la serie y la situación actual, por lo que se trabaja con los mismos valores que en régimen natural.

En el tramo 7 del río Duero (que incluye los ríos Cega y Pirón), se estimó que en régimen natural el río ganaba alrededor de 360 hm³ anuales. A partir de 1972 la serie se estabiliza en torno al cero, oscilando en el rango entre -20 y 20 hm³/mes. Se comentó con anterioridad que se atribuye este efecto al descuelgue de los ríos Cega y Pirón consecuencia de las extracciones.

En el tramo siguiente, entre las estaciones 2054 y 2062, el río se comporta de forma muy irregular. Del mismo modo que en el caso del régimen natural, se ha considerado que está desconectado y que no se produce intercambio en ninguno de los dos sentidos.

En el último tramo del Duero es donde más manifiesta se hace la disminución, y se pasa de una ganancia de alrededor de 480 hm³ anuales a una pérdida de entre 120 y 360 hm³ anuales.

Recopilando todos los resultados, en el escenario actual se infiltra entre 200 y 250 hm³ anuales en la zona del río Pisuerga, entre 100-120 hm³ anuales entre el río Cea y el Duratón, y entre 240 y 480 hm³ anuales en río Duero.

La definición de relaciones río-acuífero para el escenario actual en la zona central se muestra en la Figura 174:

RÉGIMEN INFLUENCIADO

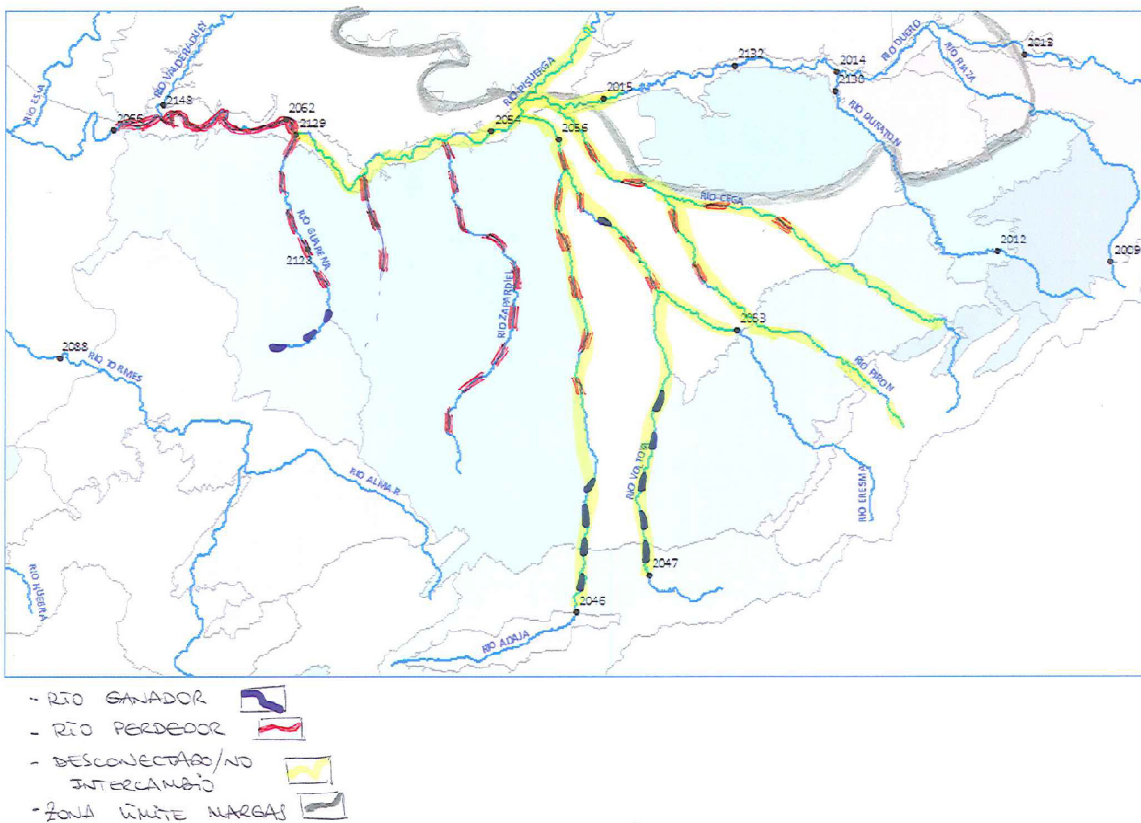


Figura 174: Definición de las relaciones río-acuífero en el escenario actual en la zona correspondiente al tronco central del Duero y sus afluentes por la margen izquierda.

Infiltración de lluvia

A la hora de seleccionar los valores de infiltración para el periodo actual es conveniente comentar de la variación de la serie de infiltración en el tiempo, no en lo referente a la variabilidad dentro del periodo 1980-2006, sino a las diferencias entre los valores utilizados en régimen natural y los actuales.

Para la estimación de la infiltración en régimen natural se comentó que a lo largo de la serie la infiltración era considerablemente mayor en el periodo 1954-1979 e inferior en los periodos anteriores, por lo que se consideró que la infiltración oscila entre 1446 hm³/año en periodos húmedos y 857 hm³/año en periodos secos, con un valor promedio de 1151 hm³/año.

En el escenario actual la infiltración es menor, hecho ya constatado por numerosos estudios anteriores que tratan de la diferencia entre la denominada serie larga (periodo 1940-1980) y la serie corta (1980-actualidad).

El valor de infiltración media en el periodo 1980-2006 es aproximadamente un 24 % inferior al equivalente en régimen natural (ver Tabla 5). Considerando el valor de infiltración como el estimado en el balance en régimen natural, y teniendo en cuenta el 24 % de reducción promedio para el periodo actual, la infiltración se estima en unos 450 hm³/año.

Transferencias laterales

En el estudio de las transferencias laterales del apartado de infiltración se cifró en 165 hm³ anuales la entrada de agua a través de las MAS externas al acuífero terciario.

Dado que no se dispone de información acerca de la posible modificación de estos flujos en régimen influenciado, se consideran constantes en el tiempo, por lo que para el escenario actual se trabajará con los valores del régimen natural. Analizando el mapa de la Figura 84 se aprecia como la gran parte de estas transferencias proceden de las zonas ibérica y cantábrica, por lo que parece coherente considerar los mismos valores ya que son zonas donde el desarrollo de las extracciones es prácticamente nulo, por lo que la modificación de las mismas parece poco probable, al menos debido a las extracciones.

Extracciones

La información relativa a la evolución y la distribución de las extracciones se analizó en el apartado 3.3. La cifra de extracciones se sitúa entre 1200 y 750 hm³/año, alrededor de los 780 hm³ anuales a fecha de 2009, de los cuales alrededor del 60 % se dan a profundidades superiores a 200 metros.

4.4.3. Discusión y previsión futura

A continuación se aplica la ecuación de balance para el escenario actual con los resultados anteriores. Los resultados se muestran en la Tabla 33, donde se muestran los diferentes términos del balance y se estima el término de la variación de almacenamiento del acuífero, como la resta entre las entradas y las salidas al acuífero. Nótese que este término sería nulo si el acuífero se encontrara en situación estacionaria.

Régimen Influenciado	Año 2009		Escenario Transitorio	
Entradas (hm³/año)				
<i>Termino balance</i>	Descripción	max	min	Considerado
Infiltración en cauces	Zona Pisuerga	250	200	210
	Cea	70	50	60
	Duración	60	40	50
	Duero T9	360	180	240
	Duero T8	120	0	0
	Duero T7	240	-240	0
	Duero T4	60	40	50
	Total	1100	230	610
Recarga por Lluvia + Transferencias	RN	590	24 % < RN	448
	Total			448
Total				1058
Salidas(hm³/año)				
<i>Termino balance</i>	Descripción	max	min	Considerado
Drenaje en Cauces	Duero T7	120	-120	0
	Duero T3	180	90	120
	Total	300	-30	120
Bombeos	Bombeos	1000	700	800
	Total	1000	700	800
Total		1300	670	920
Balance: (E - S = Δ V) (hm³/año)	Variación de Almacenamiento			138

Tabla 33: Datos para la estimación del balance en el año 2009.

Según los resultados del balance, en el año 2009 se estaría produciendo en el acuífero la entrada de unos 1060 hm³ anuales (610 hm³ anuales por infiltración en cauces y 450 hm³ anuales por recarga de lluvia), de los cuales 120 hm³ anuales drenan a los ríos, 800 hm³ anuales se bombean y 140 hm³ anuales se traducen en aumento del almacenamiento del acuífero.

Este aumento del almacenamiento se justifica en la disminución de las extracciones en los últimos años y es reflejado a su vez en los análisis de piezometría.

Por otro lado, el resultado también es coherente con el mostrado en el apartado 4.3.4. Interpretación de la variación de la descarga, en el cual se muestra que durante aproximadamente los últimos 10 años la disminución del almacenamiento ha cesado bastante, de ahí que la variación promedio anual para el periodo 1980-2009 se inferior a la del periodo 1980-1995. Se podría hablar entonces de una fase en la que el acuífero está recuperando parte del almacenamiento perdido en la época de mayor extracción.

Previsión futura

En base a los resultados de los balances parece claro que el acuífero se encuentra en una situación transitoria.

Los registros piezométricos y el análisis de aforos han puesto de manifiesto que las extracciones han provocado dos tipos de respuesta del acuífero; una en forma de descenso de niveles (muestra de la disminución del almacenamiento del acuífero) y la otra en la disminución de la descarga al río. El primero de los efectos parece haberse mitigado en la última década consecuencia de la disminución de las extracciones, de ahí el aumento del nivel de los piezómetros, reflejado también en los resultados del balance para el año 2009 (Tabla 33). Con la disminución de la descarga en cauces no ocurre igual. Como se aprecia en el análisis de aforos del tramo 9, la tendencia descendente de la descarga no se estabiliza. Es por esto que no se puede afirmar que el acuífero se ha recuperado de la alteración, pues sigue “demandando agua” a través de los cauces, principalmente el tramo 9.

Entonces, dado que los resultados muestran que el acuífero está reaccionando a estas modificaciones en la cifra de bombeos, hasta llegar de nuevo a una situación estacionaria sería necesario que se estabilicen las extracciones y termine de manifestarse el efecto de éstas. A partir de entonces se podría hablar de una situación de nuevo equilibrio

sostenible del sistema, que se manifestará por medio de la estabilización de los niveles piezométricos, y de una situación de intercambio a través de los cauces.

Este nuevo equilibrio será diferente al que existía en régimen natural. Los niveles se estabilizarán pero no en los mismos niveles del régimen natural, sino en los niveles correspondientes a la nueva situación, determinada por el equilibrio entre el estado inicial del acuífero y las acciones externas sobre el mismo, como son la recarga y los bombeos.

En el caso de las relaciones del acuífero con los ríos ocurre lo mismo. Cuando se establezca la cifra de bombeos y termine de manifestarse el efecto de éstos, los niveles se estabilizarán y se establecerá un nuevo escenario de conexiones con los ríos que determine el funcionamiento del sistema.

Sería bastante probable que con el paso del tiempo la descarga en el tramo final del Duero se restableciera, ya que supone la principal zona de descarga de la componente profunda del flujo del acuífero. Además, la modificación del tramo ha sido ocasionada por una acción externa que se supone que va a cesar hasta estabilizarse. Los valores de descarga no serán los del régimen natural sino unos diferentes correspondientes a la nueva situación de equilibrio.

Estimar el momento en que se puede alcanzar este equilibrio no es posible, y menos aún con la incertidumbre que rodea a todo este tipo de análisis. Hay que recordar también otra característica que se ha explicado anteriormente, que es que este acuífero por su gran extensión también muestra grandes oscilaciones en los niveles y en la descarga media causadas por la variación climática. Esto hace que las cifras medias que se plantean puedan resultar muy alejadas de la realidad para un periodo cualquiera de varios años.

5. Conclusiones

Datos disponibles

El presente estudio ha supuesto un gran esfuerzo de recopilación de información, tanto cualitativa como cuantitativa. En esta línea, el trabajo comporta además la actualización hasta la fecha actual de los datos disponibles.

Una de las conclusiones fundamentales de este trabajo tiene que ver con la necesidad de mejorar la calidad y la cantidad de datos disponibles. Este aspecto ya se puso de manifiesto en los apartados de piezometría, análisis de aforos y extracciones, principalmente en lo referente a resolución espacial y calidad de los datos.

En el primero de los casos la incertidumbre en muchos de los registros piezométricos es muy alta, y en otras zonas no había registros suficientes para analizar el comportamiento del acuífero, principalmente en los más profundos. De los resultados de este trabajo se deduce también la importancia de aumentar la red de control en el entorno del tramo 9. Al cual nunca se le ha prestado atención en trabajos anteriores al estar aparentemente fuera del área de influencia de los pozos. Sin embargo, aquí se comprueba que este tramo es el receptor final de buena parte del drenaje del acuífero, sobretodo de los flujos profundos.

En el caso de los aforos se han encontrado varias limitaciones, relacionadas con la longitud de los registros, con la distribución de las estaciones o con el error de medición en las mismas. La revisión de las curvas de gasto de las estaciones, así como la construcción estratégica de otras sería de gran utilidad.

Con respecto a las extracciones parece estar controlándose el gran aumento de éstas durante la última década, no obstante dado el gran número de usuarios y la falta de agrupación de los mismos es complicado el control de la actividad. No obstante, se cree de vital importancia la recopilación e interpretación de toda la información histórica hasta la actualidad, y el establecimiento de medios directos de medición.

Recarga subterránea por infiltración de lluvia

En el análisis de la recarga refleja la gran incertidumbre asociada a esta variable, así como las limitaciones del modelo SIMPA en su planteamiento. Consecuencia de ello, la modificación de los valores de infiltración ha sido constante en los últimos 10-15 años, con valores generalmente inferiores a cada nuevo trabajo realizado acerca del tema.

En el presente trabajo, por medio de la estimación de los balances en régimen natural y régimen actual, se constata un sobredimensionamiento de la cifra de recarga de alrededor del 50 % del valor con que trabaja en la actualidad.

A pesar de lo llamativo del resultado, la desviación del valor actual con respecto al estimado mediante los balances es en cierto modo normal dado que el modelo SIMPA de que se obtuvo está conceptualizado para trabajar a escala nacional, con las generalizaciones que ello conlleva. En este sentido resulta coherente que los resultados del modelo no se ajusten del mismo modo en cuencas pequeñas de cabecera como en cuencas grandes con materiales de espesores de más de 1000 metros.

Dado que la fiabilidad de los resultados del modelo depende del tipo de cuenca en la que se trabaje, los trabajos posteriores de revisión y adecuación, o elaboración en su caso, de los modelos de precipitación-aportación a cada cuenca se antojan fundamentales para una mejora en la estimación de los recursos hídricos disponibles y su origen superficial o subterráneo.

Interpretación del funcionamiento del acuífero

Probablemente la aportación principal del trabajo sea la interpretación del funcionamiento del acuífero en su conexión con el río Duero y los afluentes de sus tramos medio y bajo, y en las afecciones sobre esta conexión derivadas de las extracciones.

Los trabajos previos realizados a este respecto se basan en la idea de que tanto los descensos de niveles piezométricos como las modificaciones de las relaciones río-acuífero se manifiestan en las zonas inmediatamente cercanas a los bombeos. De este modo se justifica disminución de la descarga, en ocasiones la desconexión, de los ríos de la margen izquierda del Duero en base al total de las extracciones. Se considera además que el funcionamiento del río Duero apenas se ve alterado por las extracciones, ya que la disminución de la descarga se cifra aproximadamente en 23 hm³ anuales (“DGOHCA, 2002”).

En el presente trabajo se plantea una interpretación diferente, en la cual los tramos medios (7 y 8) del Duero y los afluentes están en relación solo con los estratos menos profundos, hasta un límite determinado por la circulación regional del flujo del acuífero, y por debajo del cual el flujo en régimen natural tiene como único destino el tramo final del Duero, donde descarga en el contacto con los materiales impermeables. De este modo, las extracciones menos profundas interfieren en los fenómenos de intercambio con los

afluentes y tramo medio del Duero, y las extracciones profundas lo que hacen es disminuir la cantidad de agua que drena en el tramo final del río Duero.

Probablemente el análisis de aforos del último tramo del río Duero, tramo 9, es uno de los resultados más interesantes del estudio por la interpretación que se hace del mismo. El funcionamiento general del acuífero terciario, con una fuerte componente regional de flujo, ha sido documentado previamente en numerosos trabajos, no obstante hasta ahora no se había puesto de manifiesto la alteración de este funcionamiento por las extracciones profundas, en muchos casos muy lejanas al tramo final del Duero. Los resultados del análisis son muy esclarecedores y ponen de manifiesto un fenómeno que explica en gran parte la evolución del acuífero en las últimas décadas.

Mejora en el conocimiento del sistema

Además de lo comentado en el apartado anterior, el trabajo permite desarrollar un conocimiento mayor del funcionamiento de la cuenca en general. El comportamiento de la cabecera del río Pisuerga como zona de infiltración al acuífero, el comportamiento de los ríos ubicados sobre el estrato de margas, la relativa estabilidad del estado de las aguas subterráneas en la cabecera del Duero y prácticamente toda la región ibérica

Métodos de análisis

La heterogeneidad y anisotropía de los materiales del acuífero terciario suponen un inconveniente grande a la hora analizar la evolución del mismo y el estado actual. Los análisis de piezometría en acuíferos de estas características resultan complejos de interpretar, y en ocasiones la información que aportan puede tener un carácter local difícilmente extrapolable.

Desde el punto de vista de la gestión resulta muy complicado la el análisis de la gestión actual y la evaluación de alternativas de gestión futuras sin una correcta interpretación del comportamiento del sistema. En este sentido, algunos de los procedimientos llevados a cabo en este trabajo aportan una valiosa información acerca del estado y comportamiento del acuífero, e incluso del resto de variables que intervienen el proceso, como pueden ser la recarga y las extracciones.

Estos procedimientos son el análisis de aforos y el planteamiento del balance en sí. Sin obviar sus limitaciones, el análisis de aforos puede suponer una herramienta muy útil no solo para el análisis de la aportación superficial de los ríos, sino, como se ha utilizado en

este caso, para el análisis de las relaciones río-acuífero entre dos estaciones de aforo. No obstante, su viabilidad está sujeta a una serie de asunciones que no en todos los casos son asumibles, lo cual ha de ser considerado.

Para el estudio del acuífero terciario del Duero, el planteamiento del balance resulta de gran utilidad porque requiere de la comparación de los términos de entrada y salida al sistema, lo cual en un caso como el actual, pone de manifiesto el desajuste en los mismos, y obliga a profundizar en el conocimiento de dichos términos.

6. Líneas de trabajo futuras

En este apartado se proponen algunas líneas de trabajo futuras que se presentan interesantes como continuación del presente trabajo. Además, a pesar de tratar toda la información disponible de forma conjunta, el trabajo ha puesto de manifiesto la necesidad de realizar revisiones de datos con mucha mayor atención.

- Conforme a lo visto en el apartado de infiltración, sería de gran utilidad la confección de un modelo de Precipitación –Aportación adaptado a las características de la cuenca, que incluya herramientas para la modelación del flujo a escala regional considerando las transferencias entre MAS.

- Respecto a los datos de aforos, en muchos casos se han identificado resultados para los que no se encuentra explicación. Un trabajo específico de la zona utilizando datos diarios junto con datos de pluviometría, usos del agua y observaciones directas en el territorio podría dar explicación a muchas cuestiones. Por el mismo procedimiento, se podría reducir en gran medida la incertidumbre en los datos que aquí se ha puesto de manifiesto.

- En cuanto a los datos de piezometría, también se ha acusado el desconocimiento de la realidad de los pozos: características del pozo, proximidad con otros pozos, etc. Este problema podría reducirse si las bases de datos de piezómetros contuvieran más información además de las series de niveles y las coordenadas topográficas.

- Por otro lado sería conveniente la aplicación de los conocimientos adquiridos en este trabajo mediante la elaboración de un modelo de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. En este trabajo se asientan las bases de las relaciones río-acuífero, así como su evolución en el tiempo, lo cual se antoja fundamental para la correcta definición del sistema. Por otro lado se presenta como una recopilación y actualización de la información acerca de las variables que intervendrían en el modelo, como son la recarga y las extracciones.

- Un modo de paliar los problemas derivados de la mala calidad de los datos de recarga sería la modelación conjunta del acuífero junto con el sistema superficial y el resto de acuíferos por el procedimiento de superposición al régimen natural. Los resultados de este trabajo proporcionan datos suficientes para la calibración de un modelo de este tipo.

- Por otro lado, una vez confeccionado el modelo, se dispondrá de una herramienta mediante la cual evaluar la actual gestión del sistema y proponer y analizar alternativas a la misma, así como llevar a cabo el planteamiento de escenarios futuros, incorporando diversas variables de decisión como los aspectos económicos y ambientales.

- Dentro de estas alternativas, la práctica de operaciones de recarga artificial es una de las que mayor aceptación está tomando en los últimos años. En la cuenca del Duero se han llevado a cabo dos operaciones de recarga artificial, en la Cubeta de Santiuste y en la del Carracillo. Los modelos serán capaces de añadir argumentos para la determinación del alcance que pueda tener una operación de recarga artificial en lo que a mejora de la gestión se refiere, así como comparar esta alternativa con otras como la sustitución de fuentes de suministro de agua, la construcción de infraestructuras...

7. Bibliografía

- “Los Grandes Acuíferos de la Cuenca del Duero”, Francisco Javier Sánchez San Román, Universidad de Salamanca, posterior al año 2005.
- “Mapa Hidrogeológico de Castilla y León, escala 1:500.000”, Junta Castilla y León, 1995.
- http://aguas.igme.es/igme/publica/lib86/pdf/lib86/in_05.pdf
- “Estudio de las posibilidades de utilización conjunta de los embalses superficiales y subterráneos de la cuenca del Duero. Margen izquierda y cabecera”, SGOP, 1982.
- “Plan de Utilización Conjunta de los Recursos Superficiales y Subterráneos de las cuencas Cega-Pirón y Adaja-Eresma”, TFC Pedro Morales Cano, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- “Curso sobre Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas”, Valencia-Castellón de la Plana, Abril 1983. (Varios autores; Referencia a A .Sánchez González)
- “Modelo de utilización conjunta de la cuenca del Duero”, J. Marco Segura, Joaquín Andreu Álvarez, Universidad Politécnica de Valencia, 1983.
- “Hidrología Subterránea”, Emilio Custodio y Ramón Llamas, Ediciones Omega, 1983.

8. Índices

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Mapa de isobatas del Terciario de la Cuenca del Duero. 1) Neógeno y Cuaternario. 2) Paleógeno. 3) Mesozoico. 4) Rocas plutónicas y metamórficas. 5) Paleozoico y Precámbrico. 6) Principales áreas investigadas. 7) Isobatas (en m). ALONSO GAVILÁN, G. et al (1983).....	8
Figura 2: Esquema estratigráfico de las facies miocenas (DEL OLMO, P. y PORTERO, J.M.; RÍOS, 1982.....	10
Figura 3: Esquema geológico de la cuenca del Duero. (Fuente: “Los Grandes Acuíferos de la Cuenca del Duero”, F. J. Sánchez San Román, en adelante Sánchez San Román).....	11
Figura 4: Esquema general de flujo subterráneo en la cuenca del Duero (Fuente: OPH, 2009)	13
Figura 5: Mapa de la Región de Los Arenales con la correspondencia entre las Masas de Agua Subterránea (negro) y las Unidades de Modelación (rojo).....	18
Figura 6: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad menor de 100 metros con nivel piezométrico inferior a 850 m.s.n.m.....	22
Figura 7: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 6 en azul. En amarillo el piezómetro 141820002.....	23
Figura 8: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.....	23
Figura 9: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 8 en azul. En amarillo el piezómetro 02.17.62.....	24
Figura 10: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.....	25
Figura 11: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.....	26
Figura 12: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 10 en azul y de la Figura 11 en amarillo.....	26
Figura 13: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.....	27
Figura 14: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros de la Figura 13 en amarillo.....	27

Figura 15: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales-Guareña para el periodo de tiempo 1999-2009.....	28
Figura 16: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales-Guareña con la ubicación de los piezómetros 02.17.61 y 02.17.66 en azul.....	28
Figura 17: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.	29
Figura 18: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.	30
Figura 19: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 18 en azul.....	30
Figura 20: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.	31
Figura 21: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 20 en azul.....	31
Figura 22: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-150 metros.....	32
Figura 23: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 22 en azul.....	33
Figura 24: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-150 metros.....	33
Figura 25: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 24 en azul.....	34
Figura 26: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 150-200 metros.....	34
Figura 27: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 26 en azul.....	35
Figura 28: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	35
Figura 29: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	36
Figura 30: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 28 en amarillo y los de la Figura 29 en azul.....	36
Figura 31: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para el periodo de tiempo 1999-2009.	37

Figura 32: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros ubicados con nivel piezométrico superior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.	37
Figura 33: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 32 en azul.....	38
Figura 34: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.....	38
Figura 35: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 34 en azul.....	39
Figura 36: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.....	39
Figura 37: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales- Adaja-Zapardiel con la ubicación de los piezómetros de la Figura 36 en azul.....	40
Figura 38: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros.	41
Figura 39: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 100 metros y nivel piezométrico inferior a 750 m.s.n.m.....	42
Figura 40: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 39 en azul.....	42
Figura 41: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.	43
Figura 42: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados en el rango de profundidad 100-200 metros.	44
Figura 43: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 42 en azul.....	44
Figura 44: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	45
Figura 45: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 44 en azul.....	46
Figura 46: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega para el periodo 1999-2009.....	46

Figura 47: Mapa de la Unidad de Modelación Arenales Eresma-Cega con la ubicación de los piezómetros de la Figura 46 en azul.....	47
Figura 48: Series de nivel piezométrico anual medio en la Zona de los Páramos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.	48
Figura 49: Series de nivel piezométrico anual medio en la Zona de los Páramos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	49
Figura 50: Mapa de la Zona de los Páramos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 48 en amarillo y los de la Figura 49 en azul.....	49
Figura 51: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Villafáfila para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.....	50
Figura 52: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Villafáfila para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.....	51
Figura 53: Mapa de la MAS Villafáfila con la ubicación de los piezómetros de la Figura 51 en amarillo y los de la Figura 52 en azul.....	51
Figura 54: Mapa de la MAS Carrión con la ubicación de los piezómetros de la Figura 55.....	52
Figura 55: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Carrión.....	52
Figura 56: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros y nivel piezométrico superior a 735 m.s.n.m.....	53
Figura 57: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 56. En color azul los que tienen tendencia estable y en amarillo los de tendencia descendente.	54
Figura 58: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros y nivel piezométrico inferior a 735 m.s.n.m.....	54
Figura 59: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 58.	55
Figura 60: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros y nivel piezométrico superior a 745 m.s.n.m.....	56
Figura 61: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 60. En azul aquellos cuyo registro es superior a 890 m.s.n.m.....	56
Figura 62: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tierra de Campos para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros y nivel piezométrico inferior a 745 m.s.n.m.....	57
Figura 63: Mapa de la MAS Tierra de Campos con la ubicación de los piezómetros de la Figura 62.	57

Figura 64: Series de nivel piezométrico anual medio en las MAS Aluviales de Tordesillas-Zamora, y Aluviales Aranda-Tordesillas.	58
Figura 65: Mapa de los aluviales del Duero con la ubicación de los piezómetros de la Figura 64. En amarillo el piezómetro 02.06.105.	59
Figura 66: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Aluviales del Pisuerga-Arlanzón.	59
Figura 67: Mapa de la MAS Pisuerga-Arlanzón con la ubicación de los piezómetros de la Figura 66.	60
Figura 68: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tordesillas para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.	60
Figura 69: Mapa de la MAS Tordesillas con la ubicación de los piezómetros de la Figura 68. En amarillo aquellos con tendencia estable, en azul el resto.	61
Figura 70: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Tordesillas para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	61
Figura 71: Mapa de la MAS Tordesillas con la ubicación de los piezómetros de la Figura 70.	62
Figura 72: Mapa de la MAS Ayllón con la ubicación de los piezómetros de la Figura 73.	62
Figura 73: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Ayllón.	63
Figura 74: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Salamanca para los piezómetros ubicados a profundidad inferior a 200 metros.	64
Figura 75: Series de nivel piezométrico anual medio en la MAS Salamanca para los piezómetros ubicados a profundidad superior a 200 metros.	64
Figura 76: Mapa de la MAS Salamanca con la ubicación de los piezómetros de la Figura 74 en azul y los de la Figura 75 en amarillo.	65
Figura 77: Mapas de isopiezas superficiales (profundidad entre 40 y 100 metros) en la cuenca del Duero para el escenario de referencia (1972, en color rojo) y la situación actual (2009, en color azul)	66
Figura 78: Mapas de isopiezas profundas (profundidad mayor de 200 metros) en la cuenca del Duero para el escenario de referencia (1972, en color rojo) y la situación actual (2009, en color azul)	67
Figura 79: Series de nivel piezométrico para el periodo 1996-2009 en los piezómetros 02.17.090 y 02.17.104.	73
Figura 80: Mapa con la ubicación de los piezómetros representados en la figura anterior.	74
Figura 81: Mapa de isopiezas para el año de referencia en la Región de Los Arenales. Las isopiezas de entre 40 y 100 metros se muestran con líneas discontinuas rojas y las de más de 200 metros con líneas discontinuas azules.	75

Figura 82: Mapa de isopiezas para el año 2009 en la Región de Los Arenales. Las isopiezas de entre 40 y 100 metros se muestran con líneas simples y las de más de 200 metros con líneas compuestas.	76
Figura 83: Distribución espacial de la infiltración total anual (mm/año).....	79
Figura 84: Esquema con las transferencias entre MAS en la Cuenca del Duero agrupadas por dominios Hidrogeológicos.....	81
Figura 85: Serie de infiltración total anual, y media móvil de 5 años de la misma, para el periodo 1940-2006	82
Figura 86: Serie de infiltración mensual en la zona de estudio para el periodo 1940-2006.	82
Figura 87: Promedio mensual de Infiltración para la serie completa, la serie corta y el periodo 1940-1980	84
Figura 88: Promedio mensual de infiltración para los periodos 1940-1954, 1954-1980 y 1980-2006	85
Figura 89: Zonas seleccionadas sobre la zona de estudio para el análisis espacial de la infiltración.....	86
Figura 90: Infiltración anual media (hm ³) por grupos para los diferentes periodos y % de reducción entre ellos (eje secundario).....	87
Figura 91: Esquema de trabajo del modelo SIMPA desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos	89
Figura 92: Comparación entre las series de caudal histórico, simulado y proporcionado por el modelo SIMPA en el punto correspondiente a la estación de aforos 2085 del río Tormes.....	90
Figura 93: Esquema explicativo de las limitaciones del modelo SIMPA en la consideración del flujo regional.....	91
Figura 94: Unidades de Demanda Agraria (UDA), según el origen del agua. Fuente: CHD.....	98
Figura 95: Demanda actual total por sistema de explotación.....	101
Figura 96: Mapa de la cuenca del Duero dividido según MAS, con los extracciones consideradas en el balance.....	106
Figura 97: Evolución de la superficie de cultivo en las MAS 45, 47 y 48 según análisis de fotointerpretación. Fuente CHD.	108
Figura 98: Serie de asignación de bombeo para la U.H. Los Arenales, dividida en capas según profundidad. Fuente "DGOHCA, 2002"	109
Figura 99: Estimación de la evolución de las extracciones en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.....	110
Figura 100: Distribución de pozos para captar agua subterránea para regadío en la cuenca del Duero. Fuente CHD.....	112

Figura 101: Evolución de la superficie de regadío en la MAS Los Arenales según diversas fuentes; en rojo según datos extraídos de las Hojas 1T, y en azul de los análisis de fotointerpretación. Fuente: "TRAGSATEC, 2009".	113
Figura 102: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2036 y 2009 del río Riaza.	119
Figura 103: Mapa de la cuenca del Duero, delimitados por Masas de Agua Subterráneas, donde se ubican las estaciones de aforo utilizadas para el análisis de aforos.	121
Figura 104: Representación del estrato de margas ubicado en la Región de los Páramos, obtenido de modelo de flujo subterráneo "Duero.vmf", "OPH. 2006".	123
Figura 105: Perfil longitudinal N-S de la zona representada en la Figura 104.	124
Figura 106: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2133 y 2024 del río Pisuerga.	130
Figura 107: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 3 y 4 del río Pisuerga.	131
Figura 108: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2024 y 2020 del río Pisuerga.	132
Figura 109: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 5 del río Pisuerga.	133
Figura 110: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2016 y 2106 del río Pisuerga.	134
Figura 111: Series de aforos anuales en las estaciones 2106 y 2016 del río Pisuerga (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).	135
Figura 112: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 2 y 3 del río Carrión.	136
Figura 113: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2040 y 2134 del río Carrión.	137
Figura 114: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 3 del río Carrión.	138
Figura 115: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2134 y 2108 del río Carrión.	139
Figura 116: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2134 y 2038.	140
Figura 117: Series de aforos anuales en las estaciones 2134 y 2108 del río Carrión (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).	141
Figura 118: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1 y 2 del río Arlanza.	142
Figura 119: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2031 y 2030 del río Arlanza.	143

Figura 120: Series de aforos anuales en las estaciones 2031 y 2030 del río Arlanza (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).....	144
Figura 121: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2030 y 2028 del río Arlanza.....	145
Figura 122: Regiones Hidrogeológicas del Terciario (Fuente: IGME, 1986).....	146
Figura 123: Esquema de flujo de las regiones Ibérica y de los Páramos sobre perfil longitudinal. Fuente: IGME (http://aguas.igme.es/igme/publica/lib86/pdf/lib86/in_05.pdf).	147
Figura 124 Mapa de la zona donde se ubica el tramo 1 del río Riaza.....	149
Figura 125: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2036 y 2009 del río Riaza. En el recuadro rojo, diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo del 2010 y 2009 para el periodo 1940-1951.	150
Figura 126: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1, 2 y 3 del río Duratón.	151
Figura 127: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2130 y 2040 del río Duratón.....	152
Figura 128: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2040 y 2037 del río Duratón.....	153
Figura 129: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2037 y 2012 del río Duratón.....	155
Figura 130: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1 y 1b del río Adaja.....	156
Figura 131: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2046 y 2056 del río Adaja.....	158
Figura 132: Series de aforos anuales en las estaciones 2056 y 2046 del río Adaja (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).....	159
Figura 133: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2046 y 2056 del río Adaja.	160
Figura 134: Series de aforos anuales en las estaciones 2056 y 2046 del río Adaja, tramo 1b, (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).	161
Figura 135: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) y serie de aforos anuales (derecha) entre las estaciones de aforo 2129 y 2128 del río Guareña.....	163
Figura 136: Mapa de la zona donde se ubican los tramos 1, 2 y 3 del río Esla y el tramo 1 del río Cea.	165
Figura 137: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) y serie de aforos anuales (derecha) entre las estaciones de aforo 2143 y 2104 del río Cea.....	168
Figura 138: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 1 del río Valderaduey.	169

Figura 139: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano (izquierda) e invierno (derecha) entre las estaciones de aforo 2064 y 2126 del río Valderaduey.....	170
Figura 140: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 7 del río Duero. En azul las estaciones de aforo que lo delimitan.....	175
Figura 141: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2015 y 2054 del río Duero.....	177
Figura 142: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.....	179
Figura 143: Diferencia de aforos mensuales de los meses de invierno entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.....	180
Figura 144: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2054 y 2062 del río Duero.....	181
Figura 145: Mapa de la zona donde se ubica el tramo 9 del río Duero.....	183
Figura 146: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.....	184
Figura 147 Figura 148: Diferencia de aforos mensuales de los meses de invierno entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.	185
Figura 149: Series de aforos anuales en las estaciones 2066 y 2062 del río Duero (eje izquierdo) y diferencia entre ambas (eje derecho).....	185
Figura 150 Diferencia de aforos anuales entre las estaciones 2062 y 2066. Y serie de recarga de lluvia para la cubeta del Duero calculada con el modelo precipitación-aportación SIMPA.	187
Figura 151: Infiltración media mensual en la cubeta terciaria los periodos 1940-60, 1980-06 y 1940-2006.	187
Figura 152: Valores medios mensuales del balance entre las estaciones 2062 y 2066 calculado para periodos sucesivos de 10 años (eje izquierdo). Y balance medio anual para los mismos periodos (eje derecho).....	188
Figura 153: Serie de ganancias mensuales del tramo 2062 a 2066 clasificadas por años y agrupadas por décadas.	189
Figura 154: Serie de infiltraciones en la cubeta del Duero obtenidas de la simulación hidrológica con SIMPA.....	190
Figura 155: Caudales medios diarios (m ³ /s) entre las estaciones de Aforo 2066 y 2062 (eje izquierdo) y diferencia entre ambos (eje derecho)	191
Figura 156: Balance en la U.H. Región de Los Arenales. Fuente: “DGOHCA, 2002”	196
Figura 157: Dominios hidrogeológicos de la cuenca del Duero.....	199

Figura 158: MAS con presencia en superficie consideradas en el estudio del balance del acuífero terciario de la cuenca del Duero, en color amarillo.....	201
Figura 159: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente a los ríos Pisuerga y Cea.....	204
Figura 160: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente a la cabecera del Duero, y los ríos Riaza y Duratón.....	205
Figura 161: Definición de las relaciones río-acuífero en régimen natural en la zona correspondiente al tronco central del Duero y sus afluentes por la margen izquierda.....	206
Figura 162: Estimación de la evolución de las extracciones en el acuífero terciario de la cuenca del Duero.....	214
Figura 163: Mapa de la zona central de la cuenca donde se concentran la mayoría de las extracciones.....	215
Figura 164: Serie de entradas (infiltración por agua de lluvia y transferencias laterales) y salidas del acuífero (extracciones) en el periodo 1940-2006.....	215
Figura 165: Comparación de las isopiezas de profundidad entre 40 y 100 metros en la zona de Los Arenales.....	217
Figura 166: Comparación de las isopiezas de profundidad superior a 200 metros en la zona de Los Arenales.....	218
Figura 167: Esquema de la desconexión de los ríos Zapardiel y Trabancos por el descenso de la superficie freática provocado por los bombeos. Fuente “Sánchez San Román”.....	219
Figura 168: Evolución de las relaciones río-acuífero en la Región de Los Arenales entre los periodos 1940 y 1999. Fuente: “DGOHCA, 2002”.....	220
Figura 169: Esquema del funcionamiento en régimen natural del acuífero.....	221
Figura 170: Esquema de la alteración del funcionamiento en régimen natural del acuífero a causa de los bombeos. Se aprecian el descenso de niveles, la desconexión de cauces y la disminución de la descarga al río.....	221
Figura 171: Diferencia de aforos mensuales de los meses de verano entre las estaciones de aforo 2066 y 2062 del río Duero.....	222
Figura 172: Series de nivel piezométrico en la Unidad de Modelación Arenales Adaja-Zapardiel para los piezómetros con nivel piezométrico inferior a 800 m.s.n.m. para el periodo de tiempo 1999-2009.....	225
Figura 173: Esquema básico de la evolución del almacenamiento en el acuífero.....	227
Figura 174: Definición de las relaciones río-acuífero en el escenario actual en la zona correspondiente al tronco central del Duero y sus afluentes por la margen izquierda.....	230

Índice de Tablas

Tabla 1: Correspondencia entre las Masas de Agua Superficial y las Unidades de Modelación en la Región de los Arenales.	19
Tabla 2: Tabla resumen con los resultados de los análisis de piezometría, agrupados por MAS (UMod en su caso), y diferenciados según la profundidad, y en ocasiones la cota, de los piezómetros.	70
Tabla 3: Infiltración por lluvia y transferencias laterales por MAS, hm3.	78
Tabla 4: Infiltración anual promedio y transferencias laterales en las MAS de agua intervinientes en el balance.	80
Tabla 5: Promedio de infiltración anual para los diferentes grupos en los periodos correspondientes a la serie larga, serie corta, y el periodo 1940-1980.	86
Tabla 6: Demanda de agua suministrada de uso doméstico en los sistemas de explotación dividida según su origen. Fuente: CHD.	96
Tabla 7: Origen de los recursos por sistema de explotación para el uso agropecuario. Fuente CHD.	99
Tabla 8: Distribución de la demanda industrial.	100
Tabla 9: Resumen de demandas por origen y sistema de explotación.	102
Tabla 10: Extracciones de agua subterránea.	103
Tabla 11: Extracciones pertenecientes al uso agropecuario (92 % del total) en la cuenca del Duero, diferenciado según UDA's.	105
Tabla 12: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Pisuerga.	129
Tabla 13: Afecciones por detracción de caudal en el tramo 4 del río Pisuerga.	131
Tabla 14: Afecciones por retorno de caudal en el tramo 4 del río Pisuerga.	131
Tabla 15: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 5 del río Pisuerga.	133
Tabla 16: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 2 del río Carrión.	136
Tabla 17: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Carrión.	138
Tabla 18: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Arlanza.	142
Tabla 19: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 2 del río Arlanza.	145
Tabla 20: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Riaza.	149
Tabla 21: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Duratón.	151
Tabla 22: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 3 del río Duratón.	154
Tabla 23: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1 del río Adaja.	157

Tabla 24: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 1b del río Adaja	160
Tabla 25: Afecciones por detracción de caudal en el tramo 7 del río Duero.....	176
Tabla 26: Afecciones por retorno de caudal en tramo 7 del río Duero.....	176
Tabla 27: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 8 del río Duero.....	179
Tabla 28: Afecciones sobre el caudal circulante en el tramo 9 del río Duero.....	183
Tabla 29: Resultados del análisis de aforos, en hm ³ . Los valores negativos significan pérdidas, los positivos ganancias.....	195
Tabla 30: Datos para la estimación del balance en régimen natural.	211
Tabla 31: Datos para la estimación del balance en régimen natural ajustando las cifras de entrada y salida al acuífero.	212
Tabla 32: Datos para la interpretación de la disminución de la descarga por efecto de los bombeos, para los periodos 1980-1995 y 1980-2009.....	226
Tabla 33: Datos para la estimación del balance en el año 2009.	232

9. Anexos

Anexo N°1: Piezometría

Anexo N°2: Incertidumbre en los datos de infiltración

Anexo N°3: Análisis de Aforos

Anexo N°4: Consideración del error en los datos de aforos: discusión sobre el tramo 9 del río Duero.

Anexo N°5: Tratamiento del retardo de la afección provocada por los bombeos en el Tramo 9 del río Duero mediante el método de Theis

Anexo N°6: Análisis de Piezometría para el estudio determinación de las conexiones Río-Acuífero