

# **APROXIMACIÓN A LA EVOLUCIÓN HIDROQUÍMICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL TERCIARIO DETRÍTICO DE LA CUENCA DEL ARLANZÓN (BURGOS)**

**Marcos Naveira, L.A.<sup>(1)</sup>, Villarroya Gil, F.<sup>(2)</sup>, Castaño Castaño, S.<sup>(3)</sup> y Vázquez Marroquín, M.<sup>(1)</sup>.**

(1) Departamento de Química; Escuela Politécnica Superior; Universidad de Burgos; Av. Cantabria s/n 09006-Burgos. Tfno. 947.258.937. E-mail: [qplamn@ubu.es](mailto:qplamn@ubu.es)

(2) Departamento Geodinámica. Facultad Ciencias Geológicas. Univ. Complutense Madrid.

(3) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Madrid.

## **ABSTRACT:**

We present a study on hydrochemical evolution of groundwater flowing in the detrital Tertiary aquifers of Arlanzon Basin (Burgos province, Castilla y León, Spain). Chemical changes are based on water-rock interactions along flow paths connecting recharge and discharge areas of the detrital Tertiary aquifers. Low mineralized, calcium hydrocarbonate water coming from infiltration evolves to sodium hydrocarbonate and finally to high mineralized, calcium sulfate water as a result of gypsum dissolving.

Key words: hydrogeochemistry, Arlanzon aquifer, groundwater evolution.

## **RESUMEN:**

El presente trabajo estudia la evolución de las aguas subterráneas que circulan por las formaciones geológicas terciarias de la Cuenca del Arlanzón, buscando conocer los procesos geoquímicos de interacción agua-roca, que tienen lugar durante el flujo hidrogeológico. Para ello se estudian los datos hidroquímicos de una serie de puntos de agua situados a lo largo de un perfil de flujo en el Terciario Detrítico de la Cuenca del Arlanzón (Burgos). Las aguas de infiltración, de baja mineralización y facies hidrogenocarbonatado cálcica, cambian a hidrogenocarbonatado calco-magnésicas de baja mineralización, continuando su evolución, a aguas hidrogenocarbonatado sódicas de baja mineralización. Cerca de la descarga, estas aguas adquieren una importante mineralización por disolución de yesos.

Palabras clave: hidrogeoquímica, acuífero del Arlanzón, evolución de aguas subterráneas.

## **PRESENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL ARLANZÓN.**

El presente trabajo tiene por objeto estudiar la evolución de las aguas subterráneas que circulan por las formaciones geológicas terciarias y cuaternarias de la Cuenca del Arlanzón, buscando conocer los procesos geoquímicos de interacción agua-roca, que tienen lugar durante el flujo hidrogeológico. Para ello se estudian los datos hidroquímicos de una serie de puntos de agua situados a lo largo de un perfil de flujo en el Terciario Detrítico de la Cuenca del Arlanzón (Burgos). La Cuenca del Arlanzón, que ocupa 2.659 km<sup>2</sup> en la zona NE de la Cuenca del Duero, se distribuye en tres grandes dominios estructurales:

- Al norte, las Sierras de Ubierna, constituidas fundamentalmente por materiales de edad mesozoica, que representan el 12% de la superficie total de la cuenca. Geológicamente, las Sierras de Ubierna están constituidas por depósitos continentales (Facies Weald y Utrillas) del Cretácico inferior y niveles de margas y calizas del Cretácico superior.

- Al este, la Sierra de la Demanda, constituida básicamente por materiales paleozoicos y mesozoicos, que representa el 17% de la superficie total de la cuenca. Geológicamente, presenta un núcleo paleozoico, co por materiales detríticos débilmente metamorizados, rodeados por importantes afloramientos del Mesozoico, representados fundamentalmente por depósitos carbonatados del Jurásico marino, por sedimentos continentales del Cretácico inferior y por alternancia de margas y calizas en los pisos del Cretácico superior.

- El resto de la superficie de la cuenca, el 71%, está formado por un conjunto de sedimentos terciarios de origen continental de hasta 2.500 m de potencia, dentro de los cuales se distinguen: en el borde y el fondo de la Depresión, unos depósitos de areniscas, brechas y conglomerados de matriz arcilloso-arenosa, que representan al Paleógeno y a las facies marginales o de borde de la unidad inferior del Neógeno; el relleno central de la Depresión, está formado por depósitos detríticos, que se manifiestan mediante la alternancia de niveles arcillosos y arenosos, de las facies Grijalba-Villadiego, Santa M del Campo y Tierra de Campos; existen además, en la zona central de la cuenca, depósitos margo-yesíferos, de hasta 300 m de potencia (facies Dueñas y Villatoto) que confinan a los niveles detríticos de la unidad inferior del Neógeno. La unidad media del Neógeno presenta una alternancia de niveles arcillosos, arenosos, margosos, calcáreos, en ocasiones yesíferos, que constituyen las facies Cuestas; el Neógeno culmina con un depósito calcáreo, las "Calizas de los Páramos". Sobre los sedimentos del Neógeno se superponen los depósitos continentales de las Rañas del Plioceno y la serie de terrazas aluviales asociadas a la red fluvial del Cuaternario.

La precipitación media en la zona de estudio es de 618 mm/año y la temperatura media anual de 10,9C. Las estimaciones realizadas para la ETP empleando fórmulas empíricas, arrojan cifras medias anuales de entre 730 y 750 mm. Por otra parte, utilizando distintos métodos, se ha estimado una ETR media para toda la cuenca comprendida entre 440 y 450 mm/año. Los valores probablemente más coherentes sitúan la aportación media anual en esta cuenca entre 380 y 440 hm<sup>3</sup>, de los cuales entre 85 y 100 hm<sup>3</sup>/año corresponderían a la aportación subterránea, lo que representa algo menos del 25% del total.

Hidrogeológicamente se pueden distinguir en la Cuenca del Arlanzón, los acuíferos kársticos y detríticos del Mesozoico, situados en las Sierras de Ubierna y La Demanda, los acuíferos detríticos del Terciario, los acuíferos de las Calizas de los Páramos y los acuíferos aluviales del Cuaternario. El acuífero detrítico del Terciario, se recarga por la infiltración del agua de lluvia sobre la superficie de sus afloramientos, recibiendo también una importante recarga subterránea procedente de los acuíferos kársticos del Mesozoico. La descarga se produce hacia los cursos de aguas superficiales más importantes y, en una pequeña proporción hacia el interior de la Cuenca del Duero. Se comporta como un acuífero multicapa, en ocasiones confinado por los depósitos margo-yesíferos de la Facies Dueñas, con permeabilidad horizontal variable, entre 10<sup>-5</sup> y 10<sup>-7</sup> m/s.

Los niveles de las Calizas de los Páramos, se recargan por la infiltración del agua de lluvia y descargan fundamentalmente por manantiales de borde, aunque existe una cierta recarga por

goteo de los niveles inferiores, Facies Cuestas, que descargarían mediante pequeños manantiales y zonas de rezume a favor de los depósitos calcáreos o detríticos más permeables. Los acuíferos aluviales se recargan por el agua de infiltración y descargan en los ríos y, en el caso de los niveles colgados, mediante manantiales de borde

### **METODOLOGÍA DE MUESTREO Y ANÁLISIS.**

El presente trabajo, forma parte de un estudio más amplio en el cual se ha procedido a caracterizar la hidroquímica de las diferentes formaciones hidrogeológicas de la Cuenca del Arlanzón; Para el estudio de la evolución hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en el Terciario Detrítico, se ha elegido el denominado Perfil Hidrogeoquímico II-II', que incluye 23 puntos de agua, muestreados en las condiciones más representativas posibles. Se realizó en campo la determinación de una serie de parámetros físico-químicos inestables, como el pH, la conductividad eléctrica, el pH, la temperatura, la alcalinidad, el oxígeno disuelto y el dióxido de carbono disuelto. Se determinaron una serie de datos de interés hidrogeológico (nivel acuífero drenado, profundidad de la captación, caudal, carga hidráulica, uso, columna litológica, etc...), y se tomaron muestras para la determinación de cationes y aniones en los laboratorios de Química de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos..

Los aniones cloruro, nitrato y sulfato se determinaron mediante cromatografía iónica (HPLC), empleando una columna VYDAC y un detector de conductividad MILTON ROY. Se utilizó como eluyente hidrogenoftalato 2 mM a pH 5,18. Se estudiaron los parámetros que afectan al análisis y se optimizaron las condiciones para el estudio cuantitativo de las especies aniónicas mencionadas en las aguas subterráneas de la Cuenca del Arlanzón. Para la determinación de los contenidos en fluoruro y fosfato se utilizaron técnicas colorimétricas (método SPANDS y del ácido ascórbico respectivamente). Así mismo se emplearon estos procedimientos para verificar la calidad de los resultados de los aniones cloruro, nitrato y sulfato. Los contenidos en Ca, Mg, Sr, Na, K, Li, Fe, Mn, Si, Cu, Al y Zn en las aguas subterráneas de la Cuenca del Arlanzón, se determinaron mediante Espectroscopía de Absorción Atómica, con un equipo PERKIN ELMER. Se optimizaron las condiciones de medida a las particularidades de las muestras estudiadas y los resultados obtenidos, verificaron la idoneidad de este método para la determinación de metales en aguas subterráneas.

### **MINERALOGÍA DEL TERCIARIO DETRÍTICO.**

Los sedimentos que forman los acuíferos terciarios y cuaternarios de la Cuenca del Arlanzón proceden de la erosión, y posterior sedimentación, de las rocas metamórficas del núcleo paleozoico de la Sierra de La Demanda por una parte, y, sobre todo, de la erosión y posterior sedimentación de las rocas carbonatadas y detríticas, que conforman el Mesozoico marino y continental que bordea por el norte y el este la Cuenca del Arlanzón. La composición mineralógica de estos sedimentos está condicionada por los procesos de deposición, y posterior meteorización que han sufrido estas rocas. En el caso de los sedimentos detríticos del Terciario y del Cuaternario, predominan los procesos que provocan la disolución de minerales primarios (fundamentalmente silicatos) y la formación de arcillas, oxihidróxidos de hierro, silicio, manganeso y aluminio, así como minerales asociados. En el caso de los sedimentos de carácter más evaporítico (margas, calizas y yesos), además de las reacciones en que intervienen los silicatos, juegan un papel muy destacado los procesos de disolución y precipitación de minerales carbonatados y sulfatados.

La rocas fuente de las fases minerales presentes en los acuíferos estudiados son muy variadas, estando constituidas por calizas, margas y dolomías del Jurásico y Cretácico marino, por areniscas y conglomerados silíceos del Mesozoico continental, y por conglomerados, areniscas, pizarras y esquistos, con bajo grado de metamorfismo, de edad paleozoica. Como síntesis de la información mineralógica más relevante existente en la zona de estudio, se ha elaborado la tabla 1. Así mismo, cabe hacer las siguientes consideraciones sobre la fracción arcillosa de las facies más representativas del área de estudio:

En las Facies Villatoro y Dueñas, el contenido en calcita oscila entre el 10 y el 70%, la dolomita entre el 5 y el 60%, el cuarzo entre el 3 y el 6%, el yeso entre el 2 y el 9% y los filosilicatos entre el 20 y el 60%. Entre los minerales de la arcilla predominan la illita (entre el 20 y el 90%), la caolinita (entre el 10 y el 40%), las esmectitas (entre el 5 y el 10%) y los interestratificados (entre el 5 y el 15%). En las Facies detríticas del Terciario (S M del Campo y Tierra de Campos), la calcita oscila entre el 0 y el 8%, la dolomita entre el 0 y el 6%, el cuarzo entre el 5 y el 34% y los filosilicatos entre el 60 y el 85%. Entre los minerales de la arcilla predominan la illita (entre el 65 y el 85%), la caolinita (entre el 10 y el 23%), las esmectitas (entre el 3 y el 14%) y los interestratificados (entre el 4 y el 14%). Entre los minerales primarios se aprecia la presencia de cuarzo, biotita, moscovita, feldespatos potásicos y, en menor medida, calco-sódicos; también se mencionan contenidos de clorita y apatito. En las Facies Cuestas del Terciario, los contenidos de cuarzo se encuentran entre el 3 y el 7%, la calcita entre el 10 y el 95%, la dolomita entre el 5 y el 60%, el yeso entre el 0 y el 6% y los filosilicatos entre el 5 y el 85%. De los minerales de la arcilla, los más característicos son la illita (entre el 40 y el 100% del total), las esmectitas (entre el 0 y el 56%), la caolinita (entre el 0 y el 10%) y los interestratificados (entre el 0 y el 8%). Entre los minerales primarios están presentes el cuarzo, la biotita, la moscovita, los feldespatos potásicos y, en menor medida, los calco-sódicos, la clorita y el apatito.

Facies	FILOSILICATOS				OTROS MINERALES				
	illita	caolinita	esmectitas	otros	cuarzo	yesos	feldespatos	micas	carbonatos
Facies Terciarias	***	**	*	*	*	**	*	*	***
Facies Dueñas	***	**	*	*	*	---	**	***	*
Facies Cuestas	***	*	**	*	*	*	*	*	***

\*\*\* mineral más significativo

\*\* segundo mineral más significativo

\* otros minerales significativos

*Tabla 1.- Síntesis mineralógica de la fracción arcillosa en las principales facies terciarias de la Cuenca del Arlanzón (Burgos).*

## **EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL Terciario DETRÍTICO DE LA CUENCA DEL ARLANZÓN (BURGOS).**

Para estudiar el quimismo de las aguas subterráneas en el terciario Detrítico de la Cuenca del Arlanzón (Burgos), se ha elegido el perfil hidrogeoquímico II-II', que representa la evolución

química de las aguas subterráneas en la Cuenca del Arlanzón, a lo largo del sistema de flujo que existe en las formaciones hidrogeológicas descritas en la zona de estudio.

Para el balance de masa, se ha utilizado el programa NETPATH (Plummer et al., 1994) que está diseñado para cuantificar reacciones químicas entre aguas subterráneas y minerales. Es decir, calcula la transferencia de masa de los reactivos y productos, en este tipo de reacciones. Los datos que hay que introducir en este modelo son: la composición química de dos muestras de agua, relacionadas por la misma línea de flujo, y la composición química de un conjunto de minerales, sustancias orgánicas o gases, que corresponden a los reactivos y productos del sistema, y son las únicas que participan en las reacciones químicas que determinan la composición final del agua. El modelo NETPATH, que perfecciona el programa BALANCE (Parkhurst et al., 1982), está pensado específicamente para interacciones agua-mineral pero, esencialmente, resuelve cualquier conjunto de ecuaciones lineales que pueden corresponder a balance de masa sobre elementos, reacciones de oxidación-reducción, balance isotópico simple, mezcla de aguas, evaporación y dilución de aguas.

El estudio de la evolución del quimismo de las aguas, a lo largo del flujo a través de los medios geológicos, es útil para conocer los procesos geoquímicos de interacción agua-roca que tienen lugar en el acuífero. Es habitual realizar perfiles hidrogeoquímicos, que suponen un corte vertical en la formación a estudiar, perpendicular a las equipotenciales, incorporando la información hidroquímica -gráfica o numérica- de mayor interés. En la zona estudiada, existen numerosos acuíferos, muchos de los cuales no manifiestan conexión hidráulica significativa, con lo cual es habitual que coexistan en la vertical varios niveles piezométricos diferenciados. Por ello se ha optado por definir el perfil hidrogeoquímico II-II' que, incluyendo todas las formaciones acuíferas de interés, permite optimizar la aplicación del modelo de balance y transferencia de masa NETPATH. Mediante la aplicación de este programa, se han estudiado las reacciones geoquímicas más probables y se ha cuantificado la transferencia de masa a través del citado perfil hidrogeoquímico II-II' para las muestras del Terciario detrítico, del Terciario de las Cuestas y del aluvial cuaternario de la llanura de inundación; en total se trata de 23 muestras de agua, distribuidas a lo largo de los casi 50 kilómetros de longitud del perfil II-II'. Tal y como puede observarse en la figura que acompaña este trabajo, el perfil II-II' incorpora la siguiente información: situación de los puntos de agua, contactos geológicos más relevantes, líneas de flujo hidrogeológico más probables, profundidad de los pozos, niveles, diagramas de Stiff modificados, valores del pH, conductividad y contenido en sílice.

El perfil II-II' se sitúa, dentro del área de estudio, en la zona sur de la Cuenca del Arlanzón, y siguiendo una dirección NO-E. Este perfil, que incluye 23 puntos de agua, posee una longitud algo superior a 40 km e incluye dos zonas claramente diferenciadas, separadas aproximadamente por el río Arlanzón. En la zona occidental, se desarrolla una sucesión que de techo a muro presenta, los niveles de las Calizas de los Páramos, las Cuestas terciarias, los niveles detríticos del Terciario (en su Facies Tierra de Campos) y el Terciario salino de la Facies Dueñas. La zona oriental del perfil, está constituida por un potente conjunto de sedimentos del Terciario detrítico (Facies Santa M<sup>a</sup> del Campo al este y Tierra de Campos al oeste), que, en algunos lugares, presenta recubrimientos poco potentes de las Rañas del Plioceno y de niveles colgados del Cuaternario. Entre ambos dominios se sitúan los depósitos de terraza asociados al río Arlanzón, superponiéndose, aproximadamente, a la zona del cambio lateral de facies dentro del Terciario, entre los niveles detríticos y margoyesíferos.

Al E. del perfil, se aprecia la evolución de las aguas a lo largo de su recorrido a través del Terciario detrítico. Todas las aguas, como corresponde a una litología fundamentalmente silicatada, se caracterizan por una baja mineralización. Los flujos más largos, muestran que las aguas de recarga (procedentes de la infiltración de la lluvia y del Mesozoico carbonatado) tienen un pH ligeramente básico y una facies hidroquímica hidrogenocarbonatado cálcica.

El agua al recorrer el acuífero, incrementa su contenido en magnesio, fruto de la hidrólisis de silicatos magnesianos y la disolución de dolomita, al tiempo que se produce una disminución de la concentración de calcio, por precipitación de calcita e intercambio catiónico; aumenta por tanto el contenido en sodio y el pH se vuelve más alcalino. En las zonas más distales el flujo, las aguas son hidrogenocarbonatado sódicas, con pH claramente básicos. La zona de descarga de estas aguas se sitúa en la transición de las facies detríticas del Terciario a las facies margoyesíferas, por lo cual las últimas muestras de evolución de las aguas subterráneas en el Terciario detrítico presentan un incremento de la mineralización y una facies hidroquímica sulfatado cálcica. El contenido de cloruro en estas aguas es muy bajo, detectándose las concentraciones más elevadas en zonas de recarga y manantiales que drenan flujos muy cortos, lo cual parece evidenciar un origen antrópico a este anión halógeno.

En la zona occidental del perfil II-II', se sitúan siete puntos de agua que drenan niveles permeables en la Facies Cuesta. Los manantiales situados a cota más elevada presentan mineralizaciones medias y bajas, con facies hidroquímicas hidrogenocarbonatado calcomagnésicas. Las captaciones que extraen aguas subterráneas de la base de la formación, muestran un quimismo sulfatado cálcico, con mineralizaciones elevadas, fruto de la influencia de los niveles yesíferos y de la existencia de flujos más prolongados en la formación.

Cuatro pozos excavados del perfil II-II' están situados en el aluvial cuaternario del Arlanzón; su química es complicada, fruto de la descarga del Terciario subyacente, la infiltración del agua de lluvia y los retornos de riegos, del flujo hidrogeológico en el aluvial y de la contaminación antrópica. Predomina la influencia de los procesos de disolución de yesos, que parcialmente ocultan el quimismo hidrogenocarbonatado cálcico de las aguas de infiltración.

### **APROXIMACIÓN AL CONOCIMIENTO DE LOS BALANCES DE TRANSFERENCIA DE MASA EN EL TERCIARIO DETRÍTICO.**

Se han modelizado reacciones a lo largo del tubo de flujo que se corresponde con la zona oriental del perfil II-II' y comprende las muestras 140, 28, 32, 138 y 139. Los puntos elegidos se consideran suficientemente representativos, como para establecer los procesos geoquímicos más importantes que se producen en estos medios. De hecho, se observa que la composición de las aguas subterráneas, a lo largo de este perfil hidroquímico, se corresponde con lo ocurrido en otros perfiles existentes en la Cuenca del Arlanzón (Marcos Naveira, L.A., 1997). En concreto, se han modelizado las reacciones geoquímicas, que tienen lugar en el acuífero Terciario detrítico, cuando el agua se mueve por un tubo de flujo, que se corresponde con la zona oriental del perfil II-II' y comprende las muestras 140, 28, 32, 138 y 139.

Se han modelizado las evoluciones de 11 elementos (carbono, azufre, calcio, aluminio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, silicio, flúor y estroncio). A lo largo del perfil, se observa un paulatino incremento en las concentraciones en fluoruro y estroncio. Los elevados contenidos en Na,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  de la muestra 140, son probablemente atribuibles a un aporte antropogénico (esta muestra presenta también 34 mg/l de nitratos). A lo largo de la evolución

del agua subterránea, se aprecia que de una facies hidroquímica hidrogenocarbonatado cálcica, se pasa a otra hidrogenocarbonatado calco-magnésica, que posteriormente evoluciona a hidrogenocarbonatada sódica, culminando en una facies hidroquímica sulfatado cálcica.

Respecto a los procesos geoquímicos entre las muestras 140 y 28, para explicar la evolución de la muestra de recarga 140 a la muestra 28, cabe decir en primer lugar que la “precipitación” de yeso y halita que muestran todos los modelos, es una condición obligada para justificar la “disminución” de sulfato y cloruro (simplemente, sus concentraciones en la recarga son anormalmente elevadas, debido a una eventual contaminación antrópica). Así mismo, todos los modelos coinciden en evidenciar que, entre estos dos puntos se produce una importante precipitación de calcita (entre 0,39 y 1,08 mmol/l), que en algunos modelos también puede ser, parcialmente, de dolomita, así como un aporte de sodio por intercambio catiónico por calcio (entre 0,005 y 0,240 mmol/l). El incremento en magnesio procede de la alteración de la biotita, presente en todos los modelos (entre 0,12 y 0,47 mmol/l).

Otros silicatos primarios que son susceptibles de alteración, aunque no están presentes en todos los modelos, son la moscovita (entre 0,00 y 0,42 mmol/l), y la plagioclasa (entre 0,00 y 0,44 mmol/l). Entre los silicatos de neoformación mineral están: la illita (entre 0,00 y 0,90 mmol/l), caolinita (entre 0,00 y 0,15 mmol/l), la montmorillonita sódica (entre 0,00 y 0,44 mmol/l), la montmorillonita Mg-Ca-K-Fe (entre 0,00 y 0,49 mmol/l) y la sílice (entre 0,00 y 0,78 mmol/l). En resumen, los procesos que transforman el agua de recarga de la muestra 140, hidrogenocarbonatado cálcica, en un agua con menos hidrogenocarbonatos y calco-magnésica, correspondiente a la muestra 28, son:

- la precipitación de carbonatos.
- intercambio catiónico  $2\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ .
- la hidrólisis de micas magnésicas, y en menor medida, feldespatos y mica potásica.
- formación de illita, caolinita y esmectitas.
- la generación de sílice.

Una objeción a los modelos presentados para esta reacción, puede encontrarse en que los procesos anteriores implicarían generación de  $\text{CO}_2$ , proceso no compatible con la disminución de dióxido de carbono entre ambas muestras, y con el incremento del pH. Una solución consistiría en compatibilizar la precipitación de calcita, con la disolución de dolomita.

En cuanto a los procesos geoquímicos que se dan entre las muestras 28 y 32, cabe decir que la disminución en el contenido en carbono entre ambos puntos, se explica en todos los modelos por la precipitación de calcita (entre 0,98 y 1,23 mmol/l), que también justifica la reducción en la concentración de calcio, y produce cantidades importantes de  $\text{CO}_2$  (entre 1,52 y 1,79 mmol/l). Una pequeña disolución de yeso (0,03 mmol/l), explica el ligero incremento en el contenido en sulfatos; por su parte, las concentraciones de sodio y cloruro, que apenas varían entre ambas muestras, se ajustan incluyendo pequeñas cantidades de halita y montmorillonita sódica. Existe un apreciable incremento en el contenido en magnesio, que los modelos de reacción explican mediante la disolución de dolomita (entre 0,00 y 0,25 mmol/l) y la alteración de la biotita (entre 0,00 y 0,19 mmol/l). Todos los modelos incluyen la hidrólisis de silicatos primarios, como la moscovita (entre 0,00 y 0,82 mmol/l), la ortosa (entre 0,00 y 0,41 mmol/l) y la plagioclasa (en un modelo interviene aportando 0,09 mmol/l). La génesis de minerales de la arcilla, es otra consecuencia de los modelos que describen los procesos geoquímicos que se producen entre estas aguas; así, se generan entre 0,00 y 0,16 mmol/l de illita, y 0,18 mmol/l de montmorillonita sódica. Además, se producen en cuatro de los modelos descritos, ciertos contenidos de sílice, comprendidos entre 0,14 y 0,65 mmol/l. En

resumen, los procesos que transforman el agua de la muestra 28, hidrogenocarbonatado cálcico-magnésica, a lo largo de su flujo subterráneo en el perfil II-II' dentro del acuífero del Terciario detrítico, son:

- la precipitación de calcita y la disolución de dolomita.
- la generación de sílice.
- la hidrólisis de micas y feldspatos.
- formación de illita y esmectitas.

Respecto a los procesos geoquímicos entre las muestras 32 y 138, comenzaremos diciendo que el agua correspondiente a la muestra 32, se caracteriza por tener una facies química hidrogenocarbonatado calco-magnésica, que se transforma, en un agua hidrogenocarbonatado sódica, correspondiente a la muestra 138. La pequeña reducción del contenido en carbono, se justifica con una ligera precipitación de calcita (entre 0,00 y 0,06 mmol/l), o de dolomita (entre 0,00 y 0,03 mmol/l) en todos los modelos.

La disminución en las concentraciones de calcio y magnesio, así como el aumento de las de sodio, se explican en todos los modelos por fenómenos de cambio iónico (entre 0,28 y 0,32 mmol/l de intercambio Ca/2Na, y entre 0,25 y 0,35 mmol/l para el intercambio Mg/2Na). Los cinco modelos incluyen a su vez una disolución limitada de yeso (0,02 mmol/l) y halita (0,01 mmol/l) para justificar los pequeños incrementos en la concentración de sulfato y cloruro. Los silicatos primarios continúan sufriendo una paulatina hidrólisis; así ocurre para la biotita (entre 0,00 y 0,06 mmol/l), la mica potásica (entre 0,00 y 0,25 mmol/l), y el feldespato calco-sódico (entre 0,16 y 0,42 mmol/l). Entre los productos silíceos de neoformación mineral, está la sílice (entre 0,00 y 0,40 mmol/l), la illita (entre 0,00 y 0,52 mmol/l), las esmectitas (entre 0,00 y 0,27 mmol/l) y la caolinita (entre 0,00 y 0,15 mmol/l). Puede sintetizarse esta información, diciendo que, los procesos que transforman el agua de la muestra 32, hidrogenocarbonatado calco-magnésica, en un agua hidrogenocarbonatado sódica, correspondiente a la muestra 138, son:

- la precipitación de carbonatos.
- el intercambio iónico  $2\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  y  $2\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ .
- la hidrólisis de micas y feldspatos.
- la generación de sílice.
- la formación de illita, caolinita y esmectitas.

Finalmente, los procesos geoquímicos entre las muestras 138 y 139, muestran el último estadio considerado, con la muestra 139, ya ubicada en la zona de descarga de esta formación hidrogeológica, en la confluencia del río Cogollos con el Arlanzón. El importante crecimiento de los contenidos en azufre y calcio, son debidos a la disolución de yesos (1,84 mmol/l), presentes ya, en la transición de las facies detríticas del Terciario a las facies margo-yesíferas. La concentración de cloruro, permanece prácticamente constante (aunque su ligera disminución exige que todos los modelos "precipiten" 0,006 mmol/l de halita). Hay que destacar que los contenidos en sodio se reducen ligeramente, lo cual sólo parece atribuible a la neoformación de minerales de la arcilla que contengan este metal alcalino (1,69 mmol/l de montmorillonita sódica). Casi se duplica la concentración de magnesio entre ambos puntos de agua; descartando en los cinco modelos la disolución de sulfato de magnesio, se explicaría el incremento en este catión alcalino-térreo por la hidrólisis de biotita (entre 0,00 y 0,62 mmol/l) o por la disolución de dolomita (entre 0,00 y 0,54 mmol/l). Los modelos que no incluyen a la dolomita como fase reactiva, imponen la presencia de  $\text{CO}_2$  (entre 0,44 y 0,62 mmol/l) como fuente de carbono que justifique el incremento en la concentración de hidrogenocarbonato.



Las últimas reacciones, implican la hidrólisis de silicatos primarios -previamente se citó a la biotita-, como la moscovita (entre 0,00 y 1,58 mmol/l) y el feldespato potásico (entre 1,02 y 6,73 mmol/l), para permitir la formación de sílice (entre 0,00 y 9,48 mmol/l) y esmectitas no sódicas (entre 0,00 y 1,72 mmol/l), además de la montmorillonita sódica ya mencionada. Resumiendo, puede decirse que, los procesos que transforman el agua de la muestra 138, hidrogenocarbonatado sódica, en la muestra 138, son:

- la disolución de yesos.
- la hidrólisis de micas y feldespatos.
- la formación de esmectitas.
- la generación de sílice.

## **CONCLUSIONES.**

Se evidencia que las aguas subterráneas de infiltración en el terciario detrítico, con baja mineralización y facies hidroquímica hidrogenocarbonatado cálcica, evolucionan mediante la precipitación de calcita, la disolución de dolomita, la hidrólisis de micas y feldespatos y la formación de illita, caolinita, esmectitas y sílice, a facies hidrogenocarbonatado calco-magnésicas de baja mineralización. Estas aguas, mediante la precipitación de carbonatos, cambio catiónico, alteración de silicatos primarios y neoformación de filosilicatos, acaban generando aguas hidrogenocarbonatado sódicas de baja mineralización. Cerca de la descarga, estas aguas entran en contacto con las facies de transición terciarias detrítico/margo-yesíferas, produciéndose una importante mineralización de las aguas por disolución de yesos; prosigue la alteración de los silicatos primarios, pero los minerales de neoformación mineral tienden a ser los términos sódicos y cálcicos del grupo de las esmectitas.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- Coletto Fiaño, I. (1994). "Modelización de la evolución química de las aguas subterráneas en las Facies de Transición de la Cuenca de Madrid". Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Corrochano, A.; B. Fernández, C. Recio, J.A. Blanco e I. Valladares. (1986). "Modelo sedimentario de los lagos Neógenos de la Cuenca del Duero". *Studia Geologica Salmanticensia*. Salamanca. Vol XXII; pág. 93-110.
- Freeze, R.A.; Cherry, J.A. (1979). "Groundwater". Ed. Prentice-Hall, Inc, pág. 604.
- Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). 1998. *Atlas del Medio Hídrico de la provincia de Burgos*. Madrid. 150 pág.
- Marcos Naveira, L. A. 1997. Tesis Doctoral. *Procesos geoquímicas en las aguas subterráneas de los acuíferos Terciarios y Cuaternarios de la Cuenca del río Arlanzón (Burgos)*. Universidad de Burgos.
- Molina Pérez, M.A. 1989. *Procesos Geoquímicos de interacción roca-agua relacionados con el flujo subterráneo en las arcosas del acuífero de Madrid*. Fac. CC. Geológicas. Universidad Complutense Madrid.
- Ordóñez, S. y M A. García del Cura. (1976). "Estudio de las facies detríticas del Terciario Continental del sector oriental de la Cuenca del Duero". *Estudios Geológicos*. Madrid. Vol. 32 (2); pág. 179-188.
- Parkhurst, D.L.; L.N. Plummer y D.C. Thorstenson. (1982). "BALANCE. A computer program for calculating mass transfer for geochemical reactions in ground water". U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 82-14; pág. 29.
- Plummer, L.N.; E.C. Prestemon y D.L. Parkhurst. (1994). "An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path. Version 2.0". U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 94-4169. Reston. Virginia; pág. 130.
- Sánchez Benavides, F.J.; G. Alonso Gavilán, C.J. Dabrio y M.G. Díez Rodríguez. (1992). "Sedimentación de edad Mioceno superior en el borde nor-oriental de la Depresión del Duero (provincia de Burgos, España)". III Congreso Geológico de España. Salamanca 1992. Actas tomo 1; pág. 207-211.
- Tóth, József. (1984). "The role of regional gravity flow in the chemical and thermal evolution of ground water". First Canadian/American Conference on Hydrogeology. Bauff, Canada. June, 1984. Proceedings; pág. 3-39.

