

ZUBÍA. Monográfico	10	63-132	Logroño	1998
--------------------	----	--------	---------	------

## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

P. Coloma López\*

### RESUMEN

*En este trabajo se presenta una visión global de los acuíferos de La Rioja. La hidrogeología está condicionada por la geología, así podemos diferenciar tres dominios hidrogeológicos que corresponden a las tres grandes unidades estructurales de La Rioja: Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria, Dominio Cameros-Demanda y Dominio Depresión Terciaria del Ebro, cada uno de ellos con características propias. Los acuíferos en La Rioja responden a dos tipologías principales: acuíferos detríticos, desarrollados en los materiales cuaternarios de terrazas y aluviales de los ríos principales; se trata de los acuíferos del Aluvial del Tirón, Aluvial del Oja y Aluviales del Ebro y resto de afluentes, en los que la permeabilidad es de tipo intergranular; y acuíferos en rocas carbonatadas, o "kárs-ticos" en sentido amplio, en las que el agua se almacena y trasmite a través de fisuras y conductos, se trata de los sistemas acuíferos del entorno de La Demanda (sistemas de Sierra de Urbión, Brieva, Las Viniegras, Anguiano-Fresneda y Torrecilla) y de los acuíferos carbonatados de Cameros en las cuencas de los ríos Iregua, Leza, Cidacos y Alhama.*

*Los recursos de los acuíferos están en la actualidad escasamente utilizados excepto en el aluvial del Glera. La calidad del agua en los acuíferos riojanos es buena en general, sin que se detecten problemas de contaminación importantes excepto en determinadas zonas de los aluviales del Glera y Ebro.*

*Destaca el papel estratégico del agua subterránea como potencial fuente de recursos de calidad, especialmente en los abastecimientos urbanos y como una importante fuente de recursos a integrar en la gestión integral del agua.*

---

(\*) Departamento de Ciencias de La Tierra. Universidad de Zaragoza. 50009 ZARAGOZA

*Palabras clave: aguas subterráneas, acuíferos aluviales, acuíferos karsticos, La Rioja, calidad, valor estratégico, gestión integral*

*In this work is presented a global vision of the aquifers of La Rioja. The hydrogeology is conditioned by the geology, thus we can differentiate three hydrogeologic unities that correspond to the three large structural unities of La Rioja: Montes Obarenes-Sierra of Cantabria, Cameros-Demanda and Tertiary Ebro basin with own characteristics. La Rioja has three kinds of aquifers: porous aquifers, they developed in the quaternary materials of terraces and alluvial of the main rivers, it is considered the aquifers of the Alluvial of the Tiron, Alluvial of the Oja and Alluvial of the Ebro and rest of affluents, in those which the permeability is interstitial. In the aquifers in carbonated rocks, or "karstics", the water is stored and transmitted through fissures and conduits, it is considered the aquifers systems of the environment of La Demanda (Sierra de Urbión, Brieva de Cameros, Las Viniegras, Anguiano-Fresneda and Torrecilla en Cameros) and of the carbonated aquifers of Cameros in the basins of the Iregua, Leza, Cidacos and Alhama rivers.*

*The resources of the aquifers present low exploitation except in the alluvial of the Glera. The quality of the groundwater in La Rioja is good as a rule, without are detected problems of except located pollution in some zones of the alluvial of the Glera and Ebro.*

*Underlines the strategic paper of the groundwater as potential source of resources of quality, especially in the urban supplies and as an important source of resources to include in the integral management of the water.*

*Key words: groundwater, porous aquifers, karstic aquifers, La Rioja, quality, strategic paper, integral management*

## **0. INTRODUCCIÓN. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CICLO HIDROLÓGICO**

Las aguas subterráneas deben ser entendidas en el contexto del ciclo hidrológico; con frecuencia se habla de las semejanzas y diferencias entre éstas y las aguas superficiales que raramente conducen a resultados positivos, ya que con ello se trata de disociar diversos aspectos que forman parte de un todo, que es el ciclo hidrológico. La razón principal que se aduce en detrimento de las aguas subterráneas es su pobre conocimiento y dificultad de cuantificación, razón que es, cuando menos, profundamente cuestionable (Llamas, 1984; Custodio, 1991). El conocimiento de las aguas subterráneas tiene dificultades ya que no son directamente accesibles a la observación detallada, salvo en puntos concretos, que además pre-

sentan dificultades físicas e hidrodinámicas; por otro lado el medio geológico presenta variabilidad e indefiniciones inherentes a todo medio natural.

Sin embargo, las aguas subterráneas no están tan afectadas como las superficiales por procesos de carácter estocástico; este hecho simplifica notablemente el tratamiento cuantitativo y las evaluaciones; en general acorta la longitud del periodo de observación para llegar a conclusiones fiables, aunque existen notables excepciones que necesariamente han de tenerse en cuenta. Una de las excepciones que afecta más directamente a gran parte de la Península Ibérica es la evaluación de la recarga en zonas áridas y semiáridas.

El conocimiento del agua subterránea es un tema complejo ya que precisa tener un conocimiento relevante de muchas variables y factores que pueden ser sintetizadas de la siguiente manera:

Aspectos geológicos:

- composición litológica y variación en el espacio
- variaciones de espesor o potencia en el espacio
- disposición espacial de los materiales geológicos: estructura geológica

Aspectos hidrodinámicos:

- parámetros hidráulicos que rigen el flujo del agua subterránea
- mecanismos de recarga y descarga de los acuíferos
- caracterización de las áreas de recarga y descarga de las aguas subterráneas
- caracterización del flujo subterráneo en el espacio y en el tiempo:
  - piezometría
  - direcciones del flujo
- efecto regulador en las aportaciones de aguas superficiales
  - relaciones acuífero/río
  - régimen de descarga y recarga de los acuíferos

Aspectos hidrogeoquímicos:

- caracterización hidrotérmica
- caracterización hidrogeoquímica
- caracterización isotópica
- calidad del agua

En consecuencia, abordar una síntesis hidrogeológica de La Rioja comprende por una parte caracterizar la geología de esta región y por otra los acuíferos que en estos materiales geológicos se desarrollan. Así en este trabajo se ha tratado de dar una visión de conjunto de la hidrogeología de La Rioja, la tipología y caracterización de sus acuíferos, su estado de conocimiento, el grado de explotación ac-

tual y potencial de sus recursos, su calidad y su valor estratégico; sin pretender entrar en cuestiones de excesivo detalle hidrogeológico que pueden ser consultadas en las referencias bibliográficas citadas al final del trabajo.

El conocimiento del agua en La Rioja ha ido unido al conocimiento del agua subterránea en la Cuenca del Ebro. La investigación hidrogeológica básica comenzó a finales de los años sesenta; concretamente el primer trabajo de estas características en La Rioja es el de la Diputación Provincial de Logroño y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, actualmente ITGE) finalizado en el año 1969 (IGME, 1969). Posteriormente, es el IGME en el marco del Plan de Investigación de Aguas subterráneas (PIAS) realizado a principios de los 80, el primer organismo oficial que estableció un exhaustivo inventario de puntos de agua subterránea así como unas primeras redes de control tanto de caudales, niveles piezométricos y de calidad química del agua (IGME, 1983); más tarde este mismo organismo ha realizado un número importante de estudios de diferentes acuíferos (IGME, 1972, 75, 82, 83, 82-84, 85; IGME-DFN, 1984; ITGE, 86, 87a,b,c,d, 87-88, 88a,b,c,d, 89a,b, 90b,c, 91a,b,c,d, 92a,b). Otros organismos han realizado importantes investigaciones del agua subterránea en la zona; el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP, actualmente desaparecido) ha realizado numerosos estudios, fundamentalmente enfocados al abastecimiento urbano; también el IGME ha realizado numerosas investigaciones hidrogeológicas para distintos abastecimientos de La Rioja. El Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) ha realizado, en el marco del Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Valdegutur (IRYDA, 1990), varios sondeos de investigación y captación de aguas subterráneas, con resultados espectaculares. Desde la entrada en vigor de la actual Ley de Aguas de 1985, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE, 1991a,b, 94a,b, 96b) viene desarrollando una serie de estudios hidrogeológicos sistemáticos con los que poder actualizar y adecuar el conocimiento hidrogeológico a las competencias que la nueva Ley de Aguas le otorgó. Por último, para finalizar con este rápido repaso, cabe destacar la labor que se está realizando durante los últimos años en la Universidad de Zaragoza sobre los acuíferos en rocas carbonatadas de los macizos de Cameros y La Demanda, que han dado lugar a numerosos trabajos, destacando especialmente los de Coloma (1997) en Cameros y Coloma y Sánchez Navarro (en prensa) en La Demanda.

## 1. MARCO HIDROLÓGICO. LA RIOJA EN LA CUENCA DEL EBRO

La hidrología e hidrogeología de La Rioja deben ser entendidas en el contexto de la Cuenca del Ebro; si bien, como ya se ha señalado, las aguas subterráneas y superficiales forman parte de un mismo ciclo, el ciclo hidrológico; creemos conveniente describir en primer lugar el funcionamiento de las aguas superficiales, la interrelación con las aguas subterráneas se abordará en apartados posteriores.

La Comunidad Autónoma de La Rioja pertenece en su práctica totalidad a la cuenca del Ebro (figura 1), fundamentalmente a la margen derecha; así de los 5.034 km<sup>2</sup> de su superficie, 5.013 km<sup>2</sup> se incluyen en la cuenca del Ebro, lo que supone un porcentaje del 99,58 %, el más alto de entre las nueve comunidades autónomas tributarias del Ebro; si bien únicamente supone el 5,90 % de la extensión de su cuenca.

En su discurrir, el río Ebro entra en La Rioja encajado entre las Conchas de Haro y, tras recorrer con un sentido WNW-ESE más de 184 km, abandona La Rioja en el término municipal de Alfaro. Los ríos afluentes del Ebro por su margen derecha que discurren total o parcialmente por La Rioja son: Tirón, Najerilla, Iregua, Leza, Cidacos y Alhama (figura 2). Presentan una aportación media anual (en régimen natural) de 1.320 hm<sup>3</sup>/año, el 6,58 % de los 20.000 hm<sup>3</sup>/año que aporta el Ebro en un año medio en su desembocadura. Las cuencas de los ríos riojanos abarcan una superficie de 5.664 km<sup>2</sup>, de los que 3.724 km<sup>2</sup> pertenecen a La Rioja y 1.920 km<sup>2</sup> a las provincias de Soria, Navarra, Burgos y Zaragoza. De los 1.310 km<sup>2</sup> restantes de la Comunidad Autónoma, 1.293 km<sup>2</sup> vierten sus aguas directamente al Ebro. Las características de las cuencas de los ríos principales figuran en la tabla 1.

El río Tirón se incluye en su mayor parte en la provincia de Burgos, nace a una cota de 1.800 m en el sector occidental de la Sierra de La Demanda, como emisario de la laguna de Pozo Negro, al pie de Pico Otero. Penetra en La Rioja poco antes de Tormantos y desemboca a la altura de Haro; aguas abajo de Cihuri recibe por su margen derecha las aportaciones del río Oja (o Glera) que nace al pie del pico Gatón, en el sector central de La Demanda.

El río Najerilla nace en la vertiente sur de la Sierra de La Demanda a una altitud de 1.650 m; antes de discurrir por Anguiano recibe los aportes de sus afluentes Neila, Portilla y Urbión que descienden de las sierras de Neila y Urbión. Antes de desembocar en el Ebro a la altura de Torremontalvo recibe la aportación de dos afluentes importantes, el Tobía y el Cárdenas.

El río Iregua tiene su nacimiento en la sierra Cebollera a 2.100 m de altitud; en su cabecera existen multitud de barrancos que se unen en dos corrientes principales: el río Lumbreras que desciende desde el puerto de Piqueras y el río Iregua. En la zona media el río discurre entre las sierras de Camero Nuevo y Viejo desemboca en el Ebro en Logroño.

El río Leza nace en el collado de Sancho Leza a 1.400 m de altitud en la Sierra de Camero Viejo, desembocando en el Ebro a la altura de Agoncillo. Su principal afluente es el río Jubera que se une al Leza en Murillo de Río Leza.

El río Cidacos nace a 1.560 m en la Sierra de Alba; en su camino hacia el Ebro recibe los aportes de los ríos Baos, Ostaza y Manzanares. A partir de Arnedillo el

valle se ensancha y recibe en Arnedo, Quel y Autol un gran número de barrancos y llasas; desemboca en la localidad de Calahorra.

El río Alhama es el más oriental de los ríos riojanos, tiene su nacimiento al pie de la Sierra del Almuerzo (1.556 m.) y desemboca en la margen derecha del río Ebro, junto a la localidad de Alfaro. En su camino hacia el Ebro recibe los aportes de dos afluentes importantes: el río Linares por la margen izquierda y el río Añamaza por la derecha; así como de aguas procedentes de numerosos arroyos y barrancos. El río Linares, tributario del Alhama por la margen izquierda, nace en el puerto de Oncala (1.454 m), en la sierra del Alba. El río Añamaza (tributario del Alhama por la margen derecha) nace en el extremo NW de la Sierra del Madero y desemboca a la altura de Baños de Fitero.

Desde el punto de vista geográfico y morfológico la zona de estudio abarca comarcas naturales correspondientes a las Sierras de La Demanda, Urbión, Cameros y Altas Tierras Sorianas, en su parte meridional, y la Depresión del Ebro, en su parte septentrional.

De la configuración orográfica de La Rioja así como de su situación geográfica en la Península Ibérica se deriva la presencia de tres grandes áreas de influencia climática: una área atlántica (oceánica en general) cuyo origen está en los frentes nubosos procedentes del cuadrante noroeste, que son la causa de la mayoría de las precipitaciones; otra área mediterránea, ubicada en la Depresión del Ebro, marcada por una acusada sequía estival, por su fuerte carácter continental y por unas temperaturas invernales bajas; hay una tercera área, de influencia continental que afecta a las sierras de La Demanda, Urbión y Cebollera.

La estructuración de la red de drenaje -orientada *grosso modo* S/N- determina que la influencia mediterránea se manifieste de forma perpendicular a los valles, circunstancia que unida al contraste de altitud entre sierras y valles da lugar a la aparición de importantes gradientes termopluviométricos en la dirección S-N y W-E. Hay, en efecto, una disminución gradual de las precipitaciones anuales medias desde la parte occidental a la oriental. En las sierras occidentales (Demanda, Urbión y Cebollera) la precipitación supera los 1.000 mm anuales, mientras que en las orientales de la cabecera del Alhama (Alcarama, Madero) oscila entre los 500 y 600 mm. En las tierras del Valle del Ebro las precipitaciones anuales medias son notablemente inferiores, situándose entre los 350 y los 450 mm (figura 3), con presencia de episodios plurianuales especialmente secos, de precipitación por debajo de la media anual, y años muy secos en los que la pluviometría no alcanza los 250 mm. Las precipitaciones anuales máximas pueden llegar a superar en los años especialmente lluviosos los 600 mm. Las temperaturas presentan una marcada gradación altitudinal, oscilando desde los 13-14 °C de media anual en el Valle del Ebro, hasta los menos de 10 °C en las sierras occidentales. Destaca el acusado con-

traste invierno-verano. La evapotranspiración potencial se sitúa entre los menos de 500 mm/año en las sierras occidentales (Demanda, Urbión y Cebollera) y los más de 800 mm/año en la parte oriental del Valle Del Ebro.

En la tabla 1 (confeccionada con datos de Gobierno de La Rioja, 1990, 91; Martín Ranz y García Ruiz, 1982 y Martínez Abaigar y Nuñez, 1991)) se presentan las características principales de los ríos riojanos, destaca cómo la aportación específica disminuye de manera notable desde el Tirón hacia el Alhama, consecuencia de la disminución de las precipitaciones así como de la altitud media de las cuencas. El carácter mediterráneo del régimen de los ríos riojanos se acentúa igualmente desde el Tirón hacia el Alhama.

Las obras de regulación y aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales corresponden a una serie de embalses y a una densa red de canales y acequias que distribuyen el agua. Actualmente los embalses de regulación existentes en los ríos riojanos son los siguientes: Leiva (2,3 hm<sup>3</sup>) en el Tirón, Mansilla (67,7 hm<sup>3</sup>) en el Najerilla, González Lacasa (32,9 hm<sup>3</sup>) y Pajares (35,0 hm<sup>3</sup>) en el Iregua, Estanca Perdiguero (2,5 hm<sup>3</sup>) en el Cidacos y Cabretón (0,5 hm<sup>3</sup>) en el Alhama, si bien están en fase de construcción los embalses de Enciso (46,5 hm<sup>3</sup>) en el Cidacos y Valdeprado (33,5 hm<sup>3</sup>) en el Alhama. El Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro (CHE, 1996) prevé la construcción de las siguientes obras de regulación: Posadas (17,0 hm<sup>3</sup>) y Villagalijo (66,0 hm<sup>3</sup>) en el Tirón, Castroviejo (4,5 hm<sup>3</sup>), Sajazarra (5,0 hm<sup>3</sup>) y San Lorenzo (8,5 hm<sup>3</sup>) en el Najerilla, Terroba (1,7 hm<sup>3</sup>) y Robres del Castillo (6,9 hm<sup>3</sup>) en el Leza, Villarajo (9,0 hm<sup>3</sup>) en el Alhama y un embalse sin determinar en el Añamaza (de unos 9,0 hm<sup>3</sup>). De entre las obras de canalización existentes en La Rioja destacan los canales de derivación del Najerilla y el Canal de Lodosa, que deriva aguas del Ebro en la presa de Los Mártires.

La demanda de agua más importante es el regadío al que se dedica en La Rioja 45.963 ha (tabla 2) que supone una demanda de 210 hm<sup>3</sup>/año, seguida de la industrial (40 hm<sup>3</sup>/año). La población de La Rioja asciende a 266.955 habitantes, distribuida en 174 municipios, lo que supone una demanda de 24 hm<sup>3</sup>/año.

## 2. EL MARCO GEOLÓGICO

Los materiales que afloran en La Rioja comprenden desde el Precámbrico hasta el Cuaternario (figuras 4 y 5). Los materiales paleozoicos están ubicados en la Sierra de La Demanda. Afloran materiales de edades comprendidas entre el Cámbrico inferior y el Tremadoc; las litologías son muy diversas, desde dolomías a areniscas, cuarcitas, pizarras y esquistos.

El Triásico, como en el resto de la Ibérica, es de tipo germánico y está representado por las facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper. Las facies

Buntsandstein afloran bordeando los materiales paleozoicos de La Demanda, en discordancia con ellos, está constituida por areniscas, limolitas y brechas, con una potencia de 100 a 120 m. Las facies Muschelkalk sólo afloran con claridad hacia el W, en la zona de Neila-Canales de la Sierra; en otros sectores los afloramientos más frecuentes corresponden a bloques de dolomías en facies Muschelkalk; su potencia no supera los 100 m. El Triásico en facies Keuper (yesos, arcillas y margas) aflora de manera importante en el frente cabalgante de la unidad de Cameros y en torno a los macizos paleozoicos de La Demanda y Neila. La potencia general del Keuper ha sido estimada entre los 500 m del sector centro-oriental y su práctica ausencia del sector occidental (área de la Demanda).

Los materiales del Jurásico marino afloran en el frente norte de la sierra de Cameros así como a lo largo de las sierras del Madero y Moncayo, y en la zona SW, en las sierras de Neila y La Demanda. Su potencia varía entre los 300 m de la parte oriental y los 900 m de la occidental. A grandes rasgos, se pueden reconocer las unidades litoestratigráficas que han sido definidas por Goy et al. (1976) y Gomez et al. (1979) para el conjunto de la Ibérica, pese a que sus límites con frecuencia no están tan claramente definidos. De manera sintética, y siguiendo criterios hidrogeológicos que más adelante se explican, hemos agrupado a las formaciones del Jurásico marino en tres unidades:

LIAS. Grupo Renales: incluye las formaciones Dolomías Tableadas de Imón, Carniolas de Cortes de Tajuña y Calizas y Dolomías Tableadas de Cuevas Labradas; todas ellas reunidas en el denominado Grupo Renales (Goy et al., 1976); incluyen brechas, carniolas, dolomías y calizas con una potencia variables entre 120 m y más de 500 m.

LIAS. Grupo Ablanquejo: engloba las formaciones Margas del Cerro del Pez, Calizas Bioclásticas de Barahona y Margas y Calizas de Turmiel. Básicamente corresponden a facies de alternancia de calizas y margas con una potencia máxima de 180 m.

DOGGER Y MALM: incluye tres formaciones: Fm. Carbonatada de Chelva, Fm. Calizas Negras de Aldealpozo y Fm. Calizas con corales de Torrecilla en Cameros. Se trata de facies esencialmente calcáreas con una potencia muy variable entre 150 y más de 450 m.

Al final del Jurásico y durante todo el Cretácico inferior, en el sector más septentrional de la Cordillera Ibérica se formó la Cuenca de Los Cameros. Su relleno tuvo lugar en un régimen distensivo, muy subsidente, incluido en el contexto del *rifting* ibérico finijurásico-eocretácico, dando lugar a una potente serie sedimentaria de materiales en facies Weald que rellena la Cuenca de Cameros en la que se incluye gran parte de la mitad meridional de La Rioja.



El espesor de las facies Weald es extraordinariamente importante. El máximo espesor vertical reconocido en los perfiles sísmicos realizados, es del orden de 5.000 metros en sección vertical (Guiraud y Seguret, 1984; Casas, 1993; Mas et al., 1993), y de unos 9.000 metros si se miden en el sentido de desplazamiento del depocentro (Alonso et al., 1993). Más allá del límite norte de la Sierra de Cameros el espesor es del orden de 200 a 500 m, según atestiguan los datos de los sondeos de investigación petrolífera realizados en la Cuenca del Ebro (Lanaja et al., 1987). A lo largo del Anticlinal de Oncala, el espesor atravesado es de unos 1.000 m, según datos del sondeo petrolífero Castilfrío 1.

El relleno sedimentario es complejo, de ahí que los autores de trabajos estratigráficos difieran en la interpretación de la arquitectura estratigráfica del conjunto, así como en la asignación de edades. La división estratigráfica más utilizada corresponde a los grupos definidos por Tischer (1966) que son, de base a techo, los siguientes:

**Grupo Tera:** es una unidad de carácter detrítico que incluye en la base facies de conglomerados, pasando hacia la parte media de la serie a una alternancia de limolitas y areniscas con una potencia máxima superior a los 1.500 m.

**Grupo Oncala:** se trata de un conjunto predominantemente carbonatado, en el que se observa una tendencia general en la evolución de las facies, que de este a oeste se traduce en un aumento en el contenido de terrígenos, pasando de las facies fundamentalmente carbonatadas del E a las facies esencialmente detríticas del W. Su máxima potencia se alcanza en el sector oriental, donde se superan los 2.000 m.

**Grupo Urbión:** se trata de una alternancia de limolitas y areniscas con algunas intercalaciones de calizas micríticas muy arenosas. Su potencia varía entre 1.300 m y 900 m.

**Grupo Enciso:** está constituido por una alternancia de margas, margocalizas y calizas, a veces arenosas, con esporádicas intercalaciones de niveles de areniscas. En su conjunto, presenta una potencia bastante constante, estimada en unos 400-500 m.

**Grupo Oliván:** es un grupo fundamentalmente detrítico cuyos afloramientos se sitúan en la parte más septentrional de la cuenca sedimentaria. Está constituido por arcillas y limolitas rojizas y gris-verdosas, entre las que se intercalan capas de areniscas; la potencia máxima se sitúa alrededor de los 2.000 m.

El Cretácico superior está constituido en el dominio camerano por las facies Urgon y Escucha-Utrillas, que afloran en el sector más oriental de la zona del calbagamiento de Cameros, son de carácter detrítico, dominando las facies de are-

niscas. Su potencia conjunta no supera los 150 m; mientras que en las sierras de Toloño-Cantabria está representado por facies calcáreas con una potencia en torno a los 250 m.

El Terciario del Sector Riojano de la Cuenca Terciaria del Ebro está constituido por series fundamentalmente detríticas de edad Paleógeno y Neógeno. No hay datos bioestratigráficos precisos que permitan determinar sus límites inferior y superior. Los espesores máximos descritos varían entre 3.000 y 5.000 m (Antón Plaza et al., 1965; Lanaja et al., 1987; Riba et al., 1992). Los trabajos estratigráficos más modernos corresponden a Muñoz (1992) que distingue 10 unidades tectosedimentarias (UTS).

En función de la estructura y los materiales aflorantes, el surco riojano se puede dividir en dos sectores separados por el meridiano de Logroño. Al oeste de esta línea la mayor parte de los materiales son de edad neógeno y presentan una disposición subhorizontal; dominan las areniscas de grano fino y los conglomerados en las márgenes, especialmente en el meridional. Al este de Logroño las capas están plegadas con buzamientos que oscilan entre 20° y más de 60°. En el margen norte de la Depresión del Ebro los materiales eocenos son calizas marinas, margas y sales potásicas relacionadas lateralmente con areniscas y conglomerados del margen sur. Las unidades oligocenas están formadas por areniscas, lutitas y yeso que afloran en el núcleo de los anticlinales, con conglomerados en el margen sur de la cuenca. Las capas del Neógeno son lutitas y areniscas con conglomerados junto a los márgenes norte y sur.

El Cuaternario está representado por depósitos aluviales y coluviales, destacando por su desarrollo un sistema de glacis-terrazas que van desde el frente de las sierras hasta el Ebro. Gonzalo Moreno (1979) diferencia 5 niveles de terrazas para el río Ebro y afluentes, mientras que Pérez-Lorente (1979) Distingue 8; estas terrazas adquieren especial desarrollo aguas abajo de Logroño; ya que desde Haro y hasta la capital riojana, el río discurre bastante encajado en las areniscas terciarias. La composición litológica de estas terrazas es de gravas con niveles arenosos, limos y arcillas. Los glacis se disponen de manera escalonada que enlazan con cada uno de los niveles de terraza y se componen de gravas, con cantos subangulosos y matriz arenosa y limosa. La potencia media de los depósitos de glacis oscila entre 2 y 6 m y la de las terrazas entre los 10 y más de 25 m. Es interesante señalar como depósitos cuaternarios singulares los travertinos correspondientes a barreras fluviales del fondo del valle del río Añamaza y del barranco de Gutur; otras veces se asocian a surgencias como las del valle del Alhama aguas arriba de Aguilar, Baños de Fitero, manantial de San Juste (Préjano) y nacedero del Brieva, entre otros.

Estas unidades litoestratigráficas se encuentran en La Rioja representadas en tres grandes dominios geológicos de la Península Ibérica: Cadena Pirenaica, Cordillera Ibérica y Cuenca Terciaria del Ebro.

La Cordillera Ibérica está representada por el macizo de Cameros-Demanda que conforma su sector más noroccidental. Está formado fundamentalmente por materiales mesozoicos y flanqueado por dos macizos constituidos por rocas paleozoicas y triásicas: La Demanda, al oeste y el Moncayo al este y por dos cuencas de antepaís terciarias: la Cuenca del Ebro, al norte y la Cuenca de Almazán, al sur.

Las características geológicas (litológicas y estructurales) hacen que se puedan distinguir dos sectores en el macizo de Cameros (Tischer, 1966; Guiraud, 1983; Mas et al., 1993): el sector occidental, donde la potencia de los sedimentos mesozoicos supera los 2.000 m, cuya estructura la definen pliegues y cabalgamientos de dirección WNW-ESE, con vergencia sur; y el sector oriental, donde las unidades mesozoicas alcanzan los 5.000 m de espesor, y forman grandes pliegues de orientación E-W a NW-SE.

El límite norte del macizo de Cameros es un cabalgamiento de dirección E-W y vergencia norte con un desplazamiento horizontal de unos 25 km (ITGE, 1990b, Guimerà et al., 1990; Casas, 1992; Casas et al., 1995); y vertical de 4-6 km (Casas, 1996).

La estructura de la Sierra de Cameros es el resultado de la inversión tectónica de la antigua cuenca, ocurrida durante el Terciario. La geometría general es de una rampa suave en el bloque inferior, con buzamiento de unos 12°, y un rellano continuo del bloque superior situado en el Keuper (Casas, 1993), con variaciones tanto hacia el sector oriental como hacia el central. Hacia el sector oriental la rampa de bloque inferior presenta una pendiente de unos 30°. Hacia el sector central la rampa desaparece para dar lugar a un rellano en los dos bloques (Casas y Simón, 1992). El sentido de desplazamiento del bloque superior es hacia el NNW (Casas et al., 1992, Casas, 1993; Casas et al., 1995) (figura 6).

El macizo Hercínico de La Demanda incluye materiales de edad Cámbrico fundamentalmente, con afloramientos de precámbrico y ordovícico (Colchen, 1974); se caracterizan por la existencia de varios pliegues de desarrollo kilométrico y dirección E-W, con vergencia hacia el N. También existe una fracturación importante en familias de fallas kilométricas con desplazamientos verticales y horizontales, que cortan a las estructuras hercínicas y afectan, a veces, a materiales de la cobertera mesozoica. El límite norte del macizo de La Demanda es un cabalgamiento de dirección W-E a NW-SE, con una continuidad lateral de varias decenas de kilómetros. El frente cabalgante presenta una complejidad estructural importante, con una serie triásica y jurásica muy deformada. Por el sur el límite lo constituye el Sinclinal de Villavelayo que lo separa del macizo paleozoico de Neila, y que afecta a materiales mesozoicos; sus flancos buzanan entre 20° y 50°; la traza axial se reconoce hasta las proximidades de Ortigosa.

El mesozoico del SE de los macizos paleozoicos de La Demanda y Neila (zona de enlace con el macizo de Cameros) presenta una estructura básicamente tabular, con buzamientos suaves hacia el E, que se complica con la presencia de fracturas.

La zona de enlace del macizo de Cameros con la Sierra del Moncayo está caracterizado por la presencia de estructuras de plegamiento laxas de dirección ibérica (NW-SE) desarrolladas tanto en materiales jurásicos como en las facies Weald. Hacia la Sierra de Cameros presentan bruscos cierres periclinales. Hacia el borde oriental la zona queda limitada por los depósitos terciarios de la Depresión del Ebro, que fosilizan parcialmente las estructuras descritas.

Las Sierras de Cantabria-Toloño-Montes Obarenes son una unidad del dominio Pirenaico que limita el contacto de la Cuenca Vasco-Cantábrica con la Depresión del Ebro; este límite viene definido por un importante frente de cabalgamiento, de vergencia hacia el S, de los materiales meso-cenozoicos alpinos del sinclinal de Miranda-Urbaña sobre los materiales post-alpinos de la Depresión del Ebro (figura 6); presenta una orientación general E-W y una continuidad lateral del orden de 50 km. Este cabalgamiento hacia el S se produce en varias secuencias de cabalgamiento; el desplazamiento de esta ha sido estimado entre 10-15 km (Martínez-Torres, 1993; Llanos et al., 1995; Muñoz et al., 1996) y 40 km (Riba et al., 1992) en la horizontal, y 5 km en la vertical (Martínez-Torres, 1993; Llanos et al., 1995). El nivel de despegue lo constituyen los yesos del Keuper, si bien no llegan a aflorar en el frente en el sector occidental. Estas sierras incluyen fundamentalmente materiales calcáreos del Cretácico superior, con una potencia del orden de 500 m.

El sector occidental de la Cuenca del Ebro (“Surco Riojano”) es una cuenca de *foreland*, con un espesor de sedimentos terciarios del orden de 5.000 m, según atestiguan los datos aportados por los sondeos, que se encuentra constriñida al N y al S por dos importantes cabalgamientos: Pirineos occidentales (Sierra de Cantabria-Toloño) y el Macizo de Cameros-Demanda, al N y al S respectivamente. Los sondeos Rioja-1, Rioja-2, Rioja-4 y Rioja-5, atraviesan el Terciario continental y un Cretácico superior muy delgado (facies Garum). Los datos de estos sondeos, junto las interpretaciones de la sísmica de reflexión, indican la existencia de cabalgamientos ciegos en los materiales jurásicos subyacentes al Terciario, que en superficie se revelan a través de flexuras y del carácter discordante y erosivo de la base del Terciario continental (Riba et al., 1992; Coloma, 1997). La serie terciaria abarca desde el Oligoceno hasta el Mioceno superior.

### 3. LOS ACUÍFEROS DE LA RIOJA

El comportamiento hidrogeológico de los materiales geológicos está condicionado por un conjunto de factores, su determinación requiere un adecuado co-

nocimiento geológico de campo, así como una interpretación cuantitativa y cualitativa de los aforos realizados en pozos, sondeos y manantiales, y de los análisis químicos.

En relación con las observaciones geológicas de campo (litología y la estructura), inventario de puntos de agua, comportamiento hidráulico de los materiales en ensayos de bombeo, etc., se pueden diferenciar según su comportamiento hidrogeológico un conjunto de unidades y así diferenciar entre materiales acuíferos (con gran capacidad para transmitir y, en general, almacenar el agua), acuitardos (con escasa capacidad para transmitir el agua y capacidad de almacenamiento más o menos elevada) y acuicludos o impermeables (prácticamente sin capacidad para transmitir y almacenar agua); estas características se definen, esencialmente, de manera cuantitativa por los parámetros hidráulicos de los materiales, especialmente por la transmisividad (T) y por el coeficiente de almacenamiento (S).

Los materiales acuíferos en La Rioja responden a dos tipos fundamentales:

- acuíferos en materiales aluviales: desarrollados en depósitos cuaternarios, especialmente en las terrazas del Ebro; también de sus afluentes, destacando el sistema de terrazas del río Oja. Se trata de materiales acuíferos por porosidad, en los que el agua se almacena homogéneamente en los poros e intersticios que dejan entre sí las partículas. Se trata de acuíferos libres, caracterizándose por una elevada capacidad de almacenamiento (por tanto elevado coeficiente de almacenamiento, en este caso equivalente a la porosidad) y por una transmisividad más o menos elevada.
- acuíferos en materiales carbonatados: se desarrollan en todo tipo de rocas carbonatadas, desde calizas a conglomerados de cemento calcáreo, pasando por brechas, dolomías y carniolas. Se caracterizan por poseer una porosidad por fisuración y karstificación (acuíferos kársticos sensu estricto) e incluso por poseer en ciertos casos una cierta porosidad intrínseca (acuíferos de doble porosidad). En ellos el agua se almacena y transmite de manera preferente por las discontinuidades del medio, caracterizándose en general por un bajo coeficiente de almacenamiento y por una transmisividad extraordinariamente variable en el espacio y en el tiempo, pudiendo alcanzar valores mucho más elevados que en el caso de los acuíferos aluviales. Se trata de acuíferos confinados, semiconfinados o libres.

En la valoración global de las aguas subterráneas y en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos es necesario tener en cuenta no sólo los materiales acuíferos, sino aquellos que se comportan como semipermeables y que pueden jugar en ocasiones un papel fundamental en la recarga y el régimen de los acuíferos; así como de los impermeables, que limitarán la extensión de los acuíferos. En este sentido destaca en La Rioja el papel de las facies Weald que se com-

portan en general como un extenso y potente acuitardo y que condiciona el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos del dominio camerano.

Los materiales geológicos que presentan buenos parámetros hidrogeológicos (materiales acuíferos) forman unidades acuíferas (o acuíferos) individualizados por límites hidráulicos que pueden responder a varias situaciones y que no son fijos en el espacio y/o en el tiempo; pueden venir determinados por:

- límites de afloramiento (contacto estratigráfico o falla)
- líneas de máximo potencial hidráulico (divisorias subterráneas)
- líneas de mínimo potencial hidráulico (generalmente cauces efluentes)
- cambios laterales de facies
- cambios en las condiciones de afloramiento

Estos límites hacen que nos podamos referir a unidades hidrogeológicas y a dominios hidrogeológicos, constituidos estos por unidades acuíferas ligadas hidrogeológicamente y/o con un funcionamiento similar.

El Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro (PHE) (Confederación Hidrográfica del Ebro -CHE-, 1996) establece un total de 11 unidades hidrogeológicas que se incluyen total o parcialmente en La Rioja; estas son las siguientes (figura 7):

UNIDAD	TIPOLOGÍA
04.- U. H. Montes Obarenes-Sobrón	rocas carbonatadas
07.- U. H. Sierra de Cantabria	rocas carbonatadas
24.- U. H. Aluvial del Glera	materiales aluviales
25.- U. H. Aluviales del Ebro I	materiales aluviales
26.- U. H. Aluviales del Ebro II	materiales aluviales
32.- U. H. Ezcaray-Pradoluengo	rocas carbonatadas
33.- U. H. Ortigosa-Mansilla-Neila	rocas carbonatadas
34.- U. H. Jubera-Anguiano	rocas carbonatadas
35.- U. H. Fitero-Arnedillo	rocas carbonatadas
48.- U. H. Moncayo-Soria	rocas carbonatadas
60.- U. H. Valdegutur	rocas carbonatadas

Estas unidades las agrupamos en tres grandes dominios:

Unidades hidrogeológicas en materiales detríticos. Dominio de los aluviales del Ebro y afluentes: unidades hidrogeológicas 24, 25 y 26.

Unidades hidrogeológicas en materiales carbonatados. Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria: unidades hidrogeológicas 4 y 7.

Unidades hidrogeológicas en materiales carbonatados. Dominio Cameros-Demanda: unidades hidrogeológicas 32, 33, 34, 35, 48 y 60.

#### 4. DOMINIO DE LOS ALUVIALES DEL EBRO Y AFLUENTES

*Este dominio viene caracterizado por la presencia de importantes acuíferos aluviales desarrollados sobre el sustrato de los materiales terciarios de la Cuenca del Ebro, que presentan en general bajas permeabilidades. Este dominio forma un medio acuífero continuo en el que los acuíferos desarrollados en el Cuaternario del río Ebro y sus afluentes se encuentran en conexión hidráulica, sin embargo, se subdividen en unidades por cuestiones hidrogeológicas y, en general, de correcta gestión de sus aguas.*

Así, en La Rioja, podemos diferenciar tres grandes unidades:

##### **– aluvial del Tirón**

Se trata de los materiales aluviales que forman la terraza baja y la actual llanura aluvial del río Tirón, desarrollados esencialmente aguas abajo de San Miguel de Pedroso (Burgos) y Tirgo, dónde los aluviales de este río, del Glera y del Ebro pasan, sin solución de continuidad, a formar parte del mismo sistema de terrazas y aluviales. Los límites de este acuífero vienen definidos por la extensión de sus aluviales y están constituidos por los materiales terciarios de baja permeabilidad. Su extensión es del orden de 30 km<sup>2</sup>.

Es un acuífero libre en el que la superficie piezométrica está próxima a la superficie topográfica y cuyas oscilaciones están íntimamente influenciadas por el caudal del río, de manera que varía la relación acuífero/río a lo largo del espacio o del tiempo. Su recarga tiene lugar a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones y de los retornos de riego. Destaca la presencia de recarga lateral a partir de los materiales terciarios evaporíticos (Fm. Yesos de Cerezo), que si bien son de escasa importancia cuantitativa, lo son desde el punto de vista cuantitativo por la alta salinidad de los mismos; tienen lugar entre Cerezo de Río Tirón (Burgos) y Cuzcurrita de Río Tirón.

La explotación actual de sus recursos no es muy importante, se trata de extracciones para regadío y para abastecimiento de las poblaciones asentadas en su superficie; los recursos de este acuífero no han sido evaluados con mediana precisión.

##### **– aluvial del Oja o Glera**

*Incluye la llanura aluvial y las terrazas del río Oja, así como los glaciares y materiales coluviales que se encuentran relacionados con ellas. Se extiende aguas abajo del contacto entre el mesozoico del frente de la sierra de La Demanda y el Terciario de la Depresión del Ebro, concretamente entre Ezcaray y su desembocadura en el Tirón cerca de Cihuri. Presenta una superficie de 102 km<sup>2</sup>.*

El acuífero principal está definido por las terrazas bajas y el aluvial del Oja y de sus pequeños afluentes, entre los que destaca el Zamaca. Se trata de un acuífero libre de unos 12 m de espesor medio, un espesor saturado del orden de 7-8 m, una permeabilidad de 100-200 m/día (CHE, 1994), y una transmisividad del orden de 700-1500 m<sup>2</sup>/día. Las terrazas medias y altas generalmente están desconectadas hidráulicamente del sistema acuífero/río anterior y tienen un interés secundario como acuífero. Se pueden diferenciar dos niveles dentro de este sistema de terrazas, uno situado en el sector centro-oriental del acuífero (Hervías-Zarratón, de 70 km<sup>2</sup>) y otro de menor entidad en el sector septentrional (Zarratón-Haro, de 18 km<sup>2</sup>) que puntualmente pueden estar conectados con el acuífero principal. El límite más o menos impermeable de este sistema aluvial lo constituyen los materiales terciarios, en este sector de edad Neógeno.

La recarga de este acuífero procede por un lado de la infiltración directa del agua de lluvia en su superficie, y por otra de la infiltración de la escorrentía superficial procedente de los materiales terciarios y especialmente de los paleozoicos y mesozoicos de La Demanda que tienen lugar aguas abajo de Ezcaray; esta recarga tiene especial relevancia en otoño e invierno. Otra fuente importante de recarga son los retornos de riego debido al elevado aprovechamiento de los recursos del acuífero, ésta tiene lugar en primavera y verano fundamentalmente.

Las salidas naturales de este acuífero se producen en la zona baja de los cauces del Oja y Zamaca que actúan como efluentes; también en un conjunto de fuentes, de entre las que destacan la Fuente Redonda, las Fuentes del Prado y los Manantiales de Patagallina, que tienen su origen en cambios de espesor y/o permeabilidad del aluvial. Esta situación está profundamente modificada por las extracciones, fundamentalmente para regadío, que se concentran en los periodos de estiaje, y provocan cambios de situación hidráulica en las relaciones acuífero/río, y alimentan manantiales repartidos por el aluvial. Las oscilaciones piezométricas en este acuífero y en el anterior responden fundamentalmente a las oscilaciones de los episodios de bombeo.

Los bombeos para regadío rondan cifras en torno a los 10 hm<sup>3</sup>/año (del orden del 40% de los recursos hídricos utilizados en el regadío), mientras que para abastecimiento urbano (que incluye parte del industrial y ganadero) ascienden a 1,4 hm<sup>3</sup>/año (CHE, 1994b, 96b). El volumen de reservas de este acuífero rondan los 170 hm<sup>3</sup>, mientras que sus recursos medios son del orden de 50 hm<sup>3</sup>/año.

Un problema importante derivado de las prácticas agrícolas es la elevada contaminación por nitratos que presentan sus aguas subterráneas en algunos sectores, especialmente en el entorno ya aguas abajo de Santo Domingo de la Calzada, donde el contenido en nitratos supera en muchas ocasiones los 50 mg/l, cifra considerada como máxima admisible para abastecimiento urbano; este problema



ha llevado a la reciente construcción de nuevas captaciones para el abastecimiento a varios municipios de la zona.

**– aluviales del Ebro y resto de afluentes**

Incluye el acuífero aluvial del Ebro y de sus afluentes riojanos, excepto los del Glera-Tirón. A efectos prácticos no se considera incluida toda la extensión de los aluviales de los afluentes, sino las zonas que son hidrogeológicamente relevantes, así se han considerado los siguientes sectores de esos aluviales: Najerilla desde su confluencia con el río Cárdenas, Iregua aguas abajo de Islallana, Leza desde su confluencia con el Jubera, Cidacos desde Autol y Alhama desde Baños de Fitero; además en este sistema acuífero se incluyen los aluviales de los afluentes navarros: Cidacos y Arga-Aragón. Tiene una extensión considerable, del orden de los 1.000 km<sup>2</sup>, de los que aproximadamente 350 km<sup>2</sup> pertenecen a La Rioja.

Se trata de un único acuífero de carácter libre constituido por las formaciones aluviales actuales y las terrazas bajas conectadas hidráulicamente con los cauces principales; las terrazas altas se encuentran generalmente desconectadas, dando lugar a pequeños acuíferos colgados de escasa entidad. Su sustrato poco permeable lo constituyen los materiales terciarios de la Depresión del Ebro.

Este acuífero adquiere verdadero interés hidrogeológico aguas abajo de Logroño (figura 9), donde sus espesores superan los 10 m, alcanzándose más de 40 m en la zona de confluencia entre el Ebro y el Alhama, con espesores saturados comprendidos generalmente entre 7 y más de 25 m; su transmisividad media es muy variable como consecuencia de la variación de espesor saturado y de permeabilidad, los valores más frecuentes se sitúan entre los 400 y 2.500 m<sup>2</sup>/día.

La alimentación principal de este extenso acuífero se produce de manera preponderante por infiltración de los ríos, seguido de la infiltración de las precipitaciones y de barrancos laterales y por retornos de riego. El flujo de las aguas subterráneas es hacia los cauces principales, de manera que, en situación natural, se comportan como efluentes (o ganadores), constituyéndose como zona de descarga, ésta también tiene lugar a través de bombeos para riego e industria, destacando entre estos últimos los de los polígonos de Logroño (*La Portalada, El Sequero y Cantabria*). Hay que destacar dos zonas de descarga localizadas en las que el aluvial aporta casi toda el agua al cauce del Ebro; son las de aguas arriba de Lodosa y la de Tudela (entorno del azul de la acequia Mosquera), se trata de dos zonas en las que el aluvial se estrecha extraordinariamente, de manera que el flujo “rebosa” hacia el cauce del Ebro.

El nivel piezométrico en el acuífero oscila de manera diferente en función de que el factor dominante sean los retornos de riego o el nivel del agua en el río; en el primer caso los niveles más altos se dan en estiaje y los más bajos en invierno-

primavera, siendo la oscilación escasa (2,5 m), mientras que en el segundo caso los niveles más altos se dan en primavera y los más bajos en estiaje, siendo la oscilación ligeramente mayor (4,5 m) (figura 10). Los gradientes piezométricos son bajos, del orden del 0,05%, aunque pueden alcanzar hasta el 2% en las zonas marginales y en las terrazas más altas.

Los recursos de este acuífero son del orden de los 160-230 hm<sup>3</sup>/año (DFN, 1977; CHE, 1996).

## 5. DOMINIO MONTES OBARENES-SIERRA DE CANTABRIA

Incluye la zona de contacto cabalgante entre el flanco sur del sinclinal de Miranda-Urbasa y la Depresión del Ebro, zona en la que afloran materiales mesozoicos de la Cuenca Vasco-Cantábrica. Estas sierras incluyen fundamentalmente materiales calcáreos del Cretácico superior, con una potencia del orden de 500 m (Ramírez del Pozo, 1987). Se trata de un dominio hidrogeológico en rocas carbonatadas que incluye como principal unidad permeable estas calizas, calcarenitas y dolomías calcáreas del Cretácico superior (Cenomaniense-Santonense), de más de 200 m de potencia media, ocasionalmente también incluye algunos niveles del jurásico marino carbonatado entre sus formaciones permeables.

Los límites de este dominio son: por el sur el cabalgamiento sur-pirenaico principal (que actúa de barrera hidráulica), por el oeste el río Oroncillo en el tramo Pancorbo-Orón (que actúa como línea de descarga), mientras que los límites norte y este no están definidos de manera clara.

Dentro de La Rioja, y de este a oeste, podemos diferenciar dos unidades: Toloño, comprendida entre el meridiano del diapiro triásico de Peñacerrada y el cauce del Ebro a la altura de las Conchas de Haro y Montes Obarenes, comprendida entre este sector del cauce del Ebro y el cauce del río Oroncillo.

### – Unidad de Sierra de Toloño

La unidad consiste básicamente en un sinclinal de suaves buzamientos ocupado en su núcleo por los materiales del Cretácico superior permeables, que hacia el oeste se encuentran fuertemente tectonizados mostrando pliegues apretados en dirección E-W (figura 11), con desarrollo de fracturación en los niveles permeables (competentes), que incrementa localmente la permeabilidad; el sector más nororiental queda individualizado por los materiales del Keuper, definiendo una pequeña estructura sinclinal (Llanos, 1992; EVE, 1997).

Esta unidad presenta una superficie del orden de 28 km<sup>2</sup>, que se incluyen en su práctica totalidad en la provincia de Alava; su recarga tiene lugar a partir de la

infiltración de las precipitaciones, mientras que la descarga tiene lugar en varios puntos, así sus recursos medios son de unos 5,7 hm<sup>3</sup>/año, distribuidos de la siguiente forma: pequeños manantiales en el sector riojano, 0,2 hm<sup>3</sup>/año (manantiales de El Toro, Torralate, etc.); manantial Pilagar en Salinillas de Buradón, 0,9 hm<sup>3</sup>/año; río Inglares, 4,0 hm<sup>3</sup>/año y río Ebro, 0,9 hm<sup>3</sup>/año; estos últimos tienen lugar a la altura de las Conchas de Haro; en el límite entre Alava y La Rioja.

Los recursos de esta unidad están escasamente explotados, aunque en sectores adyacentes de la Sierra de Cantabria, se han perforado varios pozos para abastecimiento a la Rioja Alavesa (sondeos Leza-2, Peñaparda y Laguardia), obteniéndose buenos resultados, así los caudales de explotación superan los 15 l/s, con transmisividades superiores a los 35 m<sup>2</sup>/día; estos bombeos se reflejan en un importante descenso piezométrico (figura 12).

#### **– Unidad de Montes Obarenes**

Esta unidad se sitúa en la parte más noroccidental de La Rioja e incluye a parte de las provincias de Alava y Burgos. Al igual que la anterior, los materiales permeables más importantes corresponden a las calizas del Cretácico superior, estos materiales se encuentran bastante plegados por pliegues apretados de dirección WNW-ESE, estructura que se complica hacia el este por la presencia de fallas y limitados al sur por el cabalgamiento surpirenaico; los ríos Oroncillo al oeste y Ebro al este constituyen límites hidráulicos por tratarse de las áreas de descarga más importantes, mientras que hacia el norte los materiales permeables se encuentran subyacentes al terciario que rellena el sinclinal de Urbasa-Miranda (figura 13).

La recarga de esta unidad tiene lugar de manera fundamental a partir de la infiltración directa del agua de lluvia, también a través de la infiltración de los barrancos y de las posibles transferencias subterráneas del Terciario poco permeable del sinclinal de Urbasa-Miranda. Las salidas tienen lugar casi de manera exclusiva en los cauces principales, que se comportan como efluentes en las zonas cercanas al contacto con los materiales menos permeables; destacan, en orden creciente de importancia: río Natapán entre Foncea y Bujedo (0,2 hm<sup>3</sup>/año), río Molinar (2,0 hm<sup>3</sup>/año), río Oroncillo en los sectores Pancorbo-Ameyugo y Valverde de Miranda-Orón (15,5 hm<sup>3</sup>/año, que incluyen aportaciones subterráneas del área situada al oeste del Oroncillo, sector Sobrón-Pancorbo) y aportes al río Ebro (CHE, 1991a).

En el sector riojano de esta unidad (Villalba de Rioja) se ha perforado un sondeo de interesantes características hidráulicas, los ensayos de bombeo en él realizados arrojan valores de transmisividad superiores a los 10.000 m<sup>2</sup>/día y de coeficiente de almacenamiento del orden de 2-6x10<sup>-2</sup>, con caudales de explotación de más de 100 l/s; lo que da idea de la potencialidad de esta unidad hidrogeológica. En la figura 14 se ha representado la evolución piezométrica del sondeo de Villalba de Rioja.

Los aportes al Ebro en las Conchas de Haro son muy difíciles de evaluar mediante la práctica de aforos diferenciales como consecuencia de los elevados caudales que presenta, en este sector descargan las dos unidades descritas anteriormente, los aportes de la unidad Sierra de Toloño tienen una componente dominante del flujo hacia el oeste y están evaluadas en 0,9 hm<sup>3</sup>/año, siendo hacia el este en la unidad Montes Obarenes, evaluadas en 1,0 hm<sup>3</sup>/año. Es importante tener en cuenta que la intersección entre el cabalgamiento surpirenaico y la Depresión del Ebro y el cauce del Ebro alcanza, en las Conchas de Haro, su menor potencial (cota más baja), por lo que además de los aportes de estas unidades debe existir un aporte importante de agua subterránea procedente del sinclinal de Miranda-Urbasa, que en un balance preliminar deben superar los 20-25 hm<sup>3</sup>/año.

## 6. DOMINIO CAMEROS-DEMANDA

Este dominio incluye los acuíferos carbonatados comprendidos entre la cuenca del Alhama y el cauce del río Tirón, incluidos en el conjunto geológico Cameros-Demanda, que es la unidad más occidental de la Cordillera Ibérica.

En este dominio se desarrollan acuíferos esencialmente en las rocas carbonatadas del jurásico marino, generalmente se trata de acuíferos kársticos, aunque en algunos sectores se desarrollan acuíferos de doble porosidad. Dentro del jurásico marino carbonatado se pueden distinguir dos niveles permeables principales: el Lías inferior y el Dogger-Malm, separados por una un nivel menos permeable, aunque generalmente se comporta como un sólo acuífero al estar interconectados a través de la intensa fracturación (Coloma, 1995, 97). Incluye tres sectores diferenciados:

El sector nororiental del dominio de las Sierras de Cameros geológicamente comprende el conjunto de facies del jurásico marino carbonatado y, esencialmente del Jurásico-Cretácico en facies fluviodeltaicas de carácter mixto detrítico-carbonatado (facies Weald) que constituyen el relleno de la cuenca de Cameros. Como se ha señalado anteriormente la potencia de estas facies puede llegar a ser muy importante, superándose los 4.000-5.000 m en la vertical, en los sectores correspondientes al centro de la antigua cuenca, que tiene una estructura de sinclinal laxo, presentando las mayores deformaciones en el borde NE, dónde los materiales del Weald se ponen en contacto con los materiales terciarios de la Cuenca del Ebro por medio de un frente de cabalgamiento de varias decenas de kilómetros de longitud.

El sector de enlace con la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica está caracterizado por la presencia de estructuras de plegamiento laxas de dirección ibérica (NW-SE) desarrolladas tanto en materiales del Jurásico marino como en las

facies Weald. Hacia la Sierra de Cameros presentan bruscos cierres periclinales. Hacia el borde oriental la zona queda limitada por los depósitos terciarios de la Depresión del Ebro, que fosilizan parcialmente las estructuras descritas.

El último de los sectores incluye los materiales paleozoicos y mesozoicos de las Sierras de La Demanda y de Neila, separadas por el Sinclinal de Villavelayo que afecta a materiales mesozoicos y cuya traza axial se reconoce hasta las proximidades de Ortigosa. El Mesozoico del SE de la Demanda presenta una estructura básicamente tabular, con buzamientos suaves hacia el E, que se complica con la presencia de algunas fracturas, mientras que en el frente de La Demanda (sector Anguiano-Fresneda) los materiales triásicos (facies Keuper) y jurásicos en facies marinas se encuentran cabalgantes sobre los materiales del terciario de la Depresión del Ebro.

Cada uno de estos sectores constituye una gran unidad hidrogeológica, que pasamos a describir:

**– Unidad de Cameros:**

Esta unidad incluye los materiales carbonatados del jurásico marino que afloran en el frente de cabalgamiento de las Sierras de Cameros entre los cauces del Iregua y Alhama; estos materiales se disponen subyacentes a las facies Weald en casi toda la extensión de esta unidad que queda limitada al norte por el cabalgamiento señalado; hacia el sur se consideran las divisorias superficial y subterránea prácticamente coincidentes.

La recarga se produce por infiltración directa del agua de las precipitaciones, componente que debe ser minoritario por su escaso afloramiento; así destaca el papel que juegan los materiales en facies Weald en el establecimiento del sistema de flujo general del agua subterránea; en este sentido actúan a modo de un gran almacén acuitardo, localmente drenado por infinidad de pequeños manantiales y, en profundidad y de forma general está drenado por los acuíferos carbonatados jurásicos, que actúan como un gran dren regional de fondo. Dentro de ese gran conjunto acuitardo hay una serie de unidades litológicas, que por su naturaleza calcárea o por su textura detrítica, constituyen auténticos acuíferos locales incluidos dentro de ese gran acuitardo, se trata de los acuíferos de la Cuenca del Añamaza (Grupo Tera), de la Cuenca del Alhama (Grupo Oncala) y de la Cuenca del Leza (Grupo Enciso).

La descarga principal del conjunto de acuíferos tiene lugar en la zona en que los cauces de los ríos principales cortan al contacto cabalgante impermeable entre los materiales acuíferos y los impermeables del Terciario, bien a través de manantiales o mediante aportes difusos a los cauces; los recursos medios estimados, que actualmente apenas son explotados, son los siguientes:

Acuíferos carbonatados del Jurásico marino:

Cuenca del Iregua (incluye los aportes del s.k. de Torrecilla)	12,9 hm <sup>3</sup> /año
Cuenca del Leza	4,6 hm <sup>3</sup> /año
Cuenca del Cidacos	7,7 hm <sup>3</sup> /año
Cuenca del Alhama	7,8 hm <sup>3</sup> /año

Acuíferos en materiales del Weald:

Acuífero Calcáreo del Leza (incluye parte del acuíf. Jurásico)	2,8 hm <sup>3</sup> /año
Acuífero Calcáreo de la Cuenca del Alhama	4,2 hm <sup>3</sup> /año
Acuífero Detrítico del Alhama (incluye parte del acuíf. Jurásico)	3,2 hm <sup>3</sup> /año

Destaca la presencia de aguas termales (Baños de Fitero y Arnedillo) cuyo origen se encuentra en la circulación profunda del flujo subterráneo a través del Jurásico que asciende rápidamente en la zona de contacto entre la Sierra de Cameros y la Depresión del Ebro; a veces estas surgencias termales se mezclan con aguas de infiltración más reciente, como ocurre en los cauces del Leza, Jubera e Iregua (figura 15).

En la figura 16 se han representado varios hidrogramas de las aportaciones de los acuíferos carbonatados de Cameros a los cauces de los ríos principales, destaca la presencia de tres episodios de descarga principales en los años hidrológicos 93/94 a 95/96 que tienen lugar en otoño/invierno; esto queda lógicamente reflejado de igual manera en los gráficos de evolución piezométrica (figura 17), de forma que en los episodios de recarga se produce un ascenso piezométrico de los acuíferos carbonatados de Cameros.

**– Unidad del oeste del Moncayo:**

Incluye los acuíferos carbonatados de la cuenca del Añamaza, afluente del Alhama por su margen derecha (figura 18). El principal acuífero está constituido por las formaciones carbonatadas del Dogger y Malm marinos, conformando un acuífero kárstico por fisuración, su transmisividad varía entre 400 y más de 4000 m<sup>2</sup>/día y el coeficiente de almacenamiento es del orden de  $1,2 \times 10^{-3}$ . En la zona de Valdegutur los primeros términos del Grupo Tera (Grupo Agreda) están intensamente fracturados y ostensiblemente karstificados incluyéndose en el conjunto permeable Dogger-Malm, con el que se encuentran en continuidad estratigráfica; así la transmisividad deducida para este conjunto acuífero es del orden de 10.000 m<sup>2</sup>/día y el coeficiente de almacenamiento es de  $9 \times 10^{-4}$ .

Destacan como zonas preferentes de recarga los afloramientos de materiales permeables que en profundidad constituyen acuíferos o bien se hallan cubiertos por materiales detríticos terciarios o cuaternarios.

Las salidas del agua subterránea se producen en varias zonas o áreas de descarga (figura 19):

Zona de Añavieja-Dévanos: se trata de una zona situada a lo largo del cauce del río Añamaza entre las localidades de Añavieja y Dévanos (en la provincia de Soria, cerca del límite con La Rioja); las descargas suman unos 242 l/s (Coloma, 1997) que tienen lugar a través de surgencias y mediante aportes directos al río. Constituye la principal zona de descarga en su cabecera.

Zona de Aguilar-San Felices: se sitúa a lo largo del río Alhama en el límite de las provincias de Soria y La Rioja, el caudal aportado es de 104 l/s (3,26 hm<sup>3</sup>/año), en el que intervienen también aportes del Weald.

Zona del río Añamaza: se ubica en el tramo topográficamente más bajo de afloramiento de las calizas en la cuenca del Añamaza, siendo el caudal medio de 46 l/s; el río –conectado con el acuífero– tiene carácter efluente verificándose la descarga más importante aguas arriba del Embalse de Valdegutur; continuando el flujo hacia la zona de Baños de Fitero donde tiene lugar la descarga conjuntamente con la unidad de Cameros.

En la figura 20 se puede observar la evolución piezométrica en este sector durante los años hidrológicos 93/94 a 95/96, pudiéndose observar los tres episodios de recarga señalados anteriormente.

#### **– Unidad de La Demanda:**

Incluye los materiales jurásicos carbonatados que constituyen acuíferos kársticos en torno a las unidades hercínicas de Neila y La Demanda; los límites de estos acuíferos vienen definidos bien por los propios de afloramiento de materiales permeables, bien por consideración de factores hidrogeológicos.

La recarga tiene lugar a partir de la infiltración del agua de lluvia en los afloramientos de materiales permeables jurásicos que en profundidad constituyen acuíferos o bien se hallan cubiertos por materiales detríticos cuaternarios, siendo especialmente abundantes en estos acuíferos los tramos en que los cursos de agua pierden de forma localizada parte o toda el agua circulante al atravesar zonas permeables (tramos influentes o sumideros localizados).

En base a las características hidrogeológicas de los materiales geológicos, a la geometría de los mismos y la ubicación de las zonas de recarga y descarga de las aguas subterráneas, hemos distinguido los siguientes acuíferos o sistemas kársticos desarrollados en los materiales carbonatados jurásicos (en el sector riojano, figura 21):

### **Acuífero o Sistema Kárstico de Torrecilla en Cameros**

Se desarrolla sobre el jurásico carbonatado en el entorno del cauce del río Iregua, entre las localidades de Pradillo y de Torrecilla en Cameros, que aquí cabalgan sobre los materiales de la Cuenca del Ebro, con el plano bastante tendido.

En este sistema de 80 km<sup>2</sup> de superficie (figura 22) destaca la presencia de gran cantidad de dolinas y dolinas-sumidero especialmente abundantes en el entorno de la divisoria entre las cuencas del Iregua y Najerilla (Plataforma de los Gamellones), que llegan a tener hasta 20 m de diámetro con un total de 181 dolinas (Pellicer, 1985), algunas de las cuales funcionan como sumideros; además también existen bastantes sumideros en los barrancos de la margen izquierda del río Iregua que, por otra parte, sólo llevan agua en periodos de lluvias, permaneciendo sus cauces secos durante la mayor parte del año, en ellos parte del agua circulante se pierde recargando el acuífero. La descarga tiene lugar mediante varios manantiales y por aportes directos al cauce del río Iregua; la surgencia más importante es el manantial de San Pedro, que presenta un típico comportamiento kárstico fuertemente influenciado por las precipitaciones; su caudal medio es de 74 l/s (figura 23). La descarga al cauce del río Iregua es del orden de 400 l/s (Coloma, 1997), valores que deben tomarse como estimativos dada la enorme dificultad en los aforos del Iregua como consecuencia de la irregularidad de las secciones y de los relativamente importantes caudales circulantes.

### **Acuífero o Sistema Kárstico de Brieva de Cameros**

La superficie de este sistema kárstico se reparte entre las cuencas del Iregua y del Najerilla (figura 24). Su geometría viene definida en el sector occidental por un sinclinal (sinclinal de Villavelayo) cuyo eje pasa aproximadamente por las localidades de Ventrosa y Brieva de Cameros, esta estructura se amortigua hacia Ortigosa dónde el Jurásico pasa a disponerse prácticamente tabular hasta interrumpirse en una línea de fractura de dirección NE-SW y que afecta al Mesozoico (Coloma y Sánchez Navarro, en prensa).

La recarga se produce de forma directa por infiltración del agua de las precipitaciones en los 35 km<sup>2</sup> de afloramiento de los materiales permeables y en la cuenca del Iregua a través de sumideros en el contacto entre los materiales triásicos y jurásicos, en la cuenca del Najerilla la recarga tiene lugar sobre todo a partir de la infiltración en sumideros en los que se infiltra parte de la escorrentía generada en los materiales impermeables, destacando los sumideros de los ríos Brieva y Ventrosa con una capacidad de infiltración de más de 300 y 50 l/s respectivamente, el resto de sumideros son de carácter temporal ya que sus cuencas receptoras son de escasa entidad.

El Nacedero del Brieva es el punto de surgencia principal (figura 25) con 150 l/s de caudal medio; otro punto de surgencia importante es la fuente del Berrinche



(20 l/s). El estudio del hidrograma del río Brieva indica la existencia de un sistema con escaso efecto memoria y baja inercia por lo que tanto las respuestas a los episodios de recarga como los agotamientos son extraordinariamente rápidos; además se manifiesta una escasa capacidad de almacenamiento. La descarga también tiene lugar en la zona de Ortigosa, corresponde a dos surgencias situadas en el cauce del río Albercos, el caudal medio descargado por este sistema kárstico en el cauce del río es de 77 l/. Las características de variación de caudal, bajas temperaturas de surgencia y turbidez que presenta el agua tras periodos de lluvias son indicativas del desarrollo de un acuífero karstico s.s.

#### **Acuífero o Sistema Kárstico de Las Viniegras**

Presenta una geometría subtabular, con mínima variación en la dirección de las capas y complicada por la presencia de fracturas normales, con predominio de direcciones NW-SE.

Sus 35 km<sup>2</sup> de superficie permeable se reparten entre las cuencas del Iregua y del Najerilla (figura 26). La recarga del sistema se produce a través de la infiltración directa del agua de las precipitaciones y especialmente a través de dolinas-sumideros, sumideros en los cauces de arroyos, valles secos que constituyen zonas localizadas de fuerte recarga (Sanz Pérez, 1996b) que presentan un régimen de infiltración irregular con caudales máximos de infiltración entre 10 y 30 l/s.

La descarga principal del sistema de Las Viniegras tiene lugar por los manantiales de la Ermita y del Río en Viniegra de Arriba, aportando 500 l/s en conjunto (según se desprende de los datos de CHE, 1991 y propios), estos datos incluyen además de la aportación subterránea la escorrentía superficial no infiltrada en los afloramientos carbonatados, además de estar calculados solamente para un periodo corto (octubre 1990- mayo 1991).

Como puede observarse en el gráfico de la figura 27, donde se representa el hidrograma de estos manantiales (incluye además las aportaciones superficiales que consiguen atravesar los afloramientos permeables) las oscilaciones del caudal son importantes y rápidas, con una sensibilidad patente a las lluvias y con un régimen pluvionival manifiesto; asimismo se pone de manifiesto el drenaje de un sistema acuífero con funcionamiento típicamente karstico (*conduit-flow aquifer*), con rápidas respuestas a episodios de recarga y agotamientos igualmente rápidos, se trata de un sistema de baja inercia y escaso efecto memoria (Coloma y Sánchez Navarro, en prensa).

#### **Acuífero o Sistema Kárstico de Mansilla**

Está constituido por los afloramientos de materiales permeables ubicados en los flancos del sinclinal de Villavelayo (figura 28), cuyo núcleo lo ocupan las

formaciones del Weald y en cuyos flancos aparecen las formaciones del resto del Mesozoico y el Paleozoico; se trata de un pliegue asimétrico y un tanto irregular, su cierre periclinal queda definido por los materiales jurásicos en el entorno de Viniegra de Abajo-embalse de Mansilla, si bien su traza axial continúa hasta Brieva de Cameros al este.

La recarga se verifica a partir de la infiltración directa del agua de las precipitaciones (69 km<sup>2</sup>), así como a través de cauces influentes (valles secos) y sumideros; de entre estos últimos los más importantes son el ubicado en el cauce del río Najerilla justo en el contacto entre el triás impermeable y el jurásico (sumidero de Los Tollos) con una capacidad de infiltración máxima de hasta 1000 l/s, constituyendo un ejemplo espectacular de sumidero permanente y los situados en el río Portilla justo en la cola del embalse de Mansilla con una capacidad de infiltración máxima de 200 l/s en conjunto.

La descarga se produce en tres puntos: por una parte en el fondo del vaso del embalse de Mansilla (67,7 hm<sup>3</sup>/año), el segundo de los puntos de descarga se ubica en el barranco de San Jorge cerca de la localidad de Canales de la Sierra por medio de dos manantiales principales que totalizan casi 4 hm<sup>3</sup>/año; aforos ocasionales efectuados por nosotros nos han permitido constatar la respuesta rápida a las precipitaciones y sus importantes variaciones temporales. Por último la última zona de descarga se ubica en el río Urria, ya en la provincia de Burgos.

#### **Acuífero o Sistema Kárstico de la Sierra de Urbión**

Se trata de los afloramientos jurásicos ubicados al sur del macizo paleozoico de Neila (figura 29); este sistema queda individualizado del sistema de Neila por el cabalgamiento que va desde el suroeste de la localidad de Neila hasta el sur de Viniegra de Arriba, mientras que su límite oriental es aproximado y correspondería con la divisoria subterránea con el sistema de La Viniegras.

La recarga directa tiene lugar a través de los 20 km<sup>2</sup> de afloramientos permeables, mientras que la indirecta se verifica a través de las pérdidas de los arroyos que descienden de las cumbres y lagunas de Neila tanto hacia la cuenca del Duero como hacia la del Ebro.

La surgencia principal es la Fuente Sanza (en Quintanar de La Sierra, Burgos) situada a una cota de 1.300 m en la cabecera del río Arlanza y surge en calizas del Dogger muy cerca del contacto con las facies Weald. Los caudales de la surgencia han sido controlados diariamente durante un periodo de un año por la CHE (CHE, 1991) (figura 30); se pone de manifiesto el carácter típicamente kárstico del sistema, con un régimen pluvionival patente, oscilaciones importantes y rápidas de caudal y una respuesta rápida a las precipitaciones (con un decalaje de apenas un día) o a las infiltraciones en los barrancos. El caudal medio de la surgencia es

de 500 l/s que no se explica con la infiltración en la cuenca del Arlanza (3,5 km<sup>2</sup>); los caudales provienen del trasvase subterráneo desde la cuenca del Ebro, hecho sugerido por CHE (1991), Blasco y Rolandi (1992) y comprobado mediante trazadores por Sanz Pérez (1994, 96a). Otros puntos de descarga se ubican, ya en La Rioja, en los ríos que descienden de la Sierra de Urbión hacia el Najerilla en el contacto entre los materiales jurásicos y el Keuper impermeable, siempre en relación con sumideros próximos; totalizan un caudal del orden de 200 l/s.

### **Acuífero o Sistema Kárstico de Anguiano-Fresneda de la Sierra**

Incluye un conjunto de afloramientos del jurásico marino y triásico en facies Keuper que se extienden entre los ríos Iregua y Tirón (ver esquema de la figura 31); se encuentran limitados por dos cabalgamientos vergentes al norte, estos cabalgamientos actúan de límites impermeables. Debido a la intensa deformación que sufren estos materiales, los afloramientos de rocas permeables se encuentran en ocasiones individualizados funcionando de manera independiente. La extensión aproximada de este conjunto de acuíferos es de 45 km<sup>2</sup>.

La recarga tiene lugar fundamentalmente a partir de la infiltración del agua de lluvia de las precipitaciones y, en menor medida, a partir de las pérdidas de agua que experimentan los cauces al atravesar los afloramientos permeables. La descarga se verifica esencialmente en los puntos en que los cauces principales atraviesan el contacto entre el frente de cabalgamiento de La Demanda y los materiales terciarios de la Depresión del Ebro, que actúan en general como efluentes (figura 32); así (de este a oeste) el río Najerilla a su paso por Anguiano recibe 2 hm<sup>3</sup>/año, el río Tobía gana 0,4 hm<sup>3</sup>/año, el río Cárdenas gana 5,9 hm<sup>3</sup>/año, el río Pazuengos recibe una aportación subterránea de 0,7 hm<sup>3</sup>/año, mientras que el Oja en Ezcaray gana 4,5 hm<sup>3</sup>/año; por último el río Tirón a su paso por Fresneda de la Sierra (Burgos) pierde 1,5 hm<sup>3</sup>/año, recargando al acuífero en el sector más occidental del sistema.

En el entorno de Ezcaray el ITGE construyó dos sondeos de investigación de aguas subterráneas en las calizas de este sistema; para el sondeo Ezcaray 2 se deduce una transmisividad del orden de 500 m<sup>2</sup>/día, con un caudal óptimo de explotación de 50 l/s, mientras que en el sondeo Ezcaray 3 la transmisividad calculada es de 20.000 m<sup>2</sup>/día y el caudal de bombeo es de 140 l/s; los valores tan elevados obtenidos en el sondeo Ezcaray 3 hacen pensar en una posible conexión con el cauce del Glera en el desarrollo del ensayo de bombeo, no obstante los parámetros hidrogeológicos se muestran como satisfactorios para el desarrollo de captaciones de aguas subterráneas en ese sector; la evolución piezométrica en este sondeo se refleja en el gráfico de la figura 33.

## 7. HIDROQUÍMICA. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En la composición química de un agua subterránea y en sus propiedades fisicoquímicas está en gran manera escrita la historia de ese agua, desde que se infiltró a través del suelo vegetal o de la roca desnuda hasta que emerge de forma natural en manantiales y flujos difusos, o es objeto de extracción antrópica. El conjunto de propiedades químicas y fisicoquímicas de un agua está en relación directa con las características de la zona no saturada, con la litología de las formaciones por las que ha circulado, con el esquema de flujo seguido (local, regional), con la profundidad alcanzada y con el tiempo de permanencia en la zona saturada. Por esta razón, se suele decir que las propiedades fisicoquímicas de un agua son su propio carnet de identidad, la base de la cuantificación y cualificación de muchos procesos que tienen lugar desde que las aguas se infiltran hasta que emergen.

En este apartado se pretende únicamente dar una visión general de la hidroquímica de los acuíferos, por lo que sólo tomamos en consideración las características generales, a modo de ejemplo hemos incluido una serie de análisis químicos representativos de los acuíferos de La Rioja (tabla 3), representados en el gráfico de Piper-Hill-Langelier de la figura 34.

### **Dominio de los aluviales del Ebro y Afluentes. Acuíferos aluviales.**

En los acuíferos aluviales (Tirón, Oja y Ebro y afluentes) destaca la presencia de aguas bastante mineralizadas (con residuo seco cercano a los 1000 mg/l) y composiciones bastante variables, que en general oscila entre bicarbonatada a sulfatada y cálcica, aunque en ocasiones llega a ser clorurada sódica en el aluvial del Ebro. Esta variabilidad en la composición química es debida por un lado a la influencia del sustrato, de manera que en las zonas donde predomina el sustrato evaporítico (yesos y otras sales solubles) la mineralización se incrementa, así como las composiciones se hacen progresivamente sulfatadas y cloruradas; y por otro a la intervención humana que modifica en ocasiones profundamente la composición natural de las aguas subterráneas como consecuencia de las prácticas agrícolas, las extracciones y los vertidos a los aluviales.

### **Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria. Acuíferos en rocas carbonatadas.**

En los acuíferos carbonatados del dominio hidrogeológico Montes Obarenes-Sierra de Cantabria predominan aguas de mineralización ligera a intermedia (450-750 mg/l) de composición muy homogénea y de tipo bicarbonatada cálcica a cálcico-magnésica, reflejo de las litologías atravesadas, de tipo carbonatado en las que la tendencia en algunos puntos hacia composiciones magnésicas indican litologías de tipo dolomítico.

### **Dominio Cameros-Demanda. Acuíferos en rocas carbonatadas.**

Encontramos composiciones químicas muy variadas, que fundamentalmente corresponden a tres grandes conjuntos:

Aguas bicarbonatadas-cálcicas de baja mineralización (residuo seco por debajo de los 600 mg/l), presentan pocas diferencias composicionales entre unas y otras, poniendo de manifiesto una tendencia ligeramente sulfatada en algunos puntos; son características de las zonas de cabecera de las cuencas, siendo en los sistemas kársticos del entorno de La Demanda y Neila las facies claramente dominantes.

Aguas sulfatadas-cálcicas de elevada mineralización: presentan un residuo seco comprendido entre 1.000 y 2.000 mg/l. Surgen en el contacto entre los materiales carbonatados del jurásico inferior y las arcillas y yesos del Keuper.

Aguas termales de composición clorurada-sódica, corresponden a las aguas de los manantiales de Baños de Arnedillo y Baños de Fitero que surgen a temperaturas superiores a 46 °C, el residuo seco es superior a los 5.000 mg/l; el contenido en SiO<sub>2</sub> es elevado, tal como corresponde a su carácter termal; pese a todo es más elevado en Arnedillo (20-45 mg/l) que en Baños de Fitero (20-25 mg/l), así como las mineralizaciones son más importantes.

En este dominio se pone de manifiesto un esquema típico de evolución geoquímica propio de un flujo regional, que va desde las aguas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización, propias de las zonas de recarga, a las aguas sulfatadas cálcicas más mineralizadas, y a aguas de carácter clorurado sódico mucho más mineralizadas y termales, propias de las zonas de descarga regionales.

### **Calidad del agua subterránea**

La caracterización físico-química de las aguas sirve también para definir el mayor o menor grado de aptitud en relación a sus diferentes usos, que globalmente definimos como "calidad". Prácticamente el único problema de calidad del agua de los acuíferos de La Rioja reside en el contenido en nitratos, que limita su uso, especialmente para los abastecimientos urbanos; de modo que contenidos superiores a 50 mg/l pueden resultar perjudiciales para la salud. Los nitratos proceden en su mayoría de los abonos utilizados en las prácticas agrícolas y, en menor medida en La Rioja, de las explotaciones ganaderas.

Los problemas son importantes en los acuíferos aluviales, en los que la presión de la agricultura es mayor y la vulnerabilidad es, en general, igualmente mayor. Otro problema de las zonas antropizadas, como lo es el eje del Ebro, es la contaminación por microcontaminantes, sustancias que son altamente perjudiciales incluso en pequeñas proporciones, destacando los pesticidas y metales pesados;

sin embargo el conocimiento actual de este tipo de contaminación es escaso, por no realizarse un seguimiento sistemático, pero sin embargo, está ahí y pueden ser un problema relevante en zonas industrializadas.

La mejor calidad del agua subterránea se da en los acuíferos carbonatados, especialmente en los del sector de La Demanda, donde predominan las facies hidroquímicas bicarbonatadas cálcicas de baja mineralización y de escasa contaminación; seguidas de las aguas de los acuíferos carbonatados de Cameros y el sector oriental de La Rioja, donde las mineralizaciones aumentan, a la vez que las composiciones tienden a sulfatadas cálcicas, la contaminación sigue siendo baja, sólomente en algunos sectores del Añamaza el contenido en nitratos indica un cierto grado de contaminación; como singularidad hay que señalar en este grupo la presencia de aguas muy mineralizadas, de composición clorurado sódica y termales correspondientes a los manantiales termales de Baños de Fitero y Arnedillo, se trata de aguas de baja calidad natural.

Las aguas procedentes de los materiales semipermeables del Weald, que abastecen a numerosas poblaciones, presentan calidades muy variadas como consecuencia de los diferentes sistemas de flujo y litologías por las que circulan; en general predominan facies bicarbonatadas cálcicas de buena calidad en las cabeceiras y aguas sulfatadas cálcicas de menor calidad en las cuencas bajas, hecho especialmente relevante en la cuenca del Alhama; sin embargo los problemas de contaminación son prácticamente inexistentes.

Varias actuaciones realizadas por la Consejería de Obras Públicas del Gobierno de La Rioja han terminado por el momento con los problemas de contaminación por nitratos; así se han paliado los problemas en 14 de los 15 municipios que los presentaban (de entre los que destacaba Cihuri, con 100 mg/l), mediante la construcción de nuevas captaciones de abastecimiento; así se han creado abastecimientos para la Mancomunidad del Glera (Bañares, Rodezno, San Torcuato, Cidamón, Casas Blancas, Ollauri, Briones y Gimileo), Mancomunidad de La esperanza (Cirueña, Ciriñuela, Gallinero, Manzanares, Villar de Torre, Cordovín, Cañas y Canillas) y poblaciones de Cihuri, Haro, Morales y Cenicero, en esta última localidad existía una contaminación de tipo biológica; en el caso de Entrena se están barajando actualmente varias posibilidades para evitar esta contaminación.

## **8. EL VALOR ESTRATÉGICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

El recurso agua es necesario por un lado por la salud pública en los núcleos de población, a través del abastecimiento de agua potable, para la producción económica en los sectores agrario, industrial y de servicios, y para cubrir una función medioambiental de mantenimiento de equilibrios ecológicos vinculados al medio acuático y valores paisajísticos; de manera que la “oferta” y la “demanda” del re-

curso deben ser “ajustado”, pero en términos de sostenibilidad no conviene olvidar que las necesidades ambientales no deben ser contempladas como una demanda sino como un condicionamiento previo o restricción de la disponibilidad de recursos para otros fines, que en cada caso deberán ser establecidos.

En el momento actual los recursos de agua subterránea constituyen una fuente de suministro relevante de usos consuntivos, que puede cifrarse en un 16 a un 20% en España, si bien en La Rioja y, en general en la Cuenca del Ebro, no se supera actualmente el 5%.

El papel estratégico de las aguas subterráneas adquiere especial relevancia en tres cuestiones:

#### **Abastecimiento a poblaciones**

Actualmente en La Rioja se abastecen con aguas subterráneas un total de 79 núcleos de población, ascendiendo a más de 75.000 las personas abastecidas, lo que supone un 28 % del conjunto de la población (MINER-MOPTMA, 1994). Por sus características de protección natural frente a la contaminación, presencia en amplias zonas del territorio y gran capacidad de almacenamiento, los acuíferos constituyen una fuente de suministro muy adecuada para el abastecimiento a las poblaciones.

Como recurso estratégico para un uso prioritario como es el abastecimiento a poblaciones es necesario por un lado intensificar la protección de las áreas de captación de los abastecimientos, mejorar la garantía de los sistemas de explotación mediante la incorporación de las aguas subterráneas, en uso conjunto o alternativo e identificar los acuíferos con aguas de calidad susceptibles de ser utilizados con este fin. A este respecto en La Rioja destacan los acuíferos kársticos del entorno de La Demanda como potencialmente utilizables para abastecimiento urbano en un futuro, con aguas de gran calidad y exentos de actividades contaminantes en su superficie.

#### **Integración de los recursos de agua subterránea en la gestión de los recursos hídricos**

Se plantean varias posibilidades en este ámbito como son la mayor explotación de algunos acuíferos escasamente explotados, la utilización conjunta de las aguas subterráneas y superficiales y la utilización de las reservas de los acuíferos en épocas de sequía, simultáneamente con la recarga de los caudales no regulados (como tiene lugar de manera experimental en el aluvial del Oja) (Sahuquillo, 1991). Estas metodologías están ampliamente desarrolladas en la bibliografía.

#### **Preservación de la calidad del agua subterránea**

Tanto los valores estratégicos de las aguas subterráneas como el desempeño de su función medioambiental en relación con los cursos de agua o zonas húme-

das vinculadas a ellas, exigen una preservación eficaz de estos recursos, que aunque menos vulnerables que los superficiales, presentan importantes riesgos de degradación (Coloma et al., 1996). La correcta protección precisa de un buen conocimiento de los acuíferos y de las actividades potencialmente contaminantes con lo que se pueden identificar acuíferos y zonas de ellos más o menos vulnerables, de cara a la correcta gestión de los usos del suelo y del recurso hídrico.

## 9. EL CONTROL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA RIOJA

### Niveles piezométricos y caudales

Mediante el estudio de la evolución piezométrica y de caudales se pretende analizar la respuesta de los acuíferos a los procesos de recarga (lluvias, infiltraciones de ríos, transferencias subterráneas de otros acuíferos o acuitardos, etc.) y descarga (bombeos, agotamiento de caudales drenados por los acuíferos, etc.), así como una correcta evaluación de los recursos hídricos subterráneos.

La red piezométrica cuenta en La Rioja con los siguientes puntos de control:

Dominio Cameros-Demanda: sondeo Ezcaray (2111-3032), sondeo Torrecilla en Cameros (2211-7025), sondeo Pradillo (2111-7027), sondeos Jubera (22311-3018 y 19) y sondeos de Cabretón (2413-4015) y Valdegatur (2413-4009).

Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria: sondeo Villalba de Rioja (2109-4010).

Dominio de los aluviales del Ebro y afluentes: todos ellos se sitúan en el aluvial del Glera, pozo Casalarreina (2109-8042), pozos de Santo Domingo (2110-3048 y 7076), pozo de Villalobar (2110-3370), pozo de Hervías (2110-4007), pozos de Bañares (2110-4019 y 4343), pozo de Castañares (2110-4345), pozos de Santurde (2110-7004 y 7073) y pozo de Santurdejo (2110-7074).

La red de control de las aportaciones subterráneas propuesta en CHE (1997) cuenta en La Rioja con los siguientes puntos de control.

Dominio Cameros-Demanda: aportaciones al Glera aguas arriba de Ezcaray, río Urbión (aportaciones de los sistemas de Neila-Urbión y Brieva) y aportaciones del Jurásico al Najerilla, Iregua y Leza.

Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria: en La Rioja no se sitúa ningún punto de control.

Dominio de los aluviales del Ebro y afluentes: aportaciones del aluvial del Glera



### **Calidad**

La vigilancia de la calidad de las aguas permite por un lado conocer la evolución hidroquímica y por otro prevenir efectos indeseados a largo plazo, erigiéndose como una de las bases más importantes en la toma de decisiones que afectan a la estrategia, control, gestión de los recursos hídricos y valoración en términos económicos del deterioro de las aguas.

Es importante señalar que esta red es de carácter general, es decir, no interviene en el seguimiento de procesos puntuales y fenómenos locales que deben ser objeto de redes específicamente diseñadas. A este respecto es importante señalar que la elaboración de mapas de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es una herramienta de gran ayuda a la hora de prevenir y matizar las medidas protectoras que a veces se toman de forma un tanto indiscriminada y sin un criterio claro.

La red de calidad cuenta en La Rioja con los siguientes puntos de control.

Dominio Cameros-Demanda: manantiales de San Torcuato en Ezcaray, San Pedro en Torrecilla, La Magdalena en Anguiano y El Restauero en Leza, manantiales de Brieva, Fuente Sanza (trasvase Ebro-Duero), sondeo de Grávalos, manantial de Cantares en Alfaro y sondeo de Valdegatur

Dominio Montes Obarenes-Sierra de Cantabria: no hay ninguno en La Rioja.

Dominio de los aluviales del Ebro y afluentes: manantiales de Castañares (piscifactoría), manantial de abasatecimiento a Casalarreina, manantial nacimiento del río Zamaca en Bañares y Pozo de Bañares, todos ellos en el aluvial del Glera y pozos de abastecimiento a Haro, Somalo y Calahorra en el aluvial del Ebro.

### **Red meteorológica**

Como se ha visto, la lluvia es la fuente primordial de la recarga del agua en los acuíferos; para la estimación de la recarga se precisan datos meteorológicos de calidad, por lo que interesa el control de las variables meteorológicas; sin embargo los parámetros que se miden en estas estaciones no son siempre los deseados, muy pocas registran ni siquiera de manera conjunta temperatura y precipitación.

En La Rioja han funcionado de manera discontinua un total de 83 estaciones meteorológicas, 24 de ellas carecen de datos en archivo, 16 quedaron fuera de servicio entre 1962 y 1985, 7 han comenzado su toma de datos a mediados de los 80; si descontamos, además, las estaciones cuyas series de datos son poco fiables o tienen un numero excesivo de huecos, sólo existen 20 estaciones con datos verdaderamente fiables para el conocimiento de las precipitaciones y 10 para el caso de las temperaturas. Esta densidad de estaciones podría estimarse como suficiente

para el caso de las precipitaciones (1 por cada 250 km<sup>2</sup>) y algo escasa para las temperaturas (la mitad), sin embargo la mayoría de las estaciones se sitúan en la zona del Valle del Ebro y muy pocas en las sierras, problema especialmente importante en la mitad suroriental. Esta irregular distribución hace que actualmente sea imposible tener un conocimiento adecuado de las variables meteorológicas básicas en una Comunidad como La Rioja, de tortuosa orografía y con un peculiar enclave geográfico, abierto a tres influencias climáticas diferenciadas: continental, atlántica y mediterránea (Nuñez et al., 1991).

## 10. CONCLUSIONES

Los acuíferos en la Rioja responden a dos tipologías fundamentales: acuíferos aluviales, desarrollados en materiales cuaternarios de terrazas y aluviales del Ebro, con unas reservas muy importantes y que se encuentran sometidos a una fuerte presión humana que afecta principalmente a su calidad, de manera que la contaminación por nitratos es en algunos puntos preocupante; y acuíferos carbonatados, desarrollados en materiales calcáreos del Jurásico y del Cretácico Superior de los dominios Cameros-Demanda y Montes Obarenes-Sierra de Cantabria, de funcionamiento kárstico, con unos recursos elevados y con aguas en general de excelente calidad.

Destaca el papel estratégico de las aguas subterráneas de algunos de los acuíferos riojanos, especialmente de los sistemas kársticos del entorno de La Demanda, especialmente en el papel que pueden jugar como futuras fuentes de abastecimientos urbanos con aguas de calidad.

El conocimiento del agua precisa de unas buenas redes de control; en La Rioja, si exceptuamos la red piezométrica que en principio cuenta con suficientes puntos de control y una periodicidad de toma de datos más o menos correcta, el resto de las redes de control resultan a todas luces insuficientes, de manera que es imposible conocer de manera relevante el estado y la evolución de la calidad y de los aportes subterráneos de los acuíferos; por otra parte la red meteorológica no permite una evaluación medianamente precisa de las variables hidrológicas que intervienen en el balance de las aguas subterráneas, por lo que su evaluación está sujeta a errores muy importantes. Es necesario replantear estas redes si se quiere tener un conocimiento relevante de las aguas subterráneas.

## 11. AGRADECIMIENTOS

A Javier San Román y Victor Arqued (Confederación Hidrográfica del Ebro), Javier Castiella (Gobierno de Navarra) y Gabriel Faci (Gobierno de La Rioja)

por la aportación de datos de interés. A Antonio Azcón (oficina del ITGE en Zaragoza) por facilitarme los informes realizados en La Rioja por el Instituto. Por último quisiera agradecer a Félix Pérez-Lorente y Pilar Marín (IER) su apoyo y ayuda para participar en el monográfico como coordinador.

## 12. REFERENCIAS

- Antón Plaza, J.A., Riba, O., 1965. *Mapa de isobatas de la base del Terciario de la zona Vasco-Cantábrica (Burgos, Alava, Rioja, Navarra) a escala 1: 200.000*. Basado en los perfiles de sismica de reflexión. CIEPSA. Vitoria. (inédito).
- Blasco, O., Rolandi, M., 1992. Contribución al conocimiento de la hidrogeología de la unidad de Mansilla-Neila (La Rioja-Burgos-Soria). *Actas III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Salamanca. Tomo II, 251-255.
- Casas, A.M., 1992. El frente norte de las sierras de Cameros: estructuras cabalgantes y campo de esfuerzos. *Zubía*, monográfico núm. 4, 1-220.
- Casas, A.M., 1993. Oblique tectonic inversion and basement thrusting in the Cameros Massif (Northern Spain). *Geodinamica Acta*, (6), 202-216.
- Casas A.M., Cortés, A., Gil, A., Maestro, A., Muñoz, A., Pocoví, A., Martínez, B.; Oliva, B., Liesa, C., Castillo, E., Pueyo, E., Millán, H., Simón, J.L., Arlegui, L., Aurell, M., Mata, M.P., Tena, S., Román, T., 1995. *Estructura y evolución mesozoico-terciaria de las Sierras de Cameros-Demanda (Cordillera Ibérica)*. Guía de Campo. VII Reunión de la Comisión de Tectónica de la S.G.E. Logroño, 1995. Servicio de Publicaciones. Univ. de Zaragoza. 1-113.
- Casas, A.M., Simón, J.L., 1992. Stress field and thrust kinematics: a model for the tectonic inversion of the Cameros Massif (Spain). *Journal of Structural Geology*. (4), 521-530.
- Colchen, M., 1974. *Géologie de la Sierra de la Demanda*. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España. IGME, Madrid, 1-463
- Coloma, P., 1995. *Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Alhama*. Tesis de Licenciatura. Univ. de Zaragoza, 1-175.
- Coloma, P., 1996. Zonas húmedas de interés medioambiental relacionadas con la descarga de aguas subterráneas. Cuencas de los ríos Alhama, Cidacos, Leza-Jubera e Iregua. *Zubía, monográfico nº 8 (Impactos Medioambientales en La Rioja)*, 187-204.

- Coloma, P., 1997. *Funcionamiento hidrogeológico de las cuencas riojanas orientales: Iregua, Leza, Cidacos y Alhama (Cuenca del Ebro)*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 1-386
- Coloma, P., Martínez Gil, F.J., Sánchez Navarro, J.A., 1995. El Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (sector riojano). *Geogaceta*.(18), 68-71.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., 1998. Los acuíferos kársticos entorno a los macizos ibéricos paleozoicos de Neila y La Demanda (sector oriental). *Bol. Geol. y Min..* (en prensa).
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1995a. El Drenaje Subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (sector riojano). *Geogaceta*, 18, 68-71.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1996c. Procesos geotérmicos causados por la circulación del agua subterránea en el contacto entre la Sierra de Cameros y la Depresión Terciaria del Ebro. *Geogaceta*, 20(3), 749-752.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1997. Sistemas de flujo subterráneo regional en el acuífero carbonatado mesozoico de la Sierra de Cameros. Sector oriental. *Estudios Geol.*, (53), 159-172.
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., 1998. El sistema kárstico de Santa Engracia-Jubera (La Rioja). *Geogaceta*. (en prensa).
- Coloma, P., Sánchez Navarro, J.A., Martínez Gil, F.J., Pérez, A., 1997. El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro. *Rev. Soc. Geol. España*, (10), 205-218.
- Confederación Hidrográfica del Ebro-CHE, 1991. *Asistencia técnica para el estudio de los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos de la margen derecha del Ebro. Zona I: Acuíferos de Cabecera (Plan Hidrológico)*. Memorias y planos. (inédito).
- CHE, 1991b. Síntesis hidrogeológica de la unidad nº 24. Aluvial del río Glera. (informe inédito).
- CHE, 1994. *Estudio geográfico e hidrogeológico de la cuenca del río Añamaza (Plan Hidrológico)*.. (informe inédito).
- CHE, 1994b. Modelización digital del acuífero aluvial del río Glera. (informe inédito).

- CHE, 1996. *Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro*. Borrador. (informe inédito).
- CHE, 1996e. Modelización matemática del acuífero del río Glera (U.H. nº 24) (La Rioja). (informe inédito).
- Custodio, E., 1991. *La interpretación hidrogeoquímica como herramienta de estudio y valoración de sistemas acuíferos: aspectos metodológicos generales*. Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 121-162.
- Custodio, E., Llamas, R., 1976. *Hidrología subterránea*. Tomos I y II. Ed. Omega. 1-2350.
- Diputación Foral de Navarra-DFN, 1977. *Proyecto Hidrogeológico de Navarra*. Memoria, informes técnicos, atlas hidrogeológico e información complementaria. (inédito).
- Ente Vasco de la Energía-Gobierno Vasco, 1997. Mapa Hidrogeológico del País Vasco 1:100.000. Memoria y planos.
- García Ruiz, J.M., Martín Ranz, M.C., 1992. *El régimen de los ríos de La Rioja*. Instituto de Estudios Riojanos. Col. Ciencias de la Tierra (Geografía). (14), 1-69.
- Gil Imaz, A., Pocoví juán, A., 1994. La esquistosidad alpina del extremo NW de la Cadena Ibérica Oriental (Sierra del Moncayo): Distribución, génesis y significado tectónico. *Rev. Soc. Geol. España*, (7), 91-113.
- Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura y Alimentación, 1989. *Situación y catálogo de los regadíos de la Comunidad Autónoma de La Rioja*. (informe inédito).
- Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura y Alimentación, 1990. *Estadística Agraria Regional 1990*. 1-229.
- Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura y Alimentación(1991): *Plan Hidráulico de La Rioja. Avance*. (informe inédito).
- Gobierno de La Rioja. Consejería de Agricultura y Alimentación, 1993. *Estadística Agraria Regional 1993*. 1-98.
- Gobierno de La Rioja. Consejería de Obras Públicas y Urbanismo, 1993b. *Plan Especial de Protección del Medio Ambiente Natural de La Rioja*. 1-297.
- Goy, A., Gómez, J.J., Yébenes, A., 1976. El Jurásico de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica (Mitad Norte). I. Unidades Litoestratigráficas. *Estudios Geológicos*. 32, 391-423.

- Gómez, J.J., Goy, A., 1979. Las unidades litoestratigráficas del Jurásico medio y superior, en facies carbonatadas, del sector levantino de la Cordillera Ibérica. *Estudios Geológicos*, 35, 596-598.
- Gonzalo Moreno, A.N., 1979. *El relieve de La Rioja: análisis de Geomorfología estructural*. Logroño. Instituto de Estudios Riojanos (Biblioteca de Temas Riojanos, 37) . 1-508.
- Goy, A., Suarez Vega, L.C., 1983. Tectónica y Estratigrafía Mesozoicas: El Jurásico. En: *Libro Jubilar, homenaje a J.M. Ríos*. Tomo II. Geología de España. IGME, 62-79.
- Guimerà, J., Alvaro, M., 1990. Structure et évolution de la compression alpine dans la Chaîne Ibérique et la Chaîne cotière catalane (Espagne). *Bull. Soc. Géol. de France*, (6), 339-348.
- Guiraud, M., 1983. *Evolution tectono-sédimentaire du bassin wealdien (Crétacé inférieur) en relais de décrochement de Logroño-Soria (NW Espagne)*. Thèse 3eme Cycle. Montpellier. Université du Languedoc, 1-172 (inédita).
- Guiraud, M., Seguret, M., 1985. A releasing solitary overstep model for the Late Jurassic-Early Cretaceous (Wealdian) Soria strike-slip Basin (Northern Spain). In: *Strike slip Deformation, Basin formation and Sedimentation* (K.T. Biddle & N. Christie-Blick, Eds.). *S.E.M.P. Spec. Publ.*, 37, 159-175.
- Instituto Geológico y Minero de España-IGME. Diputación Provincial de Logroño, 1969. *Estudio hidrogeológico general de la provincia de Logroño*. (informe inédito).
- IGME, 1972. Posibilidades de captación de aguas subterráneas en los alrededores de Hervías (La Rioja). (informe inédito).
- IGME-ITGE, varios años. *Mapa Geológico de España. Escala 1:50.000. Segunda serie. nº 169 (Casalarreina), 170 (Haro), 202 (Santo Domingo de la Calzada), 203 (Nájera), 204 (Logroño), 206 (Lodosa), 240 (Ezcaray), 241 (Anguiano), 242 (Munilla), 243 (Calahorra), 244 (Alfaro), 278 (Canales de La Sierra), 279 (Villoslada de Cameros), 280 (Enciso), 281 (Cervera del Río Alhama), 282 (Tudela), 319 (Agreda), 320 (Tarazona de Aragón)*. Serv. Public. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IGME, 1975. Estudio hidrogeológico de la zona de Navarrete y Fuenmayor. (informe inédito).
- IGME, 1982b. *Estudio de las manifestaciones termales de Extremadura-Salamanca-Aragón-Rioja, orientadas a su posibles explotación como recursos geotérmicos*. Memoria. Tomo II: Area Aragón-Rioja. (inédito).

- IGME, 1983. *Proyecto de investigación Hidrogeológica del Sistema Acuífero nº 63 y Tramo Alto del Sistema nº 62*. Cuenca del Ebro. (P.I.A.S.). Madrid. (inédito).
- IGME, 1982-84. Investigación hidrogeológica para el abastecimiento a poblaciones de Castilla-La Mancha, La Rioja y País Vasco. (informe inédito).
- IGME-DFN, 1984. *Estudio Hidrogeológico de la zona sur de Navarra*. Memoria y planos. (informe. Inédito).
- IGME, 1985. *Investigación geotérmica en el área de Fitero-Alhama de Aragón*. Madrid. (inédito).
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ITGE), 1986. Estudio hidrogeológico del Cuaternario del río Oja. (informe Inédito).
- Instituto Tectónico GeoMinero de España-ITGE, 1987d. Primeras experiencias de recarga artificial en el acuífero del río Oja. (informe. Inédito).
- ITGE, 1987e. Estudio hidrogeológico para la mejora de los abastecimientos de las poblaciones de la cuenca del río Oja y media-alta del arroyo Zamaca. (informe inédito).
- ITGE, 1987f. Modelo matemático bidimensional del aluvial del río Oja. (informe inédito).
- ITGE, 1987g. Proyecto para el desarrollo del Plan de Gestión y conservación de acuíferos. Controles piezométricos, hidrométricos y de calidad del agua en la cuenca del río Oja (informe inédito).
- ITGE, 1987-88. Estudio para actualización de datos de infraestructura hidrogeológica en La Rioja: Montes Obarenes. (informe inédito).
- ITGE, 1988a. *Estudio Hidrogeológico del sector de la "Franja Mesozoica Tectonizada" y materiales del Terciario continental de la Depresión del Ebro situados al SO de la localidad de Alfaro (La Rioja)*. Madrid. (inédito).
- ITGE, 1988c. Estudio para la determinación de la distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos T y S en el acuífero aluvial del río Oja (La Rioja). (informe inédito).
- ITGE, 1988d. Estudio hidrogeológico de la margen izquierda del río Cárdenas. (informe inédito).
- ITGE, 1988e. Informe sobre los ensayos de bombeo de los sondeos experimentales Haro 1 y Haro 2. (informe inédito).

- ITGE, 1989f. *Informe del ensayo de bombeo realizado en el sondeo del Gobierno de La Rioja en el Término de Alfaro (la Rioja)*. (informe Inédito).
- ITGE, 1989g. *Informe de los ensayos de bombeo realizados en los sondeos Ezcaray 1 y 2 (la Rioja)*. (informe Inédito).
- ITGE, 1990. *Documentos sobre la Geología del subsuelo de España*. t. 6: Ebro-Pirineos. Madrid.
- ITGE, 1990b. *Estudio de la Franja Móvil Mesozoica en la subunidad Fitero-Arnedillo y parte de la de Jubera-Anguiano*. Memoria y planos.(informe Inédito).
- ITGE, 1990e. Actualización del modelo matemático del aluvial del río Oja para el periodo 1985-1989. (informe inédito).
- ITGE, 1991. *Estudio Hidrogeológico del río Añamaza*. Proyecto para estudios de asesoramiento en materia de aguas subterráneas a organismos de cuenca y Comunidades Autónomas de Aragón, Asturias, Cantabria, Castilla-León, Cataluña, Navarra, País Vasco y La Rioja (Cuencas Hidrográficas del Norte, Ebro y Pirineo Oriental). Tomo I: memoria y planos, tomo II: anejos. (informe inédito).
- ITGE, 1991b. Estudio de los aspectos económicos y de la gestión de la recarga artificial del acuífero cuaternario del río Oja. (informe inédito).
- ITGE, 1991c. Estudio de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en La Rioja. (informe inédito).
- ITGE, 1991d. Estudio geofísico del aluvial del río Glera. (informe inédito).
- ITGE, 1992. *Estudio Hidrogeológico de las unidaes de Jubera-Anguiano y Torrecilla-Mansilla-Neila*. Proyecto para estudios de asesoramiento en materia de aguas subterráneas a organismos de cuenca y Comunidades Autónomas de Aragón, Asturias, Cantabria, Castilla-León, Cataluña, Navarra, País Vasco y La Rioja (Cuencas Hidrográficas del Norte, Ebro y Pirineo Oriental). Tomo I: memoria y planos, tomo II: anejos. (informe inédito).
- ITGE, 1992b. *Las aguas subterráneas de La Rioja. Memoria-síntesis*. 250 pp. (informe inédito).
- Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario-IRYDA, 1990. *Estudio Hidrogeológico del acuífero de Valdegatur, en la Cuenca del río Alhama (La Rioja)*. Memoria y planos. (informe inédito).
- Lanaja, J.M., Querol, R., Navarro, A., 1987. *Contribución de la exploración petrolífera al conocimiento de la Geología de España*. IGME, memoria y planos.



- Llamas, M.R., 1984. Política hidráulica y génesis de mitos hidráulicos en España. *Cimbra*. (218), 16-25.
- Llanos, H., 1992. *Estudio Hidrogeológico de la Unidad de Urbasa, Montes de Vitoria, Treviño y Sectores Adyacentes*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. 1-334 y anexos.
- Llanos, H., Abalos, B., Garfias, J., Ba Mamadou, K., 1995. Contribución al Conocimiento de los recursos subterráneos de la Unidad Hidrogeológica de la Sierra de Toloño (Cuenca del río Ebro). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. (XIX), 517-530.
- Martín ranz, J.C., García Ruiz, J.M., 1982. *Los ríos de La Rioja. Introducción al estudio de su régimen*. Pub. Instituto de Estudios Riojanos. Col. Ciencias de la Tierra (Geografía). (1), 1-67.
- Martínez Abaigar, J., Nuñez, E., 1991. *Informe sobre la distribución de observatorios meteorológicos en La Rioja*. Consejería de Agricultura y Alimentación. Gobierno de La Rioja. (informe inédito).
- Martínez-Torres, L.M., 1993. Corte balanceado de la Sierra de Cantabria (cabalgamiento de la Cuenca Vasco-Cantábrica sobre la Cuenca del Ebro). *Geogaceta*. (14), 113-115.
- Mas, J.R., Alonso, A., Guimerà, J., 1993. Evolución tectosedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La cuenca finijurásica-eocretácica de Los Cameros (La Rioja-Soria). *Rev. Soc. Geol. España*. (6), 129-144.
- MINER-MOPTMA, 1994. Libro Blanco de las Aguas Subterráneas.
- Muñoz, A., 1992. *Análisis tectosedimentario del sector occidental de la Cuenca del Ebro (Comunidad de La Rioja)*. Instituto de Estudios Riojanos. Ciencias de la Tierra. (15), 1-347.
- Muñoz, A., Casas, A.M., 1996. The Rioja trough: tecto-sedimentary evolution of a foreland symmetric basin. *Basin Research*. (9), 65-85.
- Nuñez, E., Martínez, J., 1991. *El clima de La Rioja. Análisis de precipitaciones y temperaturas*. Public. Gobierno de La Rioja, serie Estudios. (22), 1-321.
- Pellicer, F., 1985. Modelado exokárstico de la plataforma de los Gamellones (Torrecilla en Cameros, La Rioja). Actas del primer Coloquio sobre Geografía de La Rioja. Instituto de Estudios Riojanos. Logroño 1984. *Colección Ciencias de La Tierra*. 5 (2), 43-54.

- Pérez-Lorente, F., 1979. Niveles de erosión y acumulación en La Rioja Central y Oriental. *Cuad. Inv. Geogr. Hist.* 5, 37-50.
- Pérez-Lorente, F., Sanz Asensio, J., Galbán, J., Ortega, A., Jiménez, I., Pérez-Gómez, A., 1988. Consideraciones sobre la hidroquímica de un área muestra de La Rioja. *Bol. Geol. y Minero*, XCIX (V), 786-801.
- Ramírez del Pozo, J., 1987. Resumen de la conferencia sobre geología del subsuelo en el sector meridional de la cuenca Vasco-Cantábrica. *Geogaceta.* (3), 40-44.
- Riba, O., Jurado, M.J., 1992. Reflexiones sobre la geología de la parte occidental de la Depresión del Ebro. *Acta Geol. Hispánica*, v.27 (homenaje a Oriol Riba Arderiu) (1-2), 177-193.
- Sahuquillo, A., 1991. *El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en la planificación hidráulica.* Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona. 297-311.
- Sanz Pérez, E., 1994. El Karst de la Sierra de Urbión (Burgos). *Geogaceta.* (15), 86-89.
- Sanz Pérez, E., 1996a. Les systèmes karstiques des Sierras de Urbión et de Neila (Burgos, Espagne). *Hydrol. Sci. Journal.* (41), 385-398.
- Sanz Pérez, E., 1996b. Caracterización de la recarga natural en los sistemas kársticos de Brieva de Cameros, Las Viniegras (La Rioja) y Fuente Negra (Burgos). *Geogaceta.* (20), 1261-1263.
- Servicio Geológico de Obras Públicas-SGOP, 1974. *Captación de aguas para el abastecimiento de la localidad de Grávalos (La Rioja).* (informe inédito).
- SGOP, 1991. *Estudio sobre dos pozos experimentales y aforos realizados en la cuenca del río Jubera (La Rioja).* (informe inédito).
- Tischer, G., 1966a. Über die Wealden-Ablagerung und die Tektonik der ostlichen Sierra de Los Cameros in den nordwestlichen Iberischen Ketten (Spanien). (en Beuther, A.; Dahm, H.; Kneuper-Haack, F.; Mensink, H & Tischer, G.: *Der Jura und Wealden in Nordost-Spanien.* *Beith. Geol. Jb.* 44, pp. 123-164.

# EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

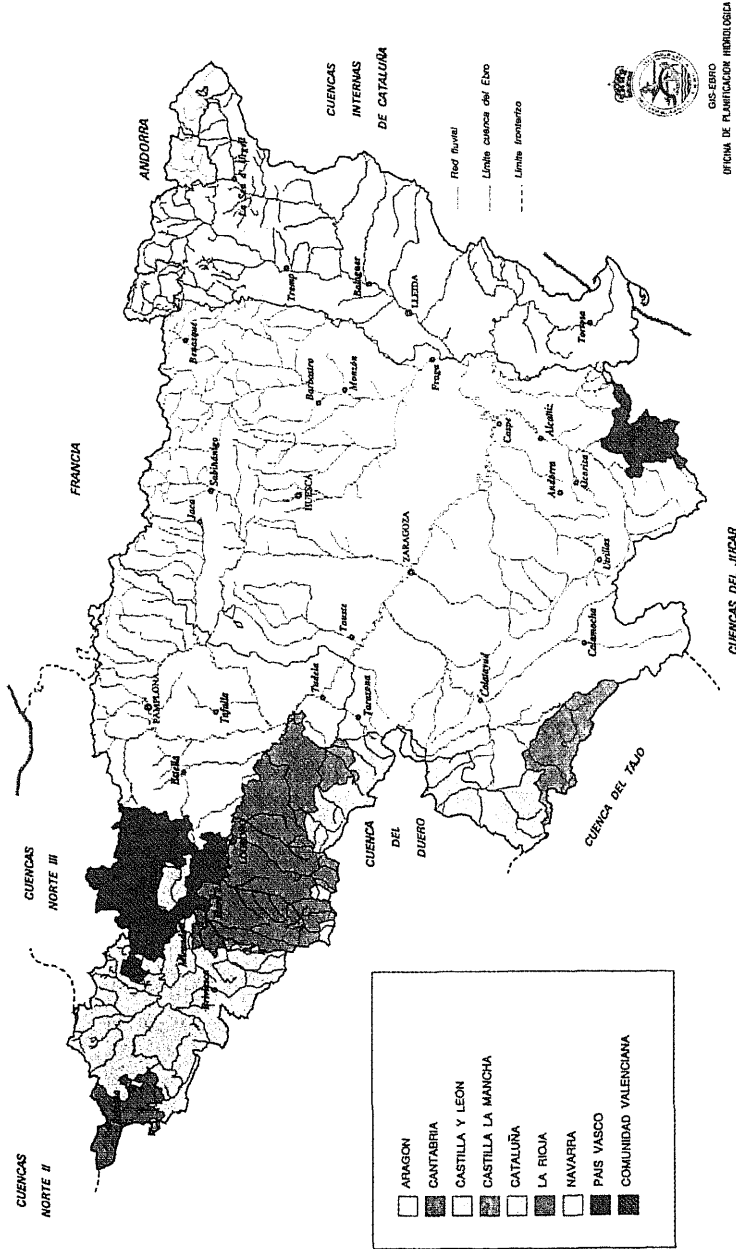


Figura 1.- La Rioja en el marco administrativo de la Cuenca del Ebro. Tomado de CHE (1996).

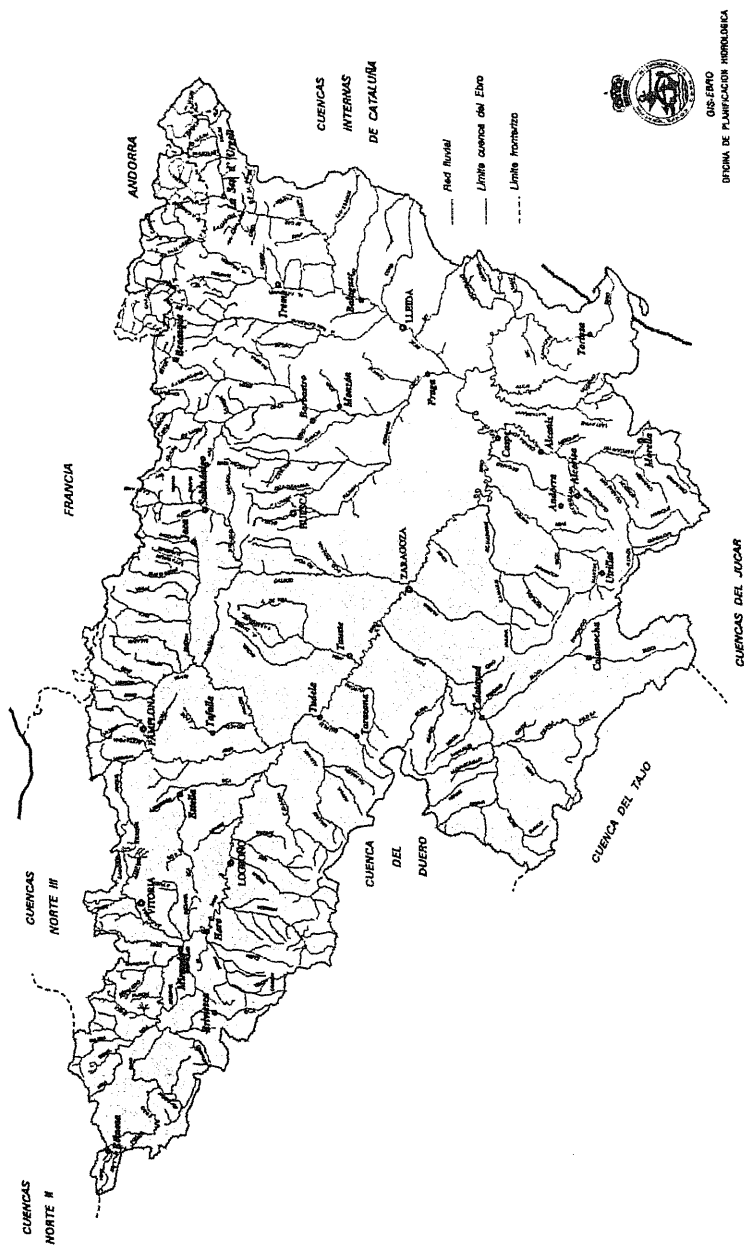


Figura 2.- La Rioja en el marco hidrológico de la cuenca del Ebro. Se encuentra surcada por seis ríos afluentes del Ebro por su margen derecha, que de oeste a este son: Tirón, Najerilla, Iregua, Leza, Cidacos y Alhama.

# EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

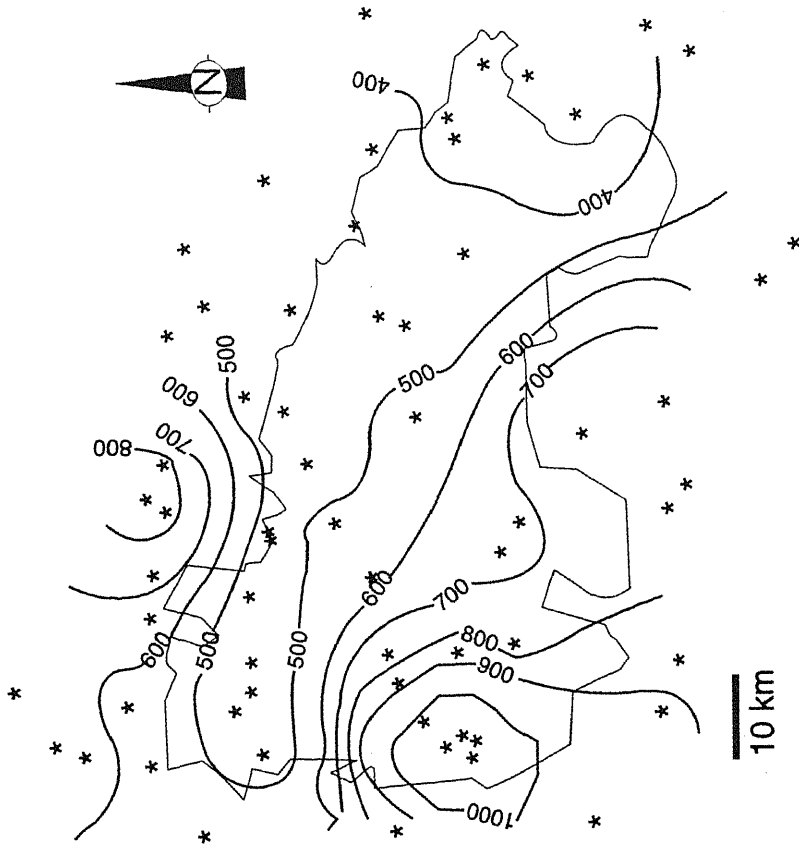


Figura 3.— Isoyetas medias anuales en La Rioja. Modificado de Nuñez et al. (1991).



EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

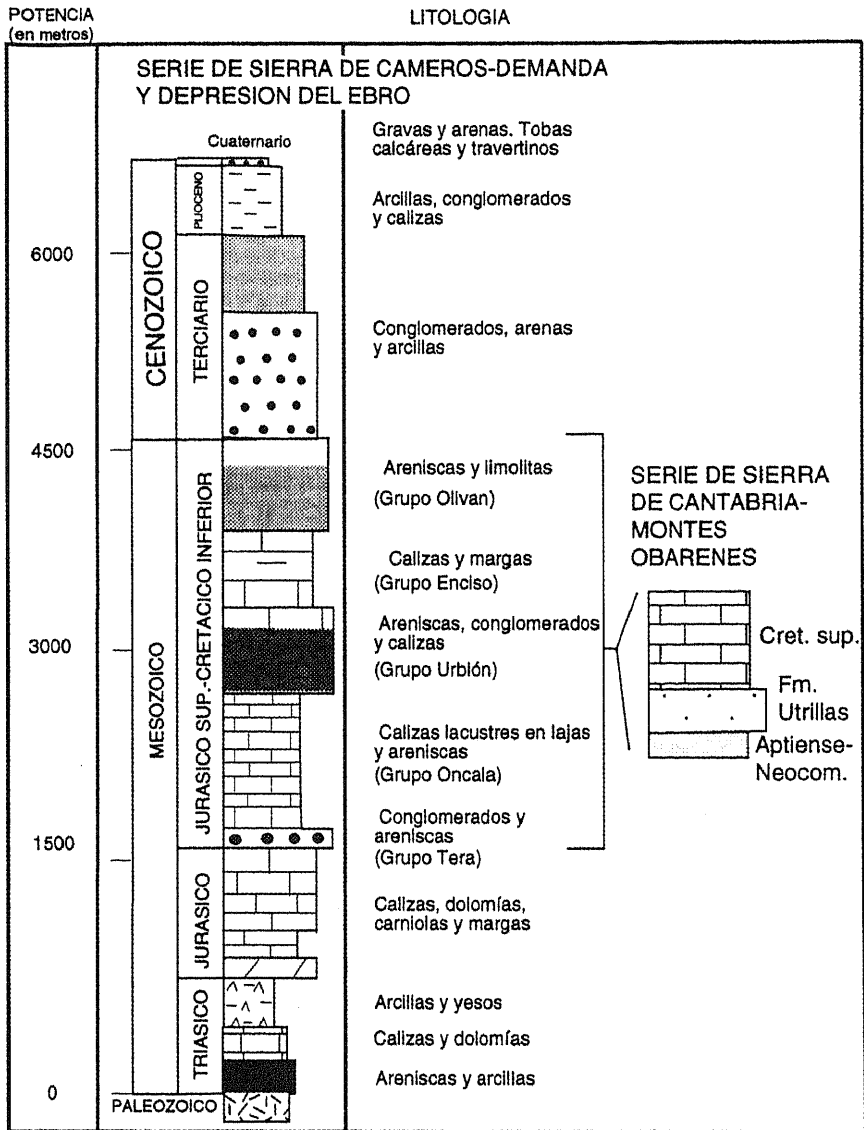


Figura 5.- Columna estratigráfica sintética de los materiales geológicos aflorantes en La Rioja.

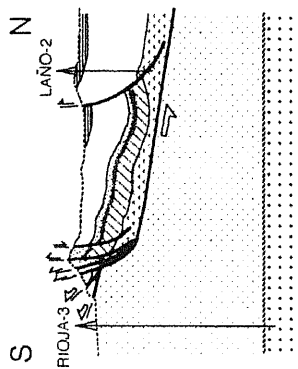
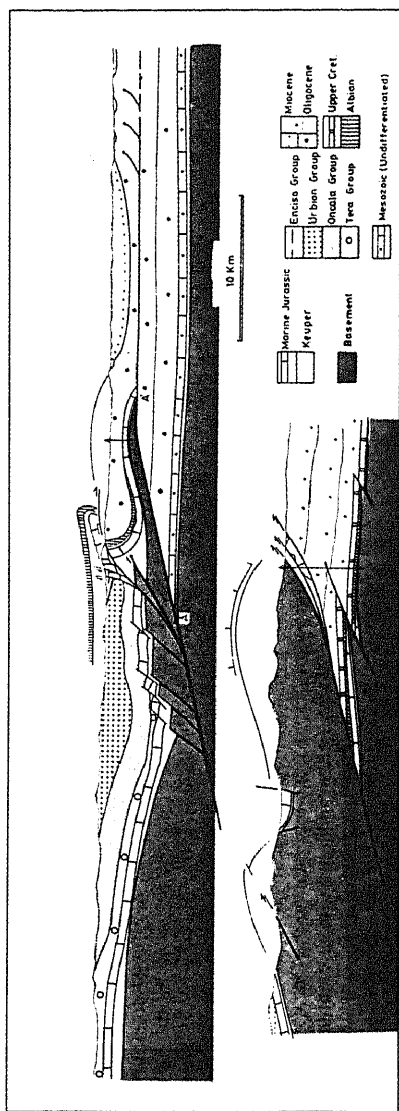


Figura 6.- Cortes geológicos representativos de la estructura geológica de La Rioja. Arriba cortes del Macizo Cameros-Demanda (tomados de Casas, 1993); abajo corte de la Sierra de Cantabria (Tomado de Martínez-Torres, 1993).



# EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

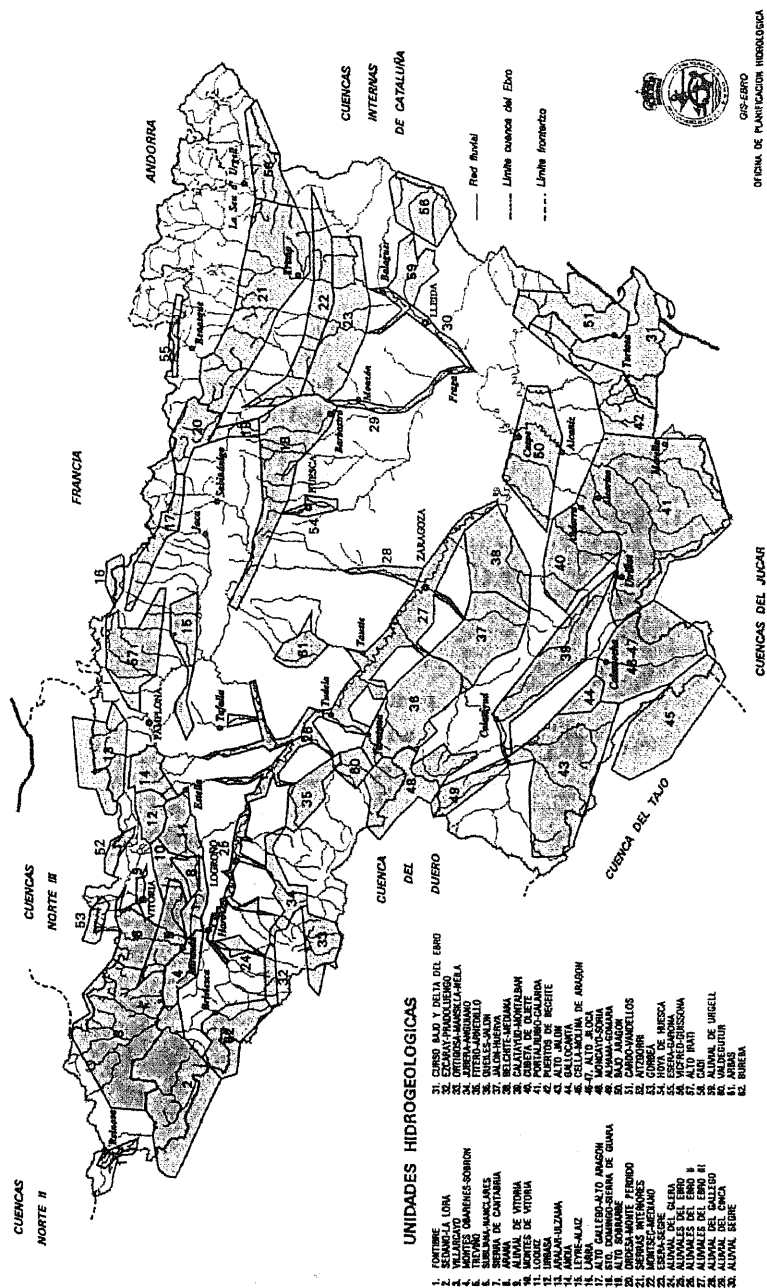


Figura 7.- Unidades hidrogeológicas de la Cuenca del Ebro. Tomado de CHE (1996).

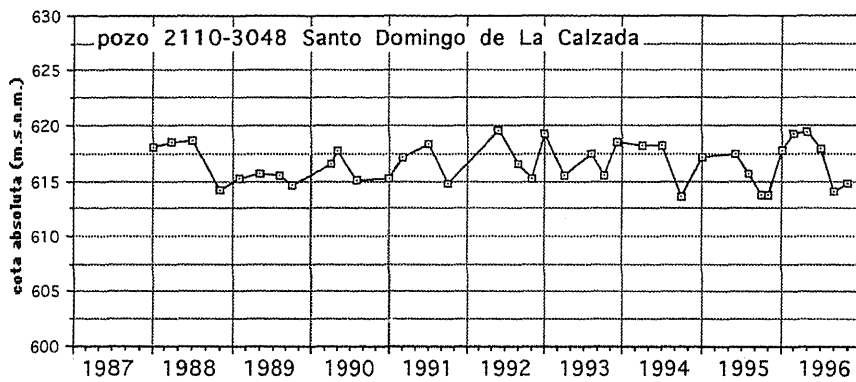
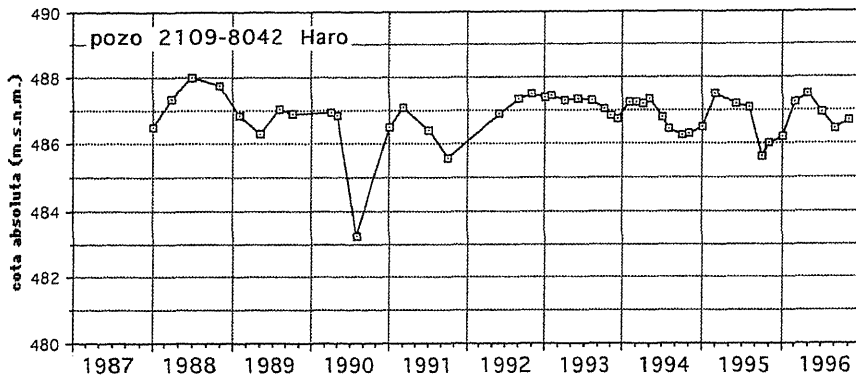


Figura 8.- Gráficos de evolución piezométrica de los acuíferos aluviales del Tirón (Haro) y el Oja (Santo Domingo de La Calzada).

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

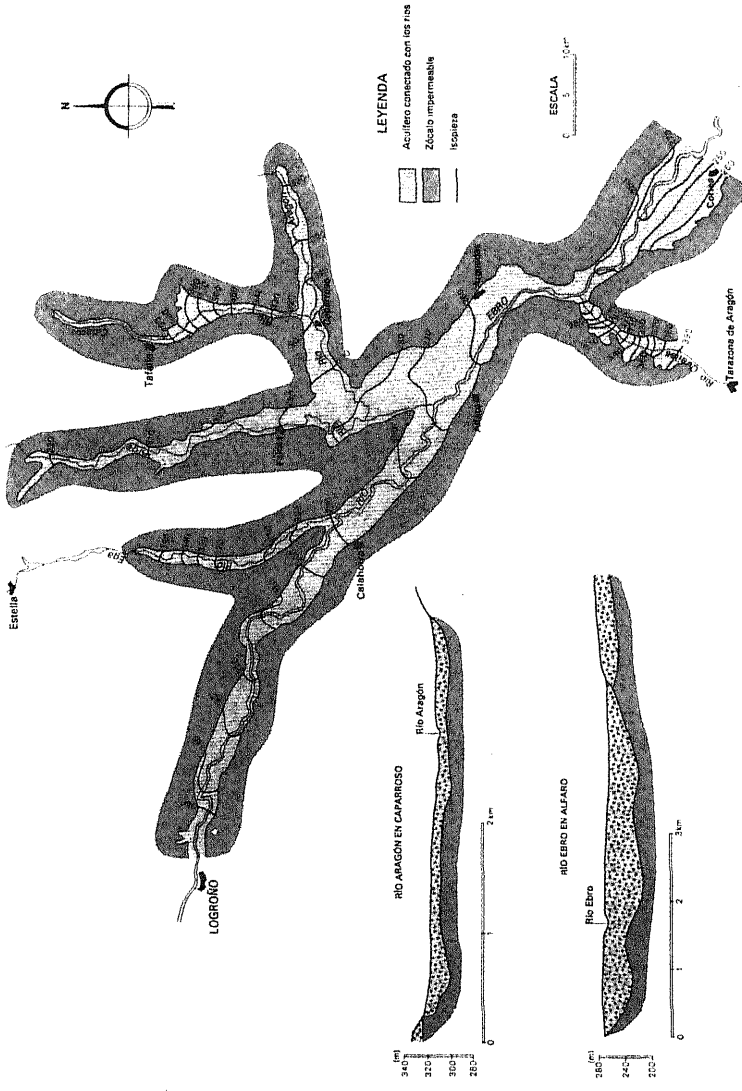


Figura 9.— Esquema de los acuíferos aluviales del río Ebro y afluentes. Tomado de DFN (1987).

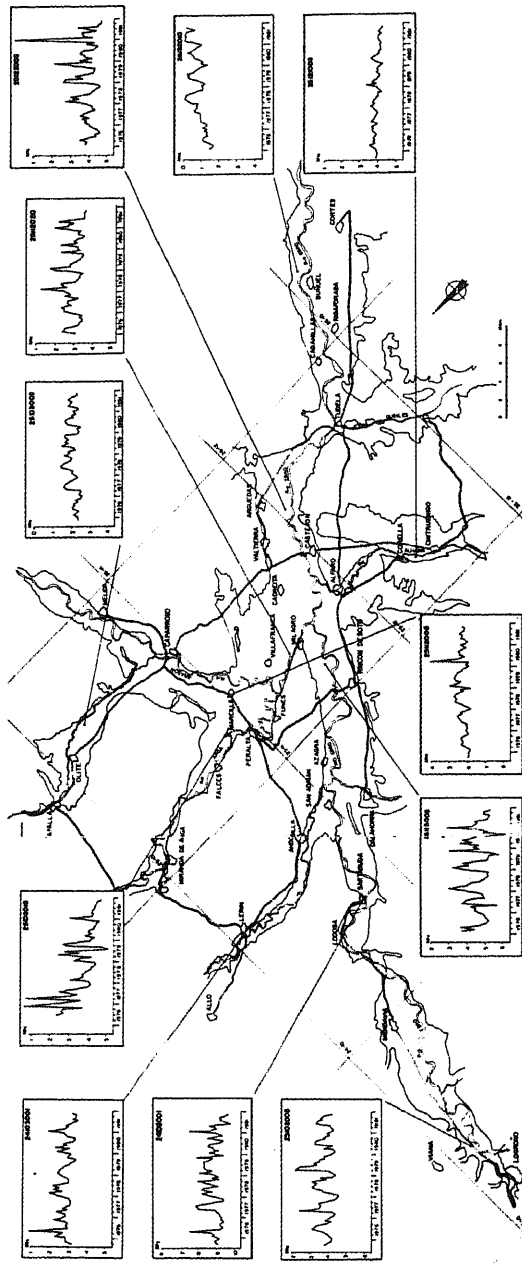


Figura 10.— Gráficos de evolución piezométrica de los acuíferos aluviales del río Ebro y afluentes. Tomado de DFN (1987).

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

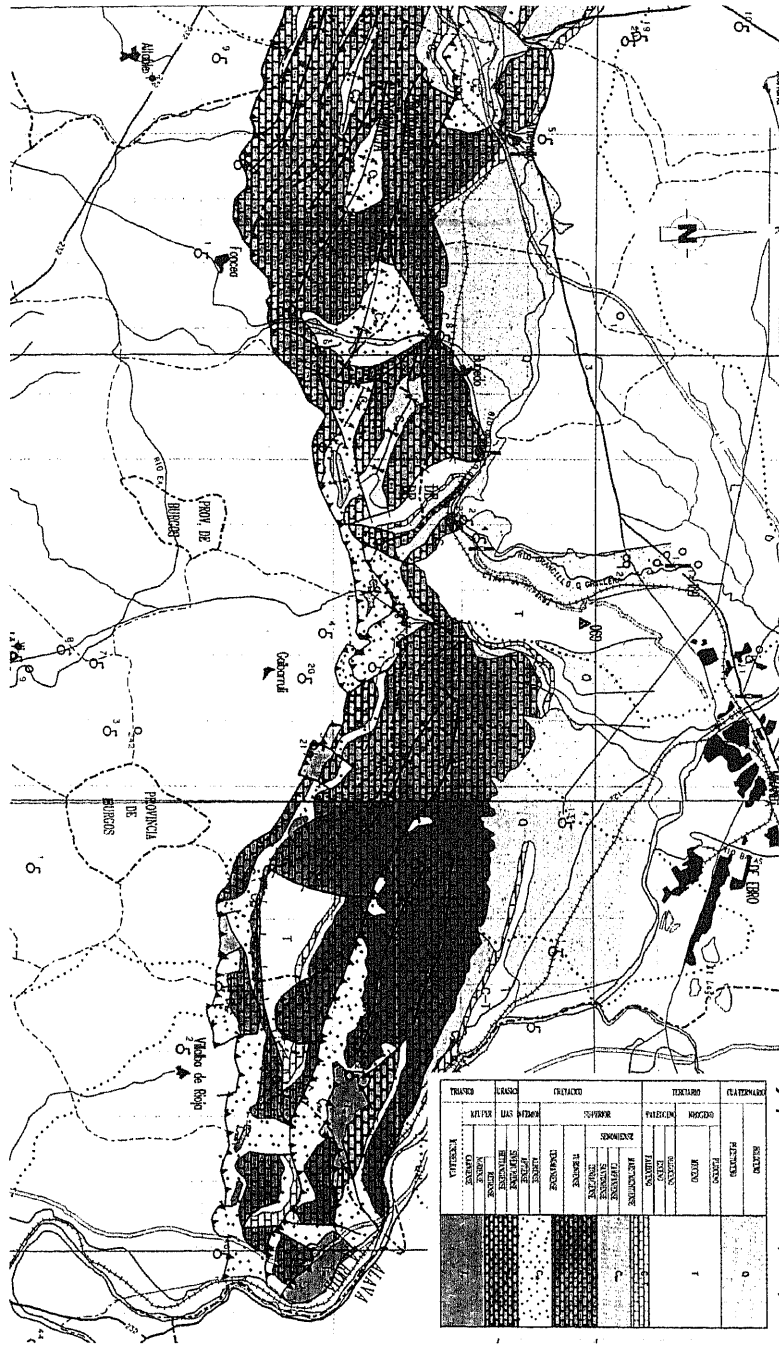


Figura 11.- Esquema hidrogeológico de los Montes Obarenes.

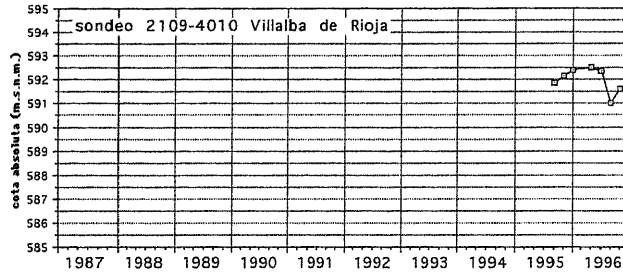


Figura 12.- Gráfico de evolución piezométrica del sondeo de Villalba de Rioja.

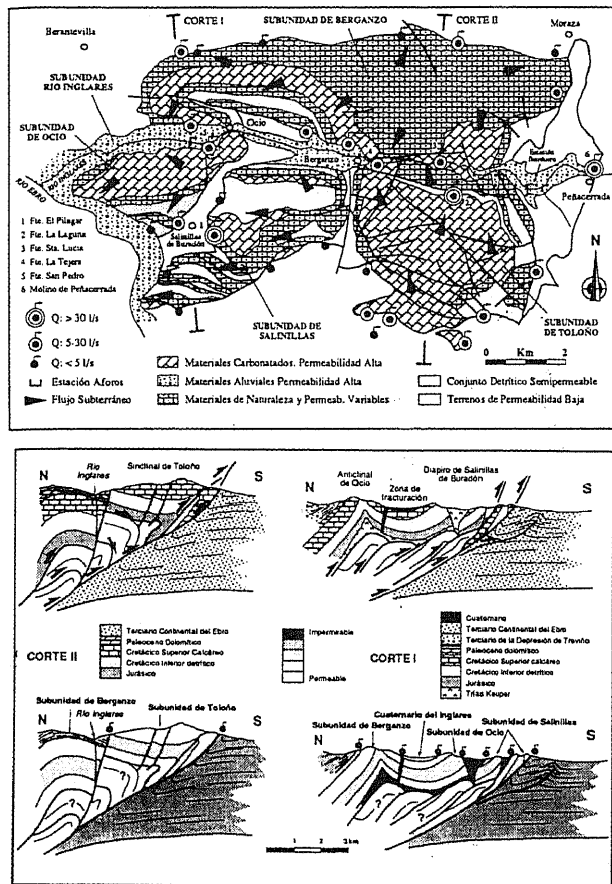


Figura 13.- Esquema hidrogeológico y cortes hidrogeológicos de la Sierra de Toloño-Cantabria, tomados de Llanos et al. (1995).

## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

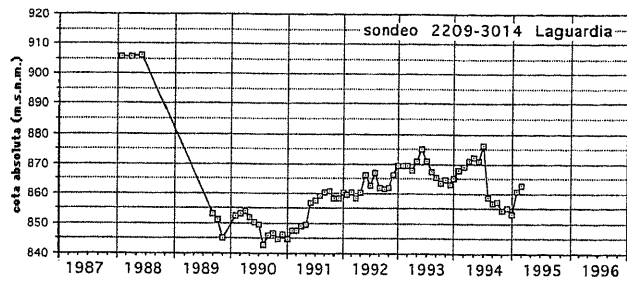


Figura 14.- Gráfico de evolución piezométrica del sondeo de Laguardia (Sierra de Cantabria).

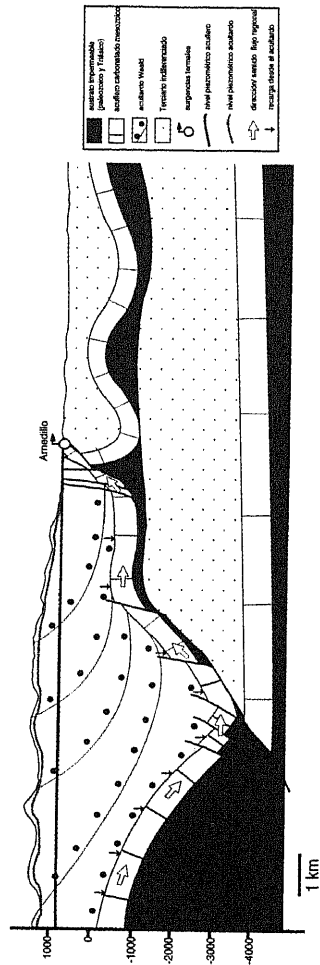


Figura 15.- Corte hidrogeológico de la Sierra de Cameros correspondiente aproximadamente al corte del río Cidacos. Tomado de Coloma (1997).

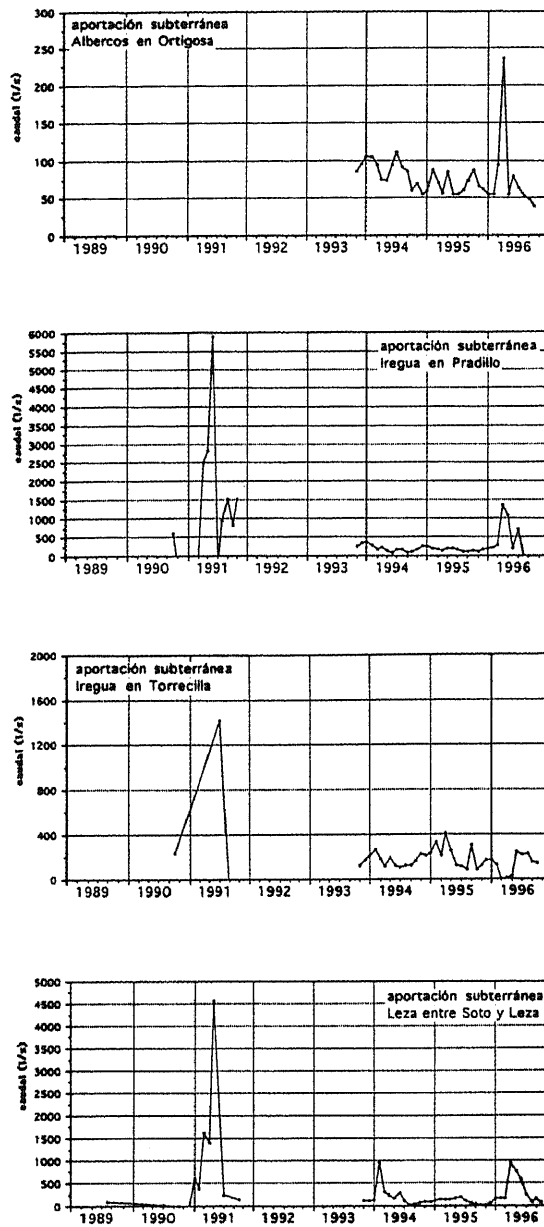


Figura 16.- Hidrogramas de las aportaciones de los acuíferos carbonatados de Cameros a los cauces de los ríos principales.



## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

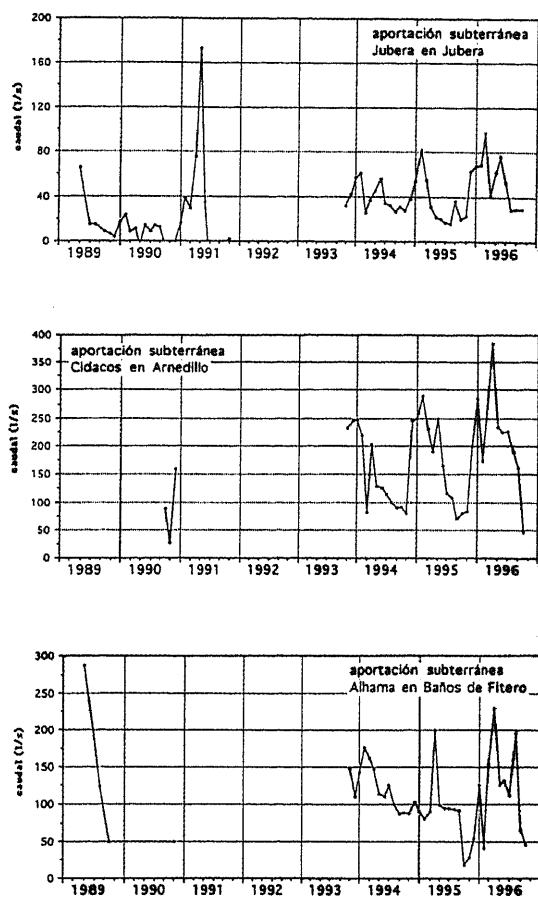


Figura 16.- Hidrogramas de las aportaciones de los acuíferos carbonatados de Cameros a los cauces de los ríos principales.

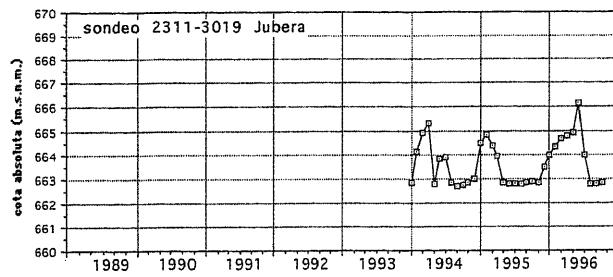


Figura 17.— Ejemplo de gráfico de evolución piezométrica de los acuíferos carbonatados de Cameros; sondeo Juberá 2-J. Tomado de Coloma (1997).

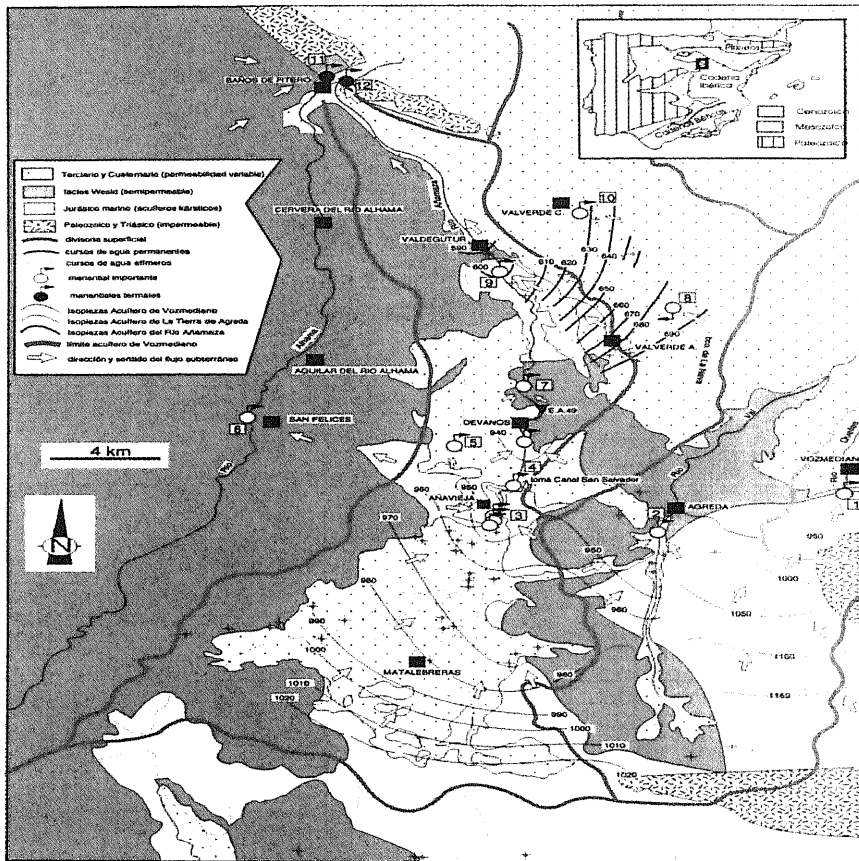


Figura 18.— Esquema hidrogeológico de los acuíferos kársticos de la parte oriental de la cuenca del Alhama. Tomado de Coloma (1997).

## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

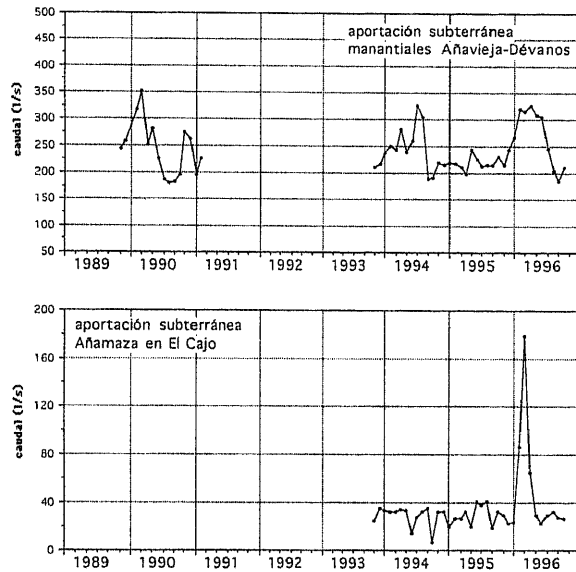


Figura 19.- Hidrogramas de las principales surgencias de los acuíferos carbonatados del río Añamaza. Tomado de Coloma (1997).

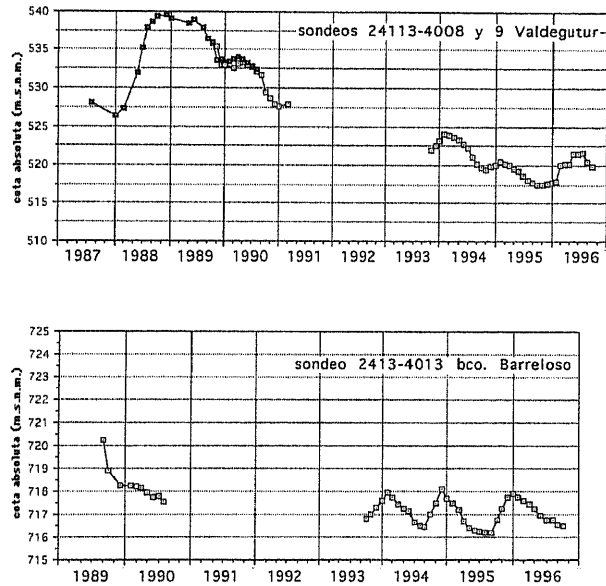


Figura 20.- Gráficos de evolución piezométrica de los sondeos de los acuíferos carbonatados del río Añamaza. Tomado de Coloma (1997).

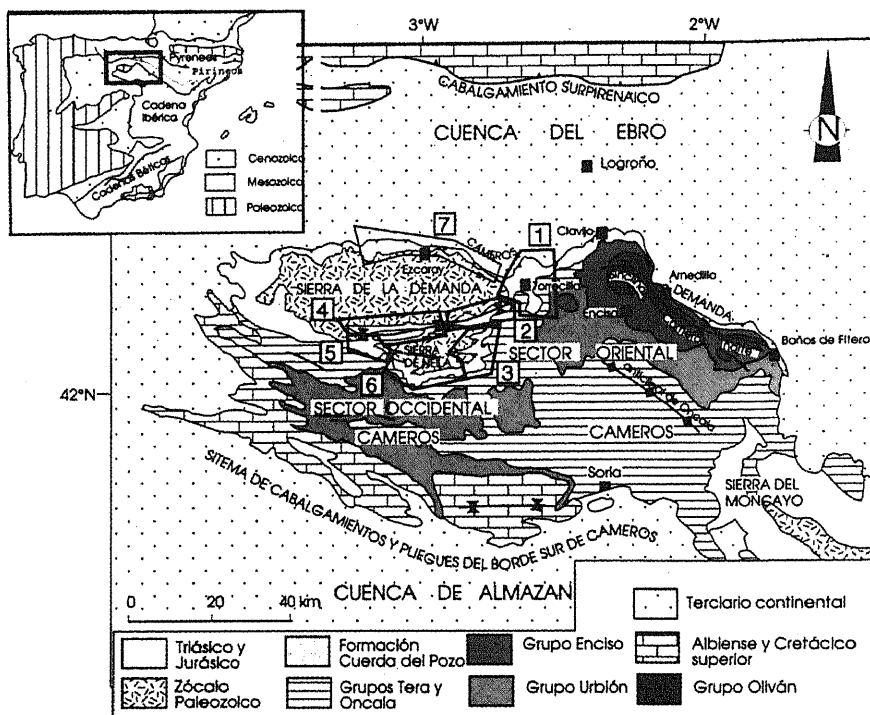


Figura 21.- Sistemas kársticos del entorno de La Demanda. 1: sistema de Torrecilla en Cameros, 2: sistema de Brieva de Cameros, 3: sistema de Las Viniegras, 4: sistema de Mansilla, 5: sistema de Fuente Negra (no incluido en La Rioja), 6: sistemas de Neila y de la Sierra de Urbión, 7: sistema de Anguiano-Fresneda. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

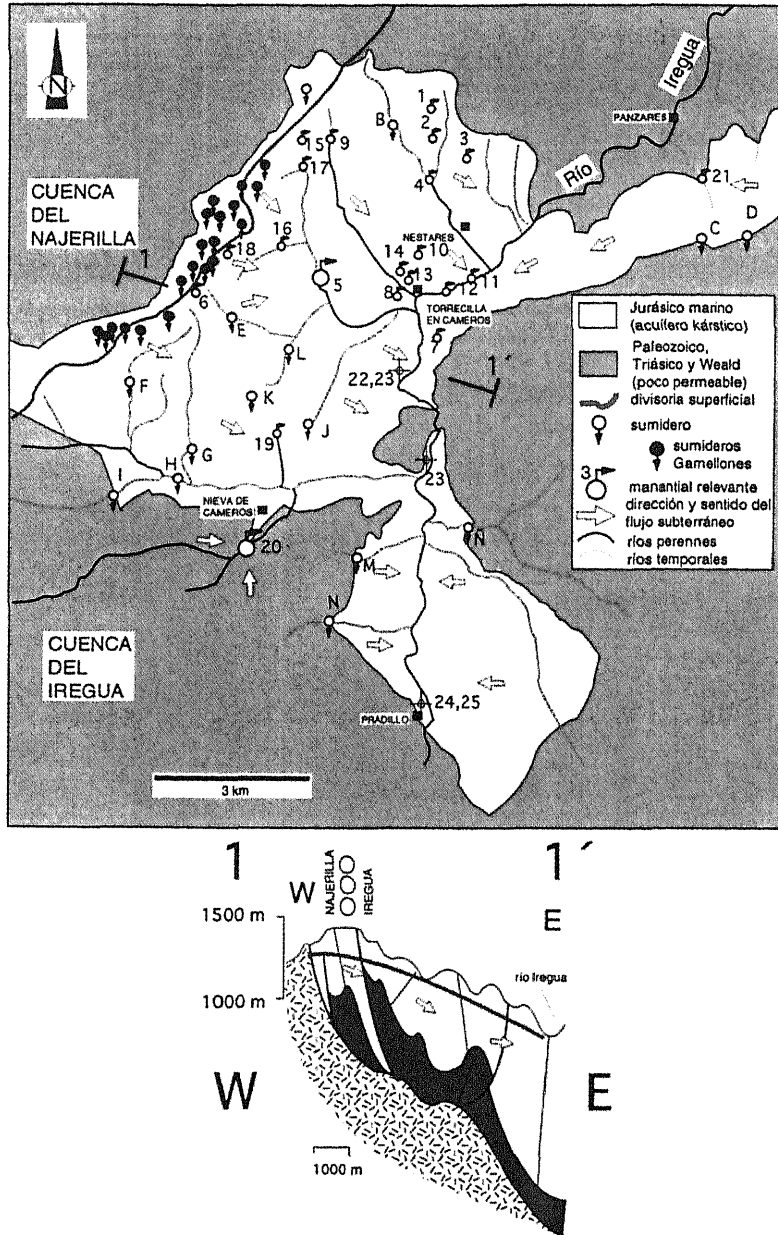


Figura 22.- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Torrecilla en Cameros. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

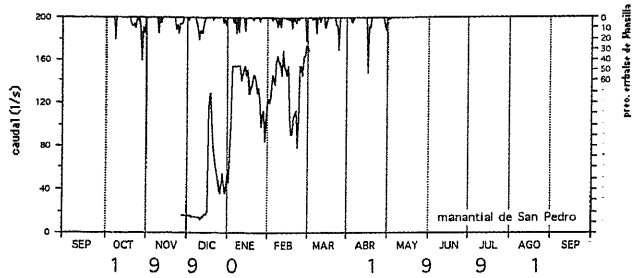


Figura 23.- Hidrograma del manantial de San Pedro, principal surgencia del sistema kárstico de Torrecilla. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

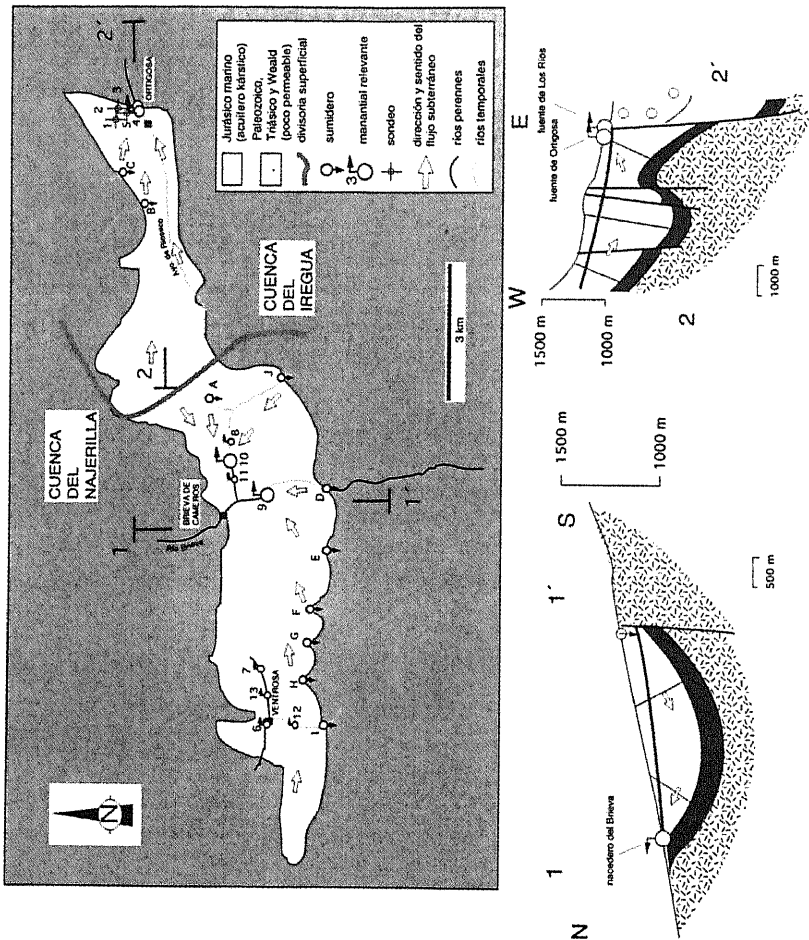


Figura 24.- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Brieva de Cameros. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

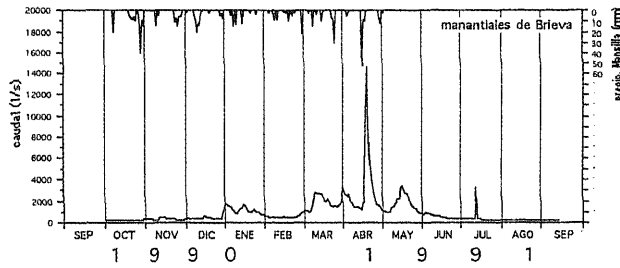


Figura 25.-- Hidrograma de los manantiales de Brieva, principal surgencia del sistema kárstico de Brieva. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

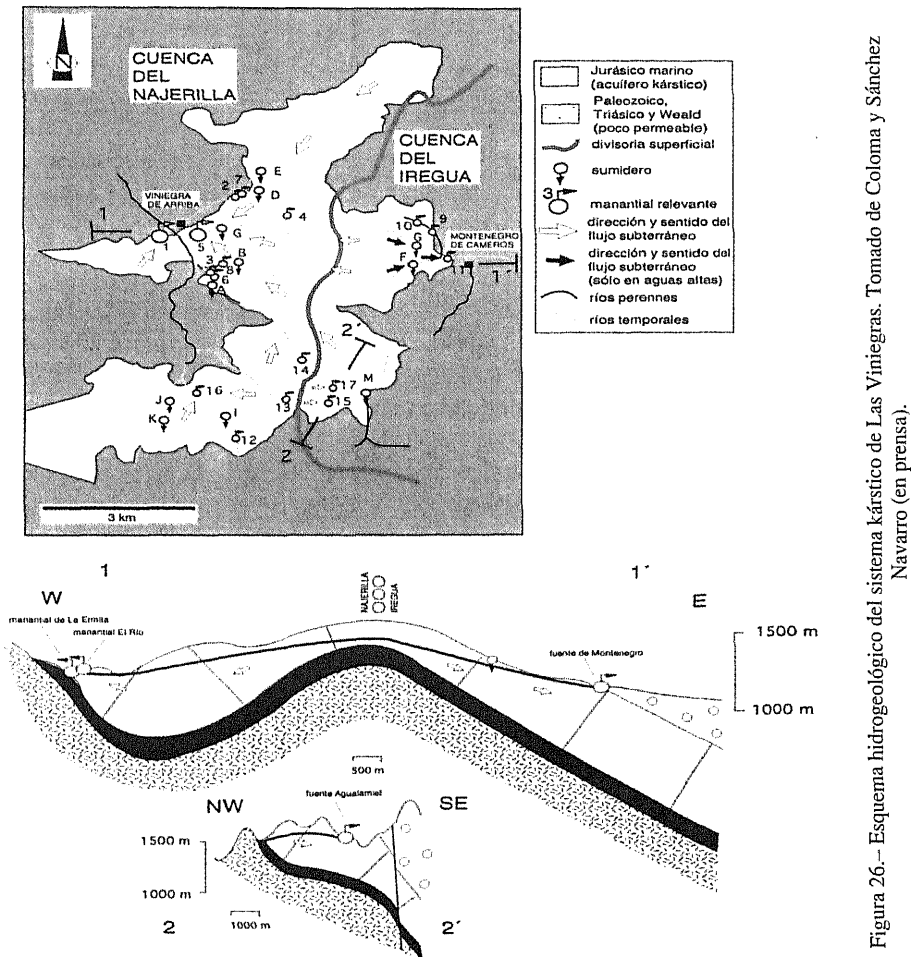


Figura 26.-- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Las Viniégras. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

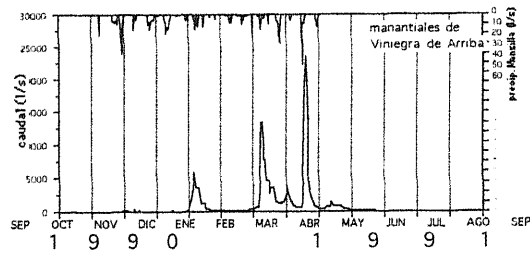


Figura 27.- Hidrograma de los manantiales de Las Viniegas, principal surgencia del sistema kárstico de Las Coloma y Las Viniegas. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

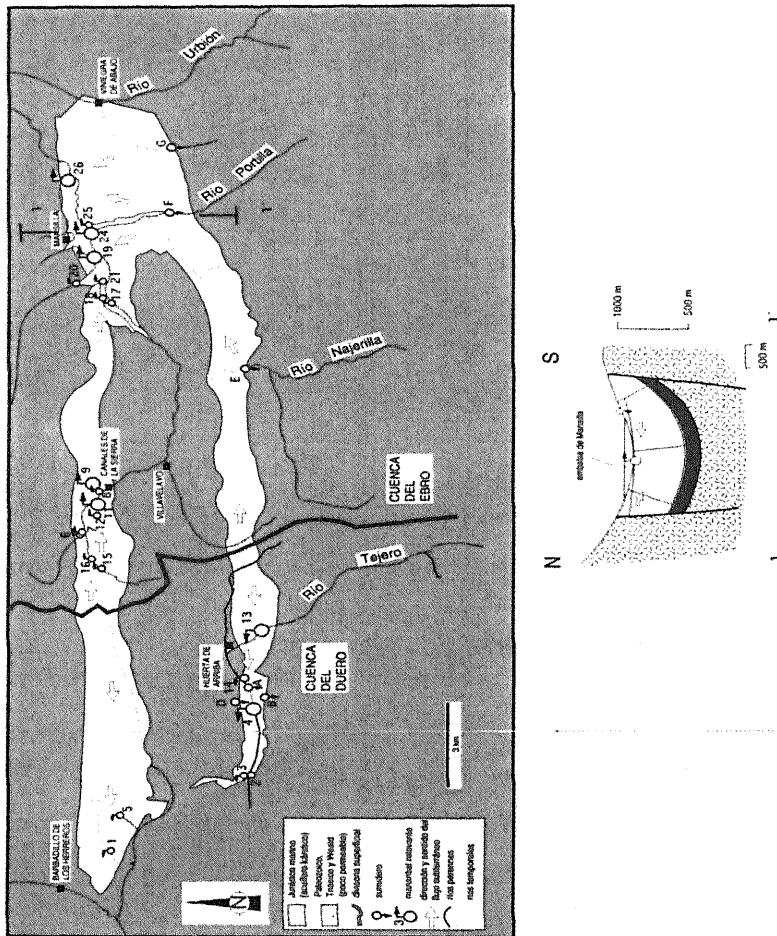


Figura 28.- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Mansilla. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).



EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

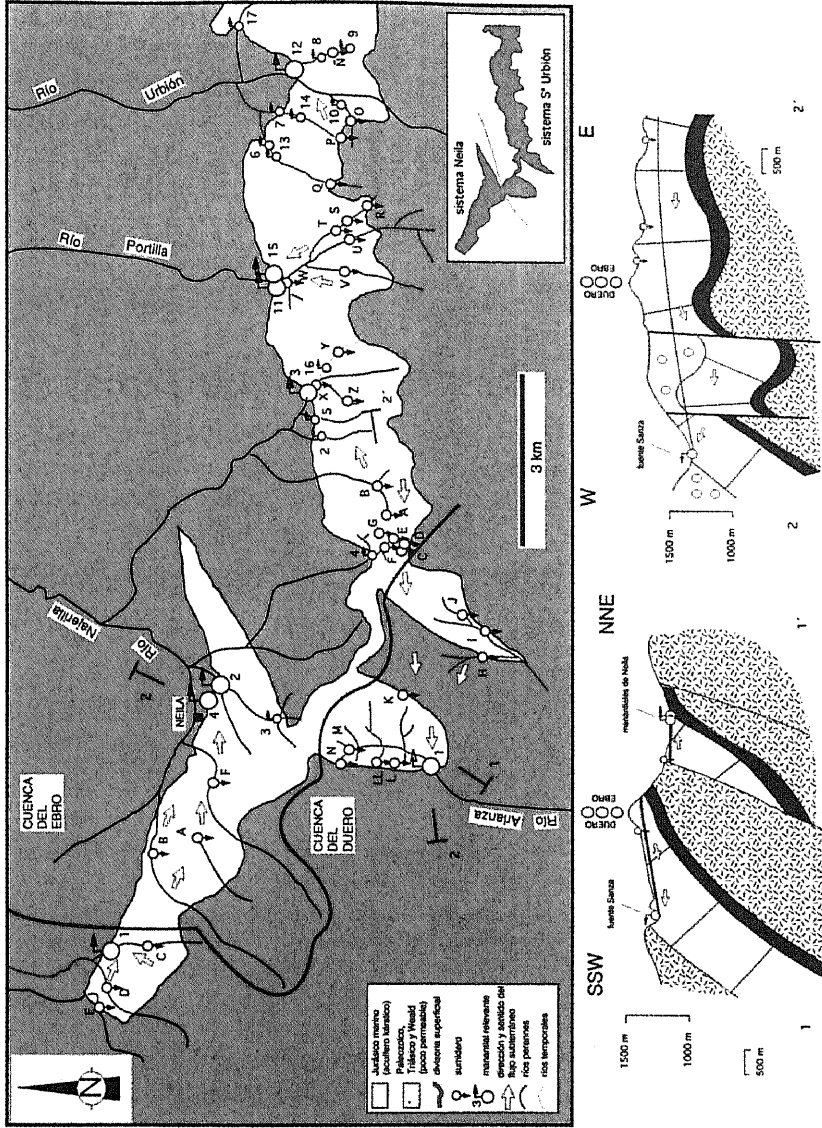


Figura 29.- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Neila y de la Sierra de Urbión. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

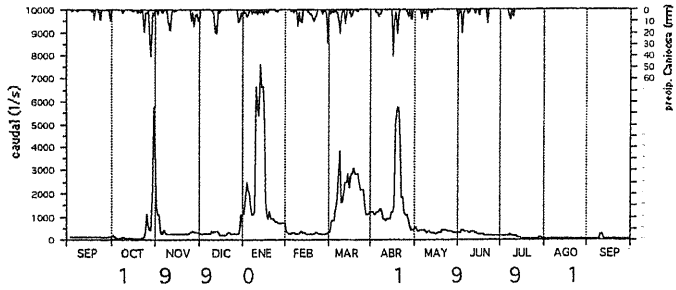


Figura 30.- Hidrograma de la Fuente Sanza, principal surgencia del sistema kárstico de la sierra de Urbión, se trata de un importante trasvase subterráneo a la cuenca del Duero desde la cuenca del Ebro. Tomado de Coloma y Sánchez Navarro (en prensa).

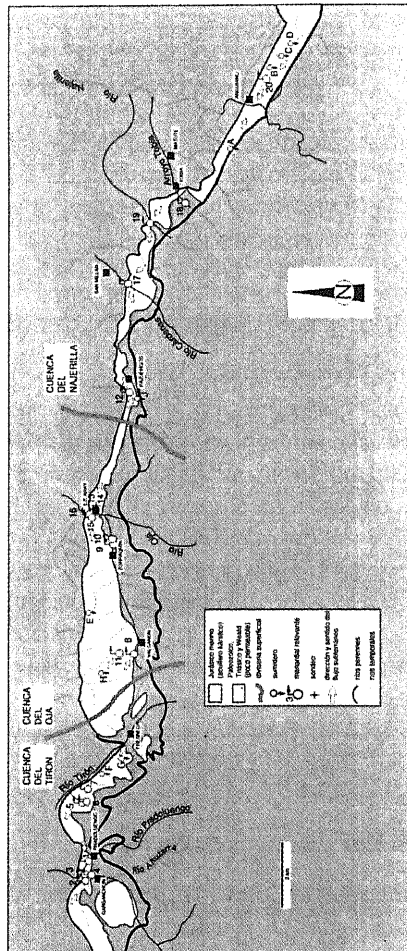


Figura 31.- Esquema hidrogeológico del sistema kárstico de Anguiano-Fresneda de La Sierra.

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

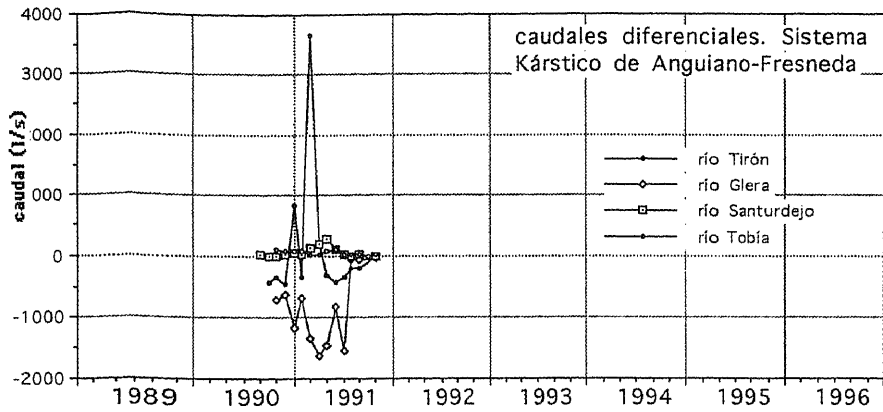


Figura 32.- Hidrogramas de la aportación del sistema kárstico de Anguiano-Fresneda de La Sierra a los cauces principales. Observar como el Glera y el Tirón funcionan bien como efluentes o como afluentes.

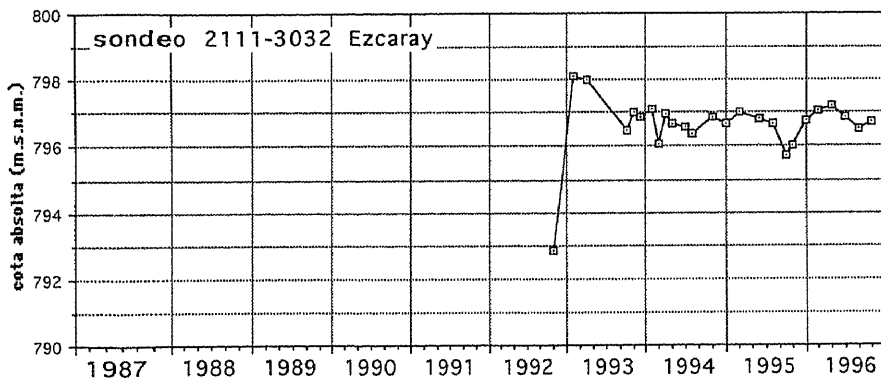


Figura 33.- Gráfico de evolución piezométrica del sondeo Ezcaray-2.

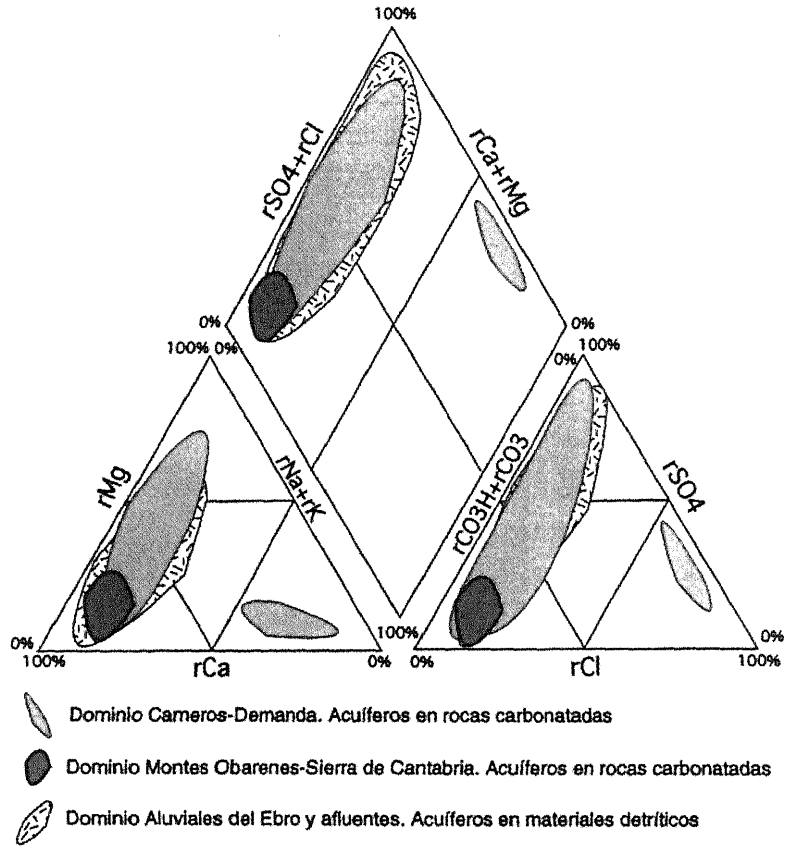


Figura 34.- Diagrama de Piper-Hill-Langelier simplificado de las aguas subterráneas de La Rioja.

## EL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA RIOJA

Cuenca	extensión km <sup>2</sup>	cota máxima msnm	cota mínima msnm	longitud cauce ppal. km	pendiente cauce ppal. %	caudal medio m <sup>3</sup> /s	aport. media anual hm <sup>3</sup> /año	caudal específico l/s/km <sup>2</sup>
Tirón	1192	2132	435	65	2,61	9,07	286,00	7,61
Najerilla	1110	2000	415	100	1,58	12,67	399,50	11,41
Iregua	670	2100	355	64	1,50	6,60	210,00	9,90
Leza	528	1400	340	50	1,90	2,30	72,00	4,32
Cidacos	692	1564	285	79	1,65	2,70	85,00	3,74
Alhama	1396	1556	260	78	1,54	4,30	135,00	3,06

tabla 1.- Características de las cuencas de los ríos principales de La Rioja

Cuenca	regadío ha	demanda hm <sup>3</sup> /año
Ebro		
bombes	3000	13,50
Canal de Lodosa	7300	67,49
Tirón		
Alto Tirón	250	0,25
Río Reláchigo	150	0,45
zona de bombes	1000	4,00
bajo Tirón	150	0,45
Ríos Ea y Aguanal	25	0,08
Río Oja zona Ezcaray	450	2,87
acuífero del Oja	2000	7,00
Najerilla		
Río Tobía	45	0,09
Río Cárdenas	250	0,50
Río Yalde	350	0,70
Río Tuerto	340	0,68
Río Najerilla	1600	7,20
Canal Najerilla	9100	40,50
Iregua		
zona montaña	250	0,50
zona valle	9150	32,03
Leza		
Jubera	700	2,45
Jubera	700	1,05
Cidacos		
zona alta	25	0,04
zona baja	4000	14,00
Alhama		
alto Alhama	1300	3,25
Río Linares	1200	4,20
Río Añamaza	200	0,30
Interfluvios		
Ebro I	750	2,63
Ebro II	650	2,28
Ebro III	-	-
Ebro IV	1000	1,50
margen izquierda	28	0,06
TOTAL	45963	45963

tabla 2.- Distribución de la superficie en regadío actualmente existente en La Rioja

