

EVIDENCIA DE EVAPORACIÓN EN LA ZONA NO SATURADA EN LOS PROCESOS DE RECARGA EN LA DEPRESIÓN DE LA SELVA (NE ESPAÑA).

Anna Menció¹, Albert Folch², Josep Mas-Pla¹ y Albert Soler³

1: Centre de Geologia i Cartografia Ambientals (GEOCAMB), y Àrea de Geodinàmica,
Departament de Ciències Ambientals,
Universitat de Girona, Campus de Montilivi, 17071, Girona
e-mail: anna.mencio@udg.edu, josep.mas@udg.edu

2: Departament de Geologia, Facultat de Ciències,
Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona.
e-mail: albert.folch@uab.cat

3: Grup de Mineralogia Aplicada i Medi Ambient.
Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Fac. de Geologia,
Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franques s/n, 08028 Barcelona.
e-mail: albertsolergil@ub.edu

Palabras clave: Recarga, zona no saturada, isótopos estables, depresión de la Selva.

RESUMEN. *Las cuencas intramontañosas de origen tectónico presentan un complejo hidrogeológico en el que se dan sistemas de flujo a distintas escalas, los cuales determinan la disponibilidad de recursos frente a su explotación. En este estudio, se describe el sistema hidrogeológico de la depresión de la Selva (NE España), con un especial énfasis en la caracterización de los sistemas de flujo locales; es decir, aquellos que se generan en la zona de la depresión. El uso de los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ - δD) permite identificar procesos de evaporación en la zona no saturada como carácter propio de la recarga local. Esto permite, a su vez, identificar procesos de mezcla entre flujos de escala local y escala regional con una marcada variabilidad estacional.*

ABSTRACT. *Range-and-basin areas usually present a complex hydrogeological systems with distinct flow paths at different scale. In this work, we describe the hydrogeology of the Selva tectonic basin (NE Spain) with especial interest on the characterization of the local scale flow paths; that is, those generated in the lower basin area. Environmental stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ - δD) identify the occurrence of evaporation processes in the vadose zone that stands as an indicator of the local recharge. This also allows defining seasonally mixing processes between regional and local flow paths.*

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas intramontañosas, como la depresión de la Selva (NE España; Figura 1), generalmente presentan una hidrodinámica subterránea compleja, caracterizada por la existencia e interacción entre flujos locales y regionales (Tóth, 1963). La recarga viene determinada por ambos sistemas de flujo, los cuales pueden ser modificados por un régimen intenso de extracciones (Folch et al., 2009). Por una parte, los sistemas regionales, a gran escala, profundos y asociados a la dinámica de los macizos circundantes a la cuenca, son responsables de aportaciones significativas en las que destaca la participación del flujo a través de zonas de falla. Por otra, los sistemas locales, resultantes de las precipitaciones en la depresión de interior de la cuenca, también contribuyen en la recarga. Dado que la explotación de los recursos aprovecha las aportaciones de ambos sistemas, es conveniente el conocimiento de la dinámica de cada uno de los sistemas de flujo para determinar el balance

hídrico. En este estudio se valora la participación de ambos sistemas de flujo, especialmente de los sistemas locales, en los recursos de agua subterránea de la depresión de la Selva mediante el uso de datos hidroquímicos, como elemento identitario de cada sistema, y datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, δD), como variable representativa de los procesos de recarga.

En particular, las concentraciones entre los isótopos estables de la molécula de agua de la precipitación pueden modificarse con posterioridad a la infiltración, permitiendo reconocer procesos hidrológicos que tienen lugar durante la infiltración. La fraccionación isotópica relacionada con la evaporación del agua en los poros del subsuelo revela información sobre la recarga. En este sentido, Barnes y Allison (1983) y Allison et al. (1984) proponen un modelo teórico para relacionar el enriquecimiento isotópico en función del ritmo de infiltración y la tasa de evaporación, relacionando los procesos de fraccionación isotópica observados en los datos de $\delta^{18}\text{O}$ - δD con la dinámica en la zona no saturada. Nativ y Nissim (1992), Gaye y Edmunds (1996), DePaolo et al., (2004) y Singleton et al. (2004) aplican los datos isotópicos obtenidos en muestreos de la zona vadosa en la evaluación de la recarga en distintos estudios regionales.

El objetivo de esta contribución es caracterizar el funcionamiento de los sistemas de flujo locales en el conjunto de la recarga de un sistema complejo –la depresión intramontañosa de la Selva– sometido a una explotación de los recursos hídricos que modifica estacionalmente los sistemas de flujo naturales. A través de los datos hidroquímicos e isotópicos del período 2003-2006 se identifica la influencia que ejerce la zona no saturada en la recarga local del sistema, y se discute sobre su relevancia en la evaluación de los recursos hídricos.

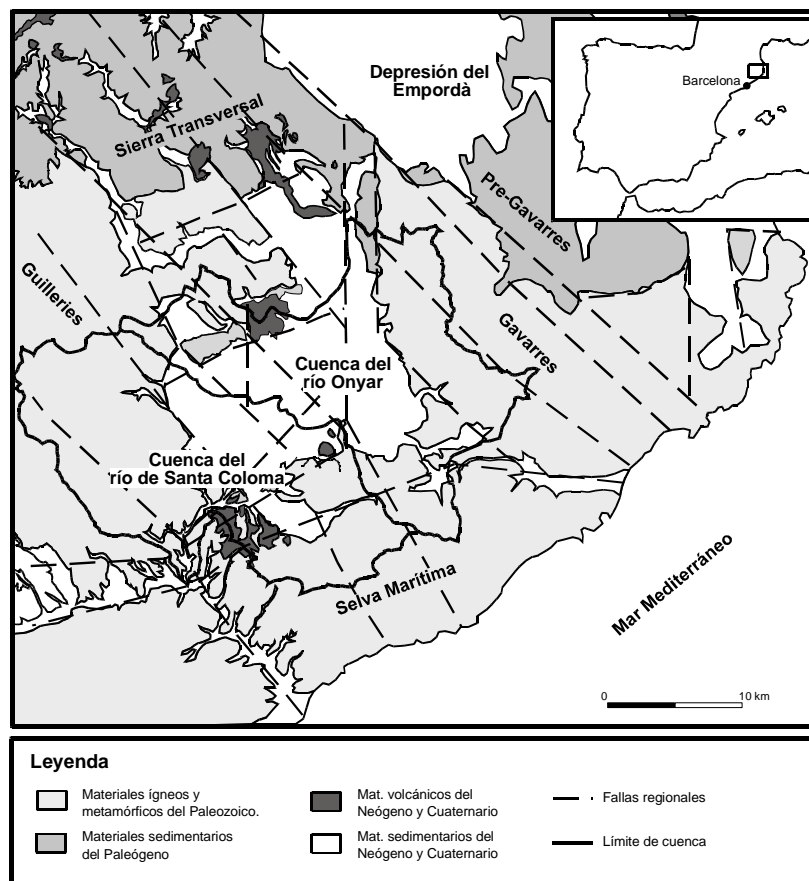


Figura 1. Situación y contexto geológico de la depresión de la Selva, formada por las cuencas hidrográficas de los ríos Onyar y Santa Coloma (modificado de Pallí et al., 1983, y ICC, 1989).

2. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

La depresión de la Selva es un graben tectónico limitado por los macizos de las Guilleries (1.202 m), las Gavarres (535 m) y la Sierra Transversal (998 m). Las principales fracturas se alinean en dirección NO-SE, si bien otras fallas ortogonales y de dirección N-S complementan la estructura tectónica. La depresión se originó durante el Neógeno y se halla rellena por materiales sedimentarios no consolidados procedentes de la erosión de los relieves próximos (Figura 1).

Los macizos circundantes están formados por materiales ígneos y metamórficos (Guilleries y Gavarres) y por materiales de tipo detrítico y carbonatado (Sierra Transversal). El zócalo de la depresión está formado por materiales graníticos. El relleno sedimentario neógeno de la depresión de la Selva presenta un espesor próximo a los 300 m. Éste se halla constituido por niveles estratificados de arenas y limos. Los niveles arenosos tienen potencias de varios metros, dando lugar a un acuífero multicapa con un comportamiento semiconfinado en profundidad, debido a las intercalaciones de limos, y libre en superficie.

La depresión de la Selva abarca parcialmente dos cuencas hidrográficas: la Riera de Santa Coloma y el Río Onyar. La red de drenaje de estos ríos interacciona con las aguas subterráneas de los depósitos aluviales cuaternarios. La explotación de los recursos se cifra en 27.11 hm³ anuales destinada a satisfacer la demanda urbana (4.29 hm³), agrícola y ganadera (16.01 hm³) e industrial (6.81 hm³) mediante la explotación de las aguas subterráneas (Menció et al., 2009).

Las principales unidades hidrogeológicas relacionadas con los flujos locales se hallan en los acuíferos libres formados por las zonas aluviales y los niveles superiores de la serie neogena; así como el conjunto sedimentario neógeno que, a modo de acuífero multicapas con niveles semiconfinantes de limos y arcillas, alcanza espesores entre 20 y 300 m (MOPU, 1985; Pous et al., 1990; Vehí, 2000). Estos niveles más profundos sobreyacen el zócalo de la depresión formado por rocas ígneas. Tanto los relieves circundantes como el propio zócalo albergan los sistemas de flujo regionales que, de forma natural a través de la red de fracturas existentes, alimentan a los depósitos neógenos superiores (Menció, 2006; Folch et al., 2009).

Las mayores variaciones de nivel hidráulico en los pozos de la depresión, tanto en los acuíferos más superficiales como en los niveles sedimentarios profundos, ocurren durante los meses de verano a causa de la ausencia de recarga y de las intensas extracciones, básicamente destinadas a irrigación, suponiendo una pérdida de almacenamiento en el acuífero. Este comportamiento varía entre los distintos tipos de pozos. De este modo, y en términos generales, los acuíferos más superficiales llegan a sufrir descensos notables, que en algunos casos alcanzan diversos metros, aumentando estacionalmente el espesor de la zona no saturada a causa de las extracciones. La recuperación del nivel freático dependerá pues del régimen de precipitaciones locales en la depresión. Un ejemplo de la evolución piezométrica en pozos próximos entre ellos, ubicados en la zona central de la depresión a distintas profundidades de sondeo, se muestra en la Figura 2.

Los pozos más profundos suelen presentar importantes descensos (hasta 25-30 m) asociados a regímenes intensos de explotación, a pesar de la elevada conductividad hidráulica atribuible a los niveles arenosos del Neógeno (Figura 2). Ello sugiere un limitado factor de almacenamiento, que se compensa por un flujo inducido por la contribución procedente de los relieves circundantes o del mismo zócalo de la depresión en forma de sistemas regionales que compensa la magnitud del bombeo. Estos pozos muestran mayoritariamente una buena recuperación del nivel hidráulico con posterioridad a los períodos lluviosos.

3. RESULTADOS.

3.1. Datos hidroquímicos.

Las muestras de cada una de las cuencas hidrográficas superficiales muestran una facies hidroquímica similar (Figura 3). Así, las situadas en la cuenca de la riera de Santa Coloma presentan una menor mineralización que las que se encuentran en la zona del río Onyar. Esta menor concentración de solutos es especialmente evidente en las proximidades del macizo de las Guilleries, donde se refleja la naturaleza granítica del substrato, en contraposición a otros pozos de la Selva, especialmente los asociados a zonas de fractura, que denotan la

influencia de las rocas sedimentarias de la sierra Transversal y del relleno sedimentario neógeno de la depresión.

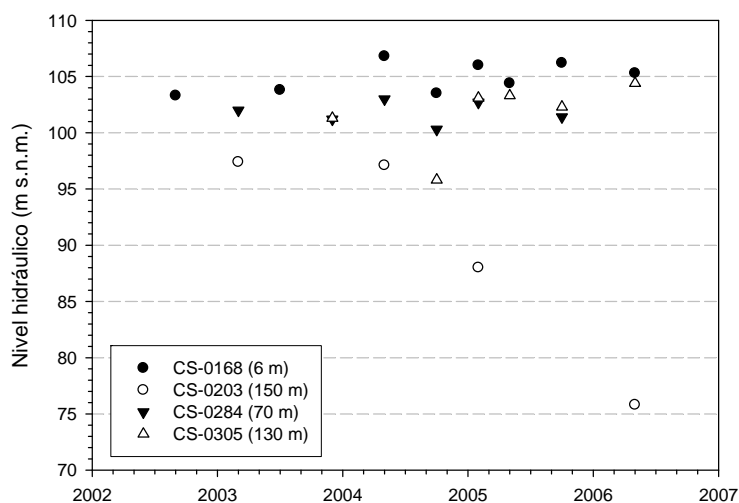


Figura 2. Evolución piezométrica en distintas captaciones de la zona central (Cassà de la Selva) de la depresión de la Selva. La profundidad de cada sondeo se indica al lado del código.

Determinados pozos profundos en la cuenca del río Onyar, ubicados en los niveles basales del relleno de la depresión e incluso en el basamento de la misma, presentan concentraciones elevadas de sodio (CS0105, CS0203, FS0066, LG0246, y SG0200); y, a la vez, elevadas concentraciones de flúor (mayores de 2 mg/L; excepto SG0200). Ambas características se atribuyen al tránsito de las líneas de flujo por el zócalo granítico, con un elevado tiempo de residencia (algunas muestras con menos de 2 UT) aportando una recarga ascendente hacia los depósitos sedimentarios de la depresión. Este tipo de facies hidroquímica bicarbonatada-sódica también aparece en la cuenca del río de Santa Coloma, concretamente en dos manantiales (SCFP, agua carbónica y termal) y en dos pozos profundos (RD0201, RD0202).

Otro rasgo característico es la presencia de nitrato, abundante en la mayoría de pozos superficiales en los materiales aluviales y en los niveles neógenos superiores, así como en determinados pozos profundos en los materiales del relleno sedimentario de la depresión (BR0110, CL0259, CS02754, CS0284, CS0304, LL0115, RS0263, RS0266, RS0268, RS0271, RS0272b, SA0167 y VO0105). Las concentraciones de nitrato son representativas de una recarga desde la superficie por la lixiviación y la infiltración de los fertilizantes (básicamente purines) vertidos en los campos. Su presencia verifica dos aspectos relevantes en la dinámica hidrogeológica de esta depresión. Por una parte, la contribución de los sistemas locales a la recarga de los niveles sedimentarios más profundos. Por otra, la alteración que los regímenes de bombeo causan en la dinámica natural de este sistema hidrogeológico, creando importantes descensos regionales y favoreciendo la percolación de aguas de recarga local.

3.2. Datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, δD).

El contenido isotópico de las aguas subterráneas se determinó en tres campañas durante 2003, y una campaña adicional en 2006, con un mayor número de datos. Los muestreos de 2003 se realizaron con posterioridad a un período de elevada precipitación, con un total acumulado de 1.101 mm de abril 2002 a abril 2003, y con un otoño significativamente lluvioso en octubre 2003. Las precipitaciones anteriores a mayo de 2006

correspondieron a un año medio con una acumulación de 380 mm en otoño-invierno (octubre a enero), pero solamente de 70 mm durante la primavera de 2006 (febrero-mayo).

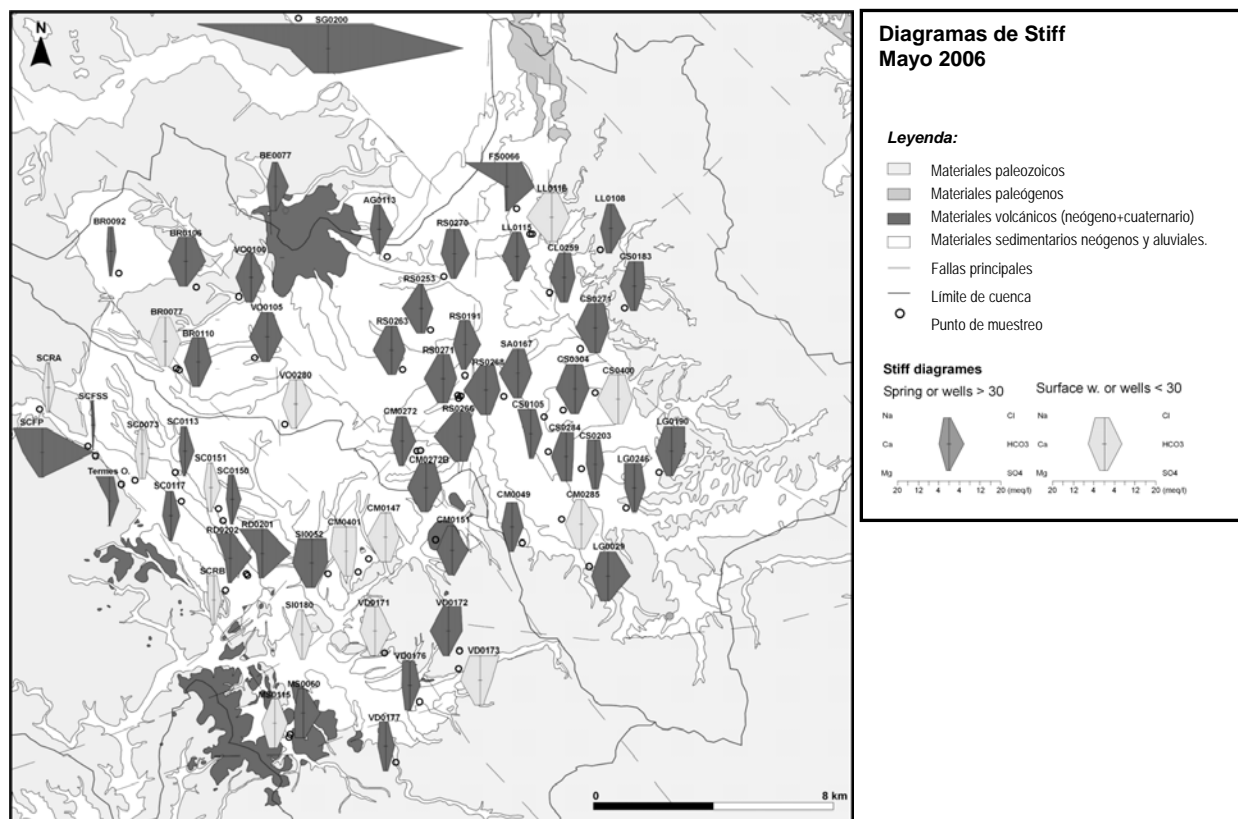


Figura 3. Diagramas de Stiff de las aguas subterráneas en la depresión de la Selva, correspondientes al muestreo de mayo de 2006.

La relación isotópica $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$ en las campañas de 2003 muestra una distribución según dos líneas meteóricas locales. La primera de ellas (MWL-M) corresponde a la estimada para las zonas del Montseny-Guilleries, expresada por $\delta\text{D} = 9.8 + 7.9 \delta^{18}\text{O}$, por Neal et al. (1992). Los datos de septiembre y diciembre 2003 se distribuyen según esta relación. No obstante, los datos de mayo 2003 aparecen desplazados a la derecha, alineándose con una segunda recta meteórica local obtenida con los datos de la estación “Gerona Aeropuerto”, (IAEA/WMO, 2006; periodo 2000-2001), situada en las cotas más bajas de la depresión de la Selva (125 m s.n.m.). Ésta viene expresada por $\delta\text{D} = 6.95 + 8.13 \delta^{18}\text{O}$, con una pendiente similar a la recta anterior y un cierto déficit en deuterio atribuible a las características meteorológicas del interior de la depresión (MWL-D; Figura 4). Los valores isotópicos medios de las muestras de precipitación son $\delta^{18}\text{O} = -5.22 \pm 0.33\text{‰}$, $\delta\text{D} = -36.02 \pm 2.87\text{‰}$. En la Figura 4 se distinguen los distintos puntos de muestreo según la profundidad del pozo, entre superficiales y profundos ($< \text{ó} > 30$ m); según la unidad geológica diferenciando, entre rocas cristalinas (ígneas o metamórficas, o zonas de falla) y materiales sedimentarios (relleno neógeno de la depresión y depósitos aluviales cuaternarios); y según la concentración de nitrato ($< \text{ó} > 50$ mg/L).

En los datos de septiembre y diciembre 2003 se observa una dotación isotópica coherente con la ubicación de cada captación. Los pozos situados en zonas de falla, relacionados con los flujos procedentes de los relieves circundantes, en el zócalo de la depresión y en los niveles neógenos profundos presentan valores isotópicos más

ligeros; con una variabilidad atribuible a los procesos de mezcla inherentes a las captaciones de suministro. Estos valores denotan zonas de recarga a mayor altitud y se imputan a los macizos limítrofes a la depresión (Guilleries y sierra Transversal). Asimismo, los datos correspondientes a mayo 2003, en concreto tres pozos en niveles sedimentarios profundos (>30 m profundidad) y uno de superficial, apuntan a un desplazamiento hacia valores empobrecidos en deuterio según una trayectoria de evaporación, la cual se analizará posteriormente.

Los resultados de mayo 2006 muestran una situación en la que los pozos profundos presentan valores isotópicos pesados similares a los ya observados en muestreos anteriores. No obstante, las muestras más profundas asociadas a las zonas de falla o al zócalo de la depresión presentan un cierto enriquecimiento isotópico que sugiere una disminución de los flujos regionales más profundos en beneficio de una componente de recarga de menor altitud. Además, los datos de mayo 2006 muestran una línea de evaporación mejor definida y con una pendiente similar a la de mayo de 2003 que afecta tanto a muestras procedentes de materiales graníticos, como de niveles neógenos profundos y de pozos superficiales, denotando un aumento de recarga procedente de la superficie de la depresión. Dado el grueso de la zona no saturada en los materiales neógenos y también graníticos, que puede alcanzar 25 m, el enriquecimiento isotópico por evaporación tiene lugar durante la infiltración (Mook, 2000), siendo más efectivo en períodos con menor intensidad de recarga.

Los datos isotópicos obtenidos en el estudio regional de la depresión de la Selva no son suficientes para estimar los ritmos de infiltración y evaporación; aunque aportan información sobre los procesos de recarga en un sistema complejo afectado por una intensa explotación de sus recursos. De este modo, los datos hidroquímicos e isotópicos definen para la depresión de la Selva un esquema con una mezcla de flujos profundos y superficiales y, asimismo, con una señalada variabilidad estacional relacionada con los períodos de máximo bombeo. Durante otoño e invierno (especialmente en septiembre de 2003), domina la contribución del flujo profundo, originado en los relieves circundantes, a causa de la reducción de los recursos almacenados en los materiales neógenos asociada al bombeo durante las estaciones precedentes. Las muestras de diciembre 2003 presentan un acercamiento a la MWL-D, atribuible a la influencia de la recarga local en la depresión. Sin embargo, las muestras de primavera (mayo 2003, 2006) denotan una mayor contribución de la infiltración local con indicios de evaporación. En los gráficos correspondientes a los meses de mayo 2003 y 2006 (Figura 4), los valores de $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$ se distribuyen según la MWL-D denotando la influencia de los flujos locales, tanto en aquellos pozos donde éstos son dominantes como en aquellos que presentan una mezcla con flujos más profundos.

Es particularmente interesante la evidencia de evaporación que ofrecen algunos datos isotópicos, indicando la existencia de una recarga local efectiva del sistema por la precipitación incidente en el fondo de la depresión. Las líneas de evaporación se inician en la LMWL, en las proximidades de las coordenadas correspondientes a los valores isotópicos medios de la precipitación local ($\delta^{18}\text{O} = -5.22\text{‰}$, $\delta\text{D} = -36.02\text{‰}$), con una pendiente aproximada de 4.3. Esta recarga, que presenta fraccionamiento isotópico durante su tránsito en la zona no saturada, aparece tanto en las extracciones de pozos superficiales como profundos; mostrando la contribución de este sistema de flujo local en la recuperación de los recursos en los períodos de menor bombeo (octubre-abril). Sin embargo, la dotación isotópica de estos recursos locales definida por la evidencia de evaporación no aparece en los muestreos de septiembre y diciembre. Ello se atribuye a la participación dominante de los sistemas regionales en la recarga inducidos por los elevados regímenes de bombeo.

La inexistencia de cuerpos de aguas superficiales (cauces permanentes, zonas húmedas, ...) en la zona no permite asociar la fraccionación observada a procesos en superficie, sugiriendo que ésta sucede en el tránsito del agua en el subsuelo durante la recarga de unos niveles hidrogeológicos cuyo almacenamiento ha disminuido notablemente por las extracciones durante los meses estivales, con una mayor demanda especialmente agrícola.

Este esquema de flujo aporta una descripción de la recarga de los acuíferos en niveles neógenos y señala limitaciones en su régimen de explotación, tanto en lo referente a la renovación de los recursos como en su calidad; concretamente en relación a la presencia de flúor y nitrato, que aparecen en concentraciones significativas y con orígenes distintos.

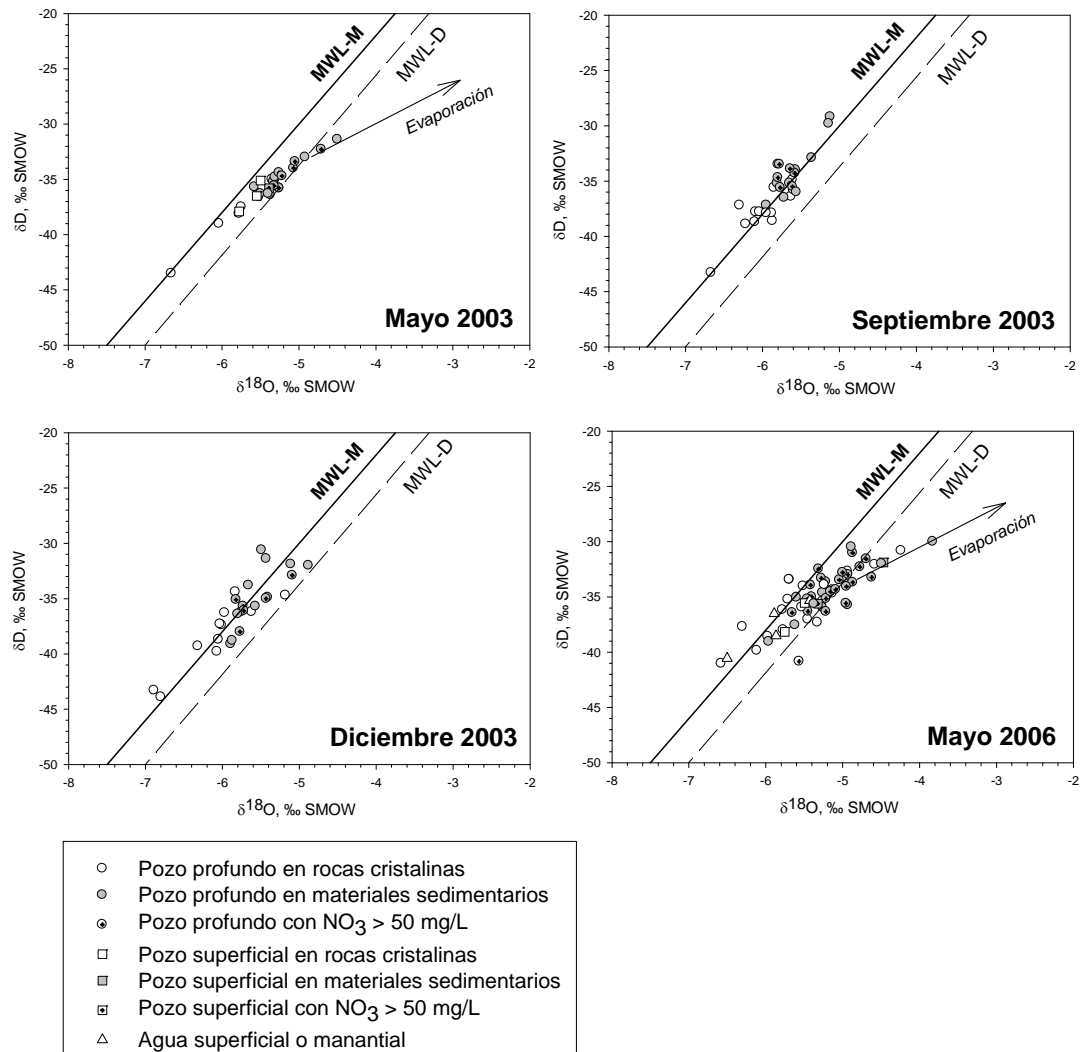


Figura 4. Relación entre los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$, δD) en los muestreos estacionales realizados en la depresión de la Selva.

4. CONCLUSIONES

La consideración conjunta de registros piezométricos y datos hidroquímicos e isotópicos ha permitido definir la contribución de sistemas de flujo locales y regionales en la recarga de la depresión de la Selva; y, aún más importante, se ha puesto de manifiesto una marcada variabilidad estacional en las proporciones de recarga.

La evidencia de evaporación en la zona no saturada de los materiales sedimentarios que rellenan esta depresión tectónica ha sido determinante en la caracterización del sistema de flujo a escala local. Los datos isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ - δD correspondientes a los muestreos del mes de mayo, posteriores a los períodos de mayor recarga (invierno-primavera), reflejan la contribución de la recarga local tanto en los niveles acuíferos superficiales como profundos. Estos resultados inciden en la importancia de discernir la variabilidad estacional en los estudios regionales, especialmente en aquellas zonas en las que la hidrodinámica natural se halla

modificada por los regímenes de bombeo.

Finalmente, esta contribución pone de manifiesto la importancia de los procesos que afectan a la recarga en la zona vadosa en la evaluación los recursos hídricos a escala de cuenca, cuyo conocimiento aporta información sobre la respuesta del sistema hidrogeológico a las presiones efectuadas por su explotación.

Agradecimientos. Este estudio forma parte del desarrollo del proyecto del MCYT CGL2005-08019-C04-02 y 01/HID, y continuado en el proyecto MCYT CGL2008-06373-C03-03 y 01/BTE.

REFERENCIAS

- Allison, G.B., y C.J. Barnes, 1984. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. 2. Experimental. *Journal of Hydrology*, 64, 377-397.
- Barnes, C.J., y G.B. Allison, 1983. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. 1. Theory. *Journal of Hydrology*, 60, 141-156.
- DePaolo, D. J., M. E. Conrad, Ka. Maher, y G. W. Gee, 2004. Evaporation effects on oxygen and hydrogen isotopes in deep vadose zone pore fluids at Hanford, Washington. *Vadose Zone Journal*, 3, 220-232.
- IAEA/WMO, 2006. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Consultable en: <http://isohis.iaea.org>
- Institut Cartogràfic de Catalunya, 1989. Mapa geològic de Catalunya E 1:250.000. Generalitat de Catalunya.
- Folch, A., A. Menció, R.Puig, A. Soler, y J. Mas-Pla, 2009. Groundwater exploitation effects on regional flow systems in a range-and-basin hydrogeological setting: the Selva basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*. Enviado, marzo 2009.
- Gaye, C.B., y W.M. Edmunds, 1996. Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environmental Geology*, 27, 246-251
- Menció, A., 2006. *Anàlisi multidisciplinària de l'estat de l'aigua a la depressió de la Selva*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Menció, A., A. Folch, y J. Mas-Pla, 2009. Applying water balance as indicator of sustainable water management. *Environmental Management*. Aceptado, enero 2009.
- Mook, W.G., ed., 2000. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle*. IAEA. Consultable en: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources3_publication_en.html
- MOPU, 1985. Plan Hidrológico del Pirineo Oriental. EE2 Estudio complementario sobre aguas subterráneas. Zona5 - La Selva. Síntesis Hidrogeológica. *Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Dirección General de Obras Hidráulicas*, Spain.
- Nativ, R., y I. Nissim, 1992. Characterization of a desert aquitard – Hydrological and hydrochemical considerations. *Ground Water*, 30, 598-606.
- Pallí, L., J. Trilla, y J. Estalrich, 1983. *Mapa morfològic de la depressió de la Selva*. Editado por la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad de Girona.
- Pous, J., L. Solé Sagrañes, P. Badiella, 1990. Estudio geoeléctrico de la depresión de La Selva. *Acta Geológica Hispánica*, 25, 261-269.
- Neal, C., M. Neal, A. Warrington, A. Avila, J. Pinol, F. Roda, 1992. Stable hydrogen and oxygen isotope studies of rainfall and streamwaters for two contrasting holm oak areas of Catalonia, northeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 140, 163-178.
- Singleton, M.J., E.L. Sonnenthal, M.E. Conrad, D.J. DePaolo, y G.W. Gee, 2004. Multiphase reactive transport modeling of seasonal infiltration events and stable isotope fractionation in unsaturated zone pore water and vapor at the Hanford Site. *Vadose Zone Journal*, 3, 775-785.
- Tóth, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68, 4795-4812.
- Vehí, M., 2000. *Geología ambiental de la depressió de la Selva*. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.