

## EL FONDO NATURAL DEL AGUA SUBTERRÁNEA. DEFINICIÓN, ESTABLECIMIENTO Y PAPEL EN LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA

**MANZANO ARELLANO, Marisol** <sup>(1)</sup>, **CUSTODIO GIMENA, Emilio** <sup>(2)</sup>, **NIETO LÓPEZ-GUERRERO, Pedro** <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Univ. Politécnica de Cartagena, UPC T, [marisol.manzano@upct.es](mailto:marisol.manzano@upct.es)

<sup>(2)</sup> Univ. Politécnica de Cataluña, UPC, [emilio.custodio@upc.es](mailto:emilio.custodio@upc.es)

<sup>(3)</sup> Instituto Geológico y Minero de España, IGME, [p.nieto@igme.es](mailto:p.nieto@igme.es)

**Palabras clave:** fondo natural, polución, indicadores, tendencias, Directiva Marco

### RESUMEN

La reciente entrada en vigor de algunas leyes de aguas nacionales e internacionales hace necesario establecer una definición del concepto de *fondo natural* de la calidad del agua subterránea que sea rigurosa científicamente, realista desde el conocimiento de la hidrogeología y fácil de aplicar por gestores y políticos. Derivado de los trabajos realizados en el proyecto europeo BaSeLiNe, el fondo natural se define como *el rango de concentraciones en el agua de un cierto elemento, especie o substancia, y derivado de fuentes geológicas, biológicas o atmosféricas naturales*. Esta definición condiciona la metodología más adecuada a utilizar para cumplir con los requerimientos de la legislación europea vigente y futura: establecer el fondo natural de los distintos cuerpos de agua de la UE; detectar tendencias evolutivas de la calidad del agua subterránea y diferenciar aquellas de origen natural (que son parte del fondo) de las debidas a entradas de componentes antropogénicos (polución); averiguar las causas de las segundas, poner en marcha actuaciones de restauración y controlar su efectividad mediante observación del inicio de la inversión de esas tendencias. Se presenta la metodología propuesta en el proyecto europeo BaSeLiNe para responder estas preguntas y las principales conclusiones metodológicas y conceptuales, que destacan la relevancia de una cuidadosa determinación del fondo natural de la calidad del agua subterránea.

### INTRODUCCIÓN

Los términos "fondo" y "umbral" se han utilizado de forma clásica en muchas disciplinas científicas para identificar concentraciones anómalas respecto a valores "típicos". En hidrología subterránea la reciente necesidad de regular la calidad del agua hace necesario definir un término que exprese los valores característicos de la composición natural de esa agua y que sirva como referencia en los programas de protección y restauración. En inglés el término más ampliamente extendido es "baseline", y también el más clásico de "background". En español no existe hasta ahora una acepción única y oficial; aquí se propone la de "fondo natural".

De forma intuitiva, el fondo natural de la composición química de un agua subterránea se puede definir como aquellas condiciones físico-químicas propias de la misma que se derivan de procesos puramente naturales. Así, cualquier posible impacto sobre la calidad del agua se evalúa por comparación con ese fondo natural, cuyas características se utilizan como referencia para evaluar el grado de éxito de programas de recuperación o remediación.

Pero al intentar utilizar esta definición surgen algunas incertidumbres, tales como si el impacto indirecto (inducido) de la actividad humana debe considerarse o no como calidad natural de referencia, o si ésta debe establecerse basándose en valores únicos característicos (medias, medianas, mínimos, máximos,..) de determinados indicadores o bien mediante rangos de variación de los mismos. Para solventar estas incertidumbres y establecer criterios basados en conocimientos científicos rigurosos y que sean a la vez fácilmente aplicables a la legislación vigente, en el proyecto europeo "BaSeLiNe" (Natural BaSeLiNe Quality in European Aquifers, EVK1-CT1999-0006) se ha adoptado la siguiente definición: *El fondo natural de la calidad del agua subterránea es el rango de concentraciones en el agua de un cierto elemento, especie o sustancia presente, y derivado de fuentes geológicas, biológicas o atmosféricas naturales.*

Dado que su origen es geoquímico (procede de las interacciones agua-roca y de los ciclos naturales de los elementos químicos), que tanto los aportes atmosféricos como las reacciones químicas son función del tiempo, y que no todos los componentes tienen igual tiempo de residencia, el fondo regional de un acuífero dado es un rango de valores que, además, suele variar de forma apreciable tanto espacial como temporalmente (Fig. 1). La heterogeneidad litológica y el hecho de que el agua se mueva a lo largo de líneas de flujo contribuyen a esa variabilidad. Los principales procesos hidrogeoquímicos que definen el fondo natural de la calidad de un agua subterránea determinada son la oxidación-reducción, la solubilidad mineral, la adsorción y el intercambio con las superficies minerales.

Por contraposición, la polución del agua subterránea es de origen antropogénico y se sobrepone al fondo natural, tanto espacial como temporalmente. La polución de un agua puede reconocerse mediante ciertos trazadores o indicadores químicos e isotópicos claramente establecidos, de entre los cuales hay que descartar algunas sustancias convencionalmente consideradas contaminantes, tales como  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , F, As y muchos metales, los cuales pueden presentar concentraciones elevadas en el agua de forma natural dadas ciertas condiciones hidrogeoquímicas.

El proyecto europeo BaSeLiNe (1999-2003) tuvo como objetivos: a) establecer criterios científicos para definir el fondo natural de la calidad del agua subterránea y b) desarrollar una metodología estándar aplicable a toda Europa que pudiera utilizarse para cumplir con los requisitos de la Directiva Marco del Agua (DMA) y de la Directiva (derivada) del Agua Subterránea (DAS) europeas.

El proyecto fue coordinado el British Geological Survey y en él participaban inicialmente 11 grupos de investigación de 9 países europeos (Dinamarca, España, Portugal, Bélgica, Francia, Estonia, Polonia y Suiza); posteriormente (2002) se incorporaron al mismo otros grupos de Malta, Bulgaria y Chequia.

Los objetivos se han cubierto mediante aproximaciones conceptuales teóricas y prácticas basadas en datos reales correspondientes a 21 acuíferos de los países mencionados. Aunque queda claro que cada acuífero es único y que su fondo natural depende de la combinación particular de sus características geológicas, hidrodinámicas, etc., y que, por tanto, no es aplicable directamente a ningún otro acuífero en particular, sí se ha propuesto la utilización de tipologías de acuíferos

(básicamente litológicas: carbonatados, detríticos silíceos, detríticos con rocas carbonatadas) con el fin de facilitar el muestreo, control y estudio de los mismos.

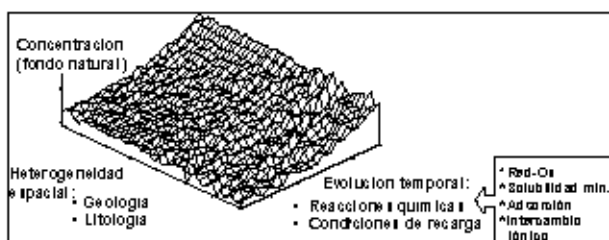


Fig 1.- Esquema conceptual de la variación espacial (3D) y temporal del fondo natural de la calidad del agua subterránea (de BaSeLiNe, 1999).

Se comentan algunos de los principales resultados metodológicos y conceptuales del proyecto BaSeLiNe para ilustrar como determinar del fondo natural de la calidad del agua subterránea, que aspectos considerar y que precauciones hay que tener en cuenta. Previamente se introducen la Directiva Marco del Agua europea y la Directiva de Aguas Subterráneas a través de aquellos aspectos que requieren estudiar el fondo natural de los acuíferos de la UE en los próximos diez años.

## **SOBRE LA NECESIDAD DE ESTABLECER EL FONDO NATURAL**

La necesidad de establecer tanto una definición del fondo natural de la calidad del agua subterránea como los criterios para conocerlo se deriva principalmente de la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua de Europa (DMA de aquí en adelante) y de la futura entrada de la Directiva de Aguas Subterráneas (DAS de aquí en adelante). El objetivo de DMA es establecer un marco para la protección de las aguas (superficiales continentales, de transición, costeras y subterránea) que prevenga todo deterioro ambiental adicional y mejore su estado actual; la DAS es un complemento de la DMA y su objetivo es establecer estrategias para prevenir, controlar y corregir la contaminación del agua subterránea.

En Norteamérica (EUA y Canadá), el término "baseline" aplicado a la calidad natural del agua subterránea aparece de forma frecuente en los documentos de la EPA o el USGS desde hace casi diez años, aunque no se conoce la existencia de un documento oficial que establezca una definición del concepto ni criterios para establecerlo. En Europa, la DMA no menciona el término "baseline" pero sí, de forma reiterada, el "estado" de la calidad de los cuerpos de agua superficial y subterránea de los distintos países. No obstante, el texto provisional del borrador de la futura DAS sí utiliza ya las expresiones "groundwater baseline" y también "background natural composition" de forma generalizada.

La definición de "baseline" adoptada por la DAS es la propuesta por el proyecto europeo BaSeLiNe con algunas adiciones: los rangos de concentración de origen natural (excluyendo los introducidos por la actividad antrópica) deben ser aquellos medidos en la parte superior de los acuíferos ( $\geq 70$  m) siempre que sea posible, o en acuíferos profundos cuando sea necesario. Esto se debe a la necesidad de

establecer el fondo natural en las aguas que participan activamente en el ciclo hidrológico, salvo que éstas estén ya modificadas a causa de la contaminación.

La DMA dispone un conjunto de actuaciones que requiere criterios y normas guía para establecer tanto el fondo natural de la calidad del agua subterránea como el estado actual de la calidad de la misma. Entre ellas destacan las siguientes:

- Todos los Estados Miembros deben haber caracterizado los cuerpos de agua de su territorio y haber analizado las presiones e impactos sobre las mismas para diciembre de 2004.
- Todos los cuerpos de agua subterránea deben estar protegidos, mejorados y restaurados, tomando como referencia para ello el fondo natural de la calidad de esos cuerpos de agua para diciembre de 2015.
- En diciembre de 2016 deben estar en marcha los programas de vigilancia y control de la calidad de las aguas, los cuales deben diseñarse con el fin de observar el posible deterioro del fondo natural de los distintos cuerpos de agua.
- Tanto para caracterizar el fondo natural de un cuerpo de agua o acuífero como para controlar su evolución deben estudiarse las tendencias de evolución de la composición química del agua. Para ello recomienda utilizar las series temporales de calidad disponibles o generables hasta diciembre de 2005. Para esa fecha los Estados debe haber identificado las posibles inversiones significativas y sostenidas de las tendencias naturales de evolución del fondo natural de sus aguas subterráneas, así como los puntos de partida de esas inversiones (entendiendo que se deben a procesos de contaminación) y sus causas.

Por su parte, el borrador de la DAS (2003) establece los criterios para:

- Evaluar el estado de la calidad del agua subterránea. Considerando la variabilidad espacial y temporal del fondo natural del agua subterránea y la escasez actual de datos (tanto de observación y control como de conocimiento) sobre el funcionamiento de muchos acuíferos, la DAS no establece una lista de estándares de calidad aplicable uniformemente a toda Europa. Aún reconociendo que los estándares existentes para el agua de boca (e.j. nitratos, plaguicidas,...) son útiles para proteger la salud humana, pero no son necesariamente adecuados como referentes medioambientales, sí deja claro que en el caso de cuerpos de agua que superen las concentraciones máximas de estos estándares (50 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ ; 0,5  $\mu\text{g/L}$  de plaguicidas totales) deben clasificarse como cuerpos "en mal estado químico" y deben ser restaurados.
- Establece la utilización de "tipologías" de aguas subterráneas en función del tipo de acuífero donde se encuentra el agua (tipos básicos: sedimentario, rocas duras de origen sedimentario y fracturadas, rocas duras no sedimentarias y de litología muy definida) y de los rangos de concentración de indicadores concretos en sus fondos naturales. La DAS propone un mínimo de indicadores y recomienda a los Estados ampliar la lista en función de las condiciones locales. Los rangos de variación de estos indicadores deben ser establecidos por cada Estado Miembro en los 2 años siguientes a la entrada en vigor de la DAS. Para obligar a todos los países a trabajar en la consecución de un buen estado de calidad para todos los cuerpos de agua, de la lista de indicadores posiblemente se derivarán estándares de calidad.

- Identificar las tendencias crecientes de concentración que sean sostenidas y estadísticamente significativas.
- Aunque los aspectos relacionados con la vigilancia y control están ampliamente cubiertos por la DMA, la DAS añade especificaciones adicionales respecto a la evaluación del fondo natural y a la observación de tendencias mediante indicadores.

## **PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTABLECER EL FONDO NATURAL**

A la hora de establecer el fondo natural de la calidad de un acuífero o cuerpo de agua subterránea lo ideal sería contar con información química que corresponda, de forma razonable, a zonas sin trazas de impacto humano. En general esto significa aguas de la era pre-industrial. Pero esto no siempre es fácil de obtener: los niveles más someros de los acuíferos libres suelen tener componentes antropogénicos de origen diverso (lluvia ácida, agroquímicos) y deben ser descartados; los acuíferos multicapa presentan, en teoría, la situación ideal para obtener aguas no impactadas en sus niveles más profundos, pero muchas veces las propias captaciones, deficientemente (o descuidadamente) construidas, comunican los niveles profundos explotados con los someros contaminados, lo que supone antes o después la llegada de aguas jóvenes contaminadas a esos niveles con agua pre-industrial. Por otro lado algunos (escasos) acuíferos con aguas jóvenes se mantienen imolutos y son perfectamente aceptables para caracterizar su calidad natural de referencia.

Para distinguir aguas de origen natural de aguas con impacto antrópico se puede adoptar esta triple aproximación: 1) tener evidencias de que la edad (o tiempo de residencia) del agua es superior a 50 ó 100 años; 2) extrapolar las series temporales de datos químicos disponibles hacia atrás, hasta un tiempo inicial (teórico) en el cual no existía actividad antrópica en la zona de recarga; 3) usar elementos claramente indicadores de la actividad humana tales como agroquímicos, productos industriales, aumento de las especies del N o aumento del carbono orgánico total (COT), para identificar la presencia de aguas jóvenes con impronta antrópica. Aunque tanto la presencia como el grado de impacto real de contaminantes de origen antrópico en un agua pueden hoy en día cuantificarse fácilmente mediante modelación, esta aproximación inicial permite tomar decisiones, sobre la marcha, de forma muy razonable.

Una de las formas más frecuentes de contaminación es la incorporación por vía atmosférica de contaminantes generados fuera de la zona de recarga del acuífero estudiado. Esto ha llevado a introducir la discusión sobre cómo determinar la calidad natural de referencia que requiere la DAS en acuíferos pequeños intensamente explotados, que representan un recurso hídrico fundamental para las zonas donde se ubican y en los que el agua tiene un corto tiempo de residencia. La propuesta del proyecto ha sido utilizar como modelo de referencia para estos acuíferos la calidad natural establecida a partir de otros de características (geológicas, hidrogeológicas, climatológicas,...) similares, ayudándose para ello de la modelación hidrogeoquímica si es necesario, y de la perforación de nuevos puntos de control cuando se sospeche que existe alguna zona aún en condiciones naturales.

Dado que en un mismo acuífero no impactado pueden existir cuerpos de agua con distinta composición química (p.e. debido a la existencia de frentes redox, gradientes de intercambio iónico, aguas de distinta procedencia –marina y continental,...), en la práctica la calidad natural de referencia de un medio debe

referirse a cuerpos de agua específicos y sus valores deben ser explicados en función de los procesos geoquímicos principales y de la heterogeneidad que pueda existir en el acuífero. Para aplicar correctamente una determinada composición de referencia a un cuerpo de agua dentro de un acuífero se sugiere utilizar propiedades (y denominaciones) tales como "confinado", "libre", "oxidante" o "reductor".

A continuación se presentan las herramientas que se han utilizado de forma integrada en el proyecto BaSeLiNe como propuesta metodológica para el establecimiento del fondo natural de la calidad del agua subterránea. Se describe tanto su fundamento de aplicación como los principales resultados de tipo conceptual y metodológico:

### **Estudio de la química de componentes inorgánicos mayoritarios y traza para establecer rangos de variación del fondo natural**

La calidad de las aguas naturales depende de unas concentraciones características (medias o medianas) de los distintos componentes y de su distribución en torno a esos valores. Si la distribución es normal o lognormal entonces su dispersión puede definirse mediante desviaciones estándar. Pero con frecuencia esto no ocurre debido a que son el resultado de más de un proceso. Tras una primera evaluación de los datos disponibles, en el proyecto BaSeLiNe se decidió adoptar esta definición operacional de fondo natural: utilizar la mediana como parámetro más ilustrativo del valor característico de un componente, y los percentiles 2,3% y 97,7% para ilustrar su rango de variación. Esto asegura que el 95,4% de la población estudiada está dentro del rango.

El estudio químico de un acuífero o cuerpo de agua subterránea debe realizarse utilizando un número suficiente de muestras tal que describa razonablemente la posible variabilidad espacial del fondo natural. Esto supone muchas veces realizar nuevos muestreos. También supone evaluar la calidad de los posibles datos históricos anteriores a 1985 antes de integrarlos con los nuevos, pues muchas técnicas analíticas eran bastante menos precisas que hoy en día, y sus límites de detección demasiado elevados.

Se propone realizar una aproximación mediante técnicas estadísticas sencillas (univariantes) para establecer valores característicos y rangos de variación. En el proyecto BaSeLiNe se eligió la representación de los datos en forma de frecuencias acumuladas (Fig.2) para identificar los principales procesos que controlan las distribuciones observadas; otros tipos de representación gráfica considerados adecuados para ilustrar la variación del fondo natural son los gráficos de cajas (Fig 3) y los de evolución temporal/espacial de concentraciones.

Entre las principales conclusiones metodológicas de esta primera fase están:

- En poblaciones que no tienen distribución normal o lognormal los valores extremos ("outliers") pueden ser parte del fondo natural y no el resultado de contaminación. El estudio de estos datos debe ser extremadamente cuidadoso.
- La variación espacial y temporal del fondo natural puede ser del mismo orden de magnitud o incluso mayor que la causada por contaminación.
- El fondo natural establecido depende de los datos disponibles, y a menudo está sesgado debido a cuestiones tales como la obtención de muestras

mediante bombeo o la realización de los muestreos a ciertas profundidades de forma preferente.

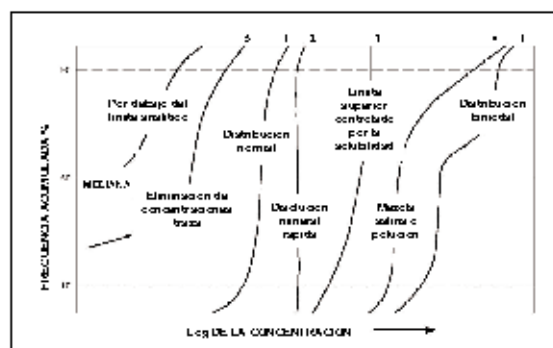


Fig 2.- Información que proporciona el gráfico de frecuencias acumuladas. La mediana se usa como nivel de referencia regional o para comparar distintos elementos entre sí. 1) Distribuciones normales o multimodales: reflejan el rango de variabilidad de las condiciones de recarga, la interacción agua-roca, los tiempos de residencia en sistemas de flujo natural...; 2) rangos de concentración estrechos: reflejan una rápida aproximación a los principales equilibrios minerales (Si, Ca, Mg...); 3) rangos de concentración estrechos en el límite superior: reflejan el control que ejerce la solubilidad de un mineral concreto (p.e F por la fluorita); 4) fuerte inclinación en sentido positivo: indica bien la contaminación de un pequeño número de muestras (fácilmente separables del fondo natural de forma gráfica), o bien la existencia de aguas muy salinas de origen natural; 5) fuerte inclinación en sentido negativo: suele indicar la eliminación preferente de un elemento debido a una reacción geoquímica (p.e.  $\text{NO}_3$  por desnitrificación in situ). (Modificada de BaSeLiNe, 1999).

Como consecuencia, se proponen las siguientes normas para la determinación de la composición de referencia de un acuífero o cuerpo de agua:

- Excluir muestras que se sabe están contaminadas.
- Muestrear tanto en la dirección del flujo como en la perpendicular al mismo. La información manejada debe reflejar la distribución tridimensional de las características hidroquímicas en los acuíferos, lo que implica considerar la posición de los datos (muestras) respecto a la red de flujo del agua subterránea, incluyendo la profundidad.
- Comparar los datos con los de áreas del acuífero que con certeza no están contaminadas.
- Siempre que existan, utilizar series de datos temporales.
- Utilizar la modelación hidrogeoquímica como herramienta para conocer si se trata o no de procesos naturales.
- Usar las técnicas estadísticas con limitación.

### **Estudio de la química de los componentes orgánicos para establecer tanto rangos de variación del fondo natural como su utilidad como indicador de contaminación**

El objetivo es estudiar el papel del carbono orgánico en el agua subterránea como regulador de procesos geoquímicos naturales, así como su utilidad para



determinar el estado natural o contaminado de un agua. Su interés radica en varios aspectos: es un indicador de contaminación, por ejemplo por vertederos y por colectores de aguas residuales; por sí mismo es un contaminante tóxico potencial; es una fuente de energía y de alimento para las poblaciones bacterianas, tanto en acuíferos como en redes de distribución; juega un papel importante en la movilización de metales traza, radionucléidos y componentes biogénicos externos incorporados al acuífero; su presencia y concentración es importante para la evolución de frentes redox en acuíferos.

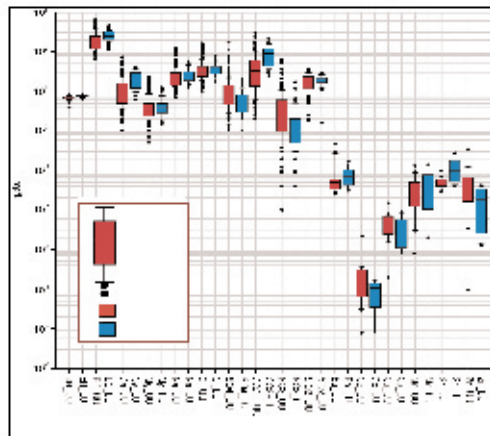


Fig. 3.- Diagramas de cajas ilustrando las variaciones del valor de la mediana y del rango de varios componentes y parámetros químicos (fondo natural) en dos subunidades (Superior e Inferior) de un mismo acuífero.

Todas las aguas naturales contienen carbono orgánico disuelto (COD), que aquí se ha definido como aquél medido en un agua previamente filtrada con filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ . El carbono orgánico total (TOC) es el medido en aguas sin filtrar e incluye tanto la fase disuelta como la particulada (de diámetro  $> 0,45 \mu\text{m}$ ). Esta última incluye bacterias y fitoplancton, y suele ser algo mayor que el COD. Recientemente se está reconociendo el significativo papel que el TOC juega en procesos hidrogeoquímicos importantes tales como la meteorización natural o las reacciones redox, que controlan la evolución de algunos ambientes hidrogeoquímicos en acuíferos. Además, la materia particulada, sobretodo la de tamaño coloidal, juega un papel importante en el transporte, movilización y degradación de contaminantes.

Las aguas subterráneas de origen natural suelen tener concentraciones de TOC inferiores a unos pocos mg/L, aunque excepcionalmente se pueden encontrar valores superiores a 50 mg/L. Los datos estudiados en el proyecto BaSeLiNe muestran que las concentraciones de TOC disminuyen con la profundidad y que las diferencias entre las medianas del TOC en aguas naturales de acuíferos con aguas jóvenes y viejas, silíceas o carbonatadas son pequeñas. Éstas oscilan entre 0,7 y 1,8 mg/L, que son valores significativamente inferiores a los medidos en acuíferos claramente contaminados donde suelen ser del orden de varias decenas e incluso algún centenar de mg/L.



La conclusión principal es que aunque no se ha encontrado una clara relación entre el TOC y otros parámetros cercanos tales como el carbono orgánico asimilable, los compuestos orgánicos halogenados o el número de bacterias, el conocimiento científico acerca de las distintas moléculas orgánicas y su reactividad, toxicidad y capacidad para movilizar diferentes contaminantes es aún escaso. La nueva información que estará disponible en los próximos años será sin duda muy relevante.

### **Modelación hidrogeoquímica para conocer y establecer los tipos y tiempos característicos de las reacciones que controlan el fondo natural**

La calidad natural del agua subterránea es el resultado de complejas interacciones entre la fase sólida, la gaseosa y el agua. Como ya se ha dicho, la composición resultante puede ser del mismo orden de magnitud o superior al derivado de contaminación. La modelación hidrogeoquímica acoplada al flujo de agua es una herramienta imprescindible para obtener un conocimiento tanto cualitativo como cuantitativo de los procesos principales y más frecuentes que controlan la calidad del agua subterránea (disolución/precipitación, intercambio iónico, reacciones redox, adsorción) (Fig. 4). Una vez conocidos y cuantificados estos procesos, la modelación puede usarse para prever las modificaciones futuras de la calidad del agua, debidas tanto a cambios naturales del medio (p.e. cambios climáticos de origen natural, cambios en el flujo debidos a la tectónica, subsidencia, sedimentación, erosión, ...) como al impacto de ciertas actuaciones humanas. Esto último facilita el estudio de tendencias (espaciales o temporales) y la puesta en práctica de los caros programas de vigilancia y control, que en general son caros.

Se ha usado el programa PHREEQC para estudiar los procesos responsables de la composición natural observada y de su evolución, especialmente los cambios que ocurren a lo largo de una línea de flujo, en tres tipos de acuíferos ilustrativos de la situación más frecuente en Europa: acuíferos detríticos silíceos con pocos carbonatos; acuíferos carbonatados o con carbonatos abundantes y acuíferos con agua salina antigua que están siendo lavados por agua dulce más joven.

Las conclusiones más significativas son:

- Muchos patrones y tendencias frecuentes en aguas no impactadas (p.e. gradientes de intercambio iónico) son resultado de procesos que ocurren a escala temporal geológica y se deben, generalmente, a condiciones de flujo anteriores a las actuales. Por tanto, el parámetro "tiempo" debe ser cuidadosamente utilizado en trabajos de simulación: es deseable contar con medidas de datación independientes (distintos trazadores) para limitar la incertidumbre; cuando esta información no se posee y el tiempo se obtenga como resultado del ejercicio de modelación, la incertidumbre asociada a la estimación debe quedar claramente expresada.
- La explotación de aguas subterráneas distorsiona los gradientes químicos naturales, situación muy difícil de simular. Los procesos de mezcla entre aguas antiguas y modernas también modifican la composición natural original. Por tanto, algunas discontinuidades en la composición natural de ciertos acuíferos pueden deberse a "gradientes de edad", mientras que las variaciones suaves observadas en el sentido del gradiente hidráulico indican la ocurrencia de procesos continuos.

- Si en un acuífero no queda agua cuya composición sea de origen natural, la modelación puede proporcionar una estimación realista de la composición original del agua en lo relativo a algunos elementos.

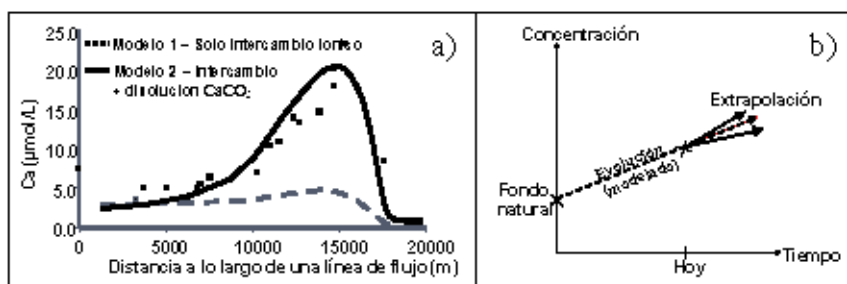


Fig.4 - Ilustración del uso de la modelación del flujo y el transporte reactivo para comprender procesos hidrogeoquímicos. a) Deducción de reacciones hidrogeoquímicas. b) Previsión de la posible evolución futura de la calidad con un modelo bien calibrado. (Modificado de BaSeLiNe, 1999).

#### Uso de trazadores y de datación para conocer las escalas temporales que controlan los rangos de variación de los distintos componentes.

Para poder interpretar las variaciones de calidad del agua en términos de variaciones de concentración del fondo natural es necesario disponer de conocimientos acerca de la edad o tiempo de residencia del agua dentro del sistema de flujo, así como de la escala temporal a la que ocurren los distintos procesos hidrogeoquímicos responsables del fondo natural. En condiciones favorables la edad del agua puede estimarse razonablemente con suficiente confianza, pero con frecuencia esto es imposible debido a que no existen trazadores ideales. Para solventar estas dificultades es necesario utilizar de forma combinada trazadores y simulación numérica del flujo de agua y el transporte de solutos.

Los principios de la datación son los siguientes:

1. Se trata de medir concentraciones de ciertos componentes cuyo contenido en el agua varía en función del tiempo por causas distintas a las reacciones agua-roca y cuya tasa de variación se conoce.
2. Estos componentes son "relojes". Los distintos tipos conocidos son:
  - Procesos de acumulación ( $^3\text{He}$ , algunos parámetros químicos,...)
  - Procesos de desintegración radioactiva ( $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,...)
  - Incorporación variable (y conocida) al agua subterránea ( $^3\text{He}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ , CFC,  $\text{SF}_6$ ,...).

En el marco del proyecto BaSeLiNe se ha utilizado varios trazadores ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ , CFCs,...) con el objetivo principal de conocer la "estructura de la edad" de las aguas en los acuíferos estudiados. Esta expresión se refiere a integrar la información que aportan los valores obtenidos (con las diferentes técnicas usadas) en a los procesos hidrogeoquímicos e hidrodinámicos responsables de las características (entre ellas, la edad aparente) de ese agua.

Una de las principales aportaciones de los trazadores temporales a la determinación del fondo natural de la calidad del agua subterránea es la estimación de la escala de los tiempos de residencia del agua en el acuífero a estudiar. Esta información ayudará a prever, antes de realizar estudios hidrogeoquímicos largos, extensos y caros, si cabe esperar que el agua mantenga o no intacta su composición natural. Este aspecto puede ilustrarse determinando la presencia o ausencia de componentes jóvenes en el agua ( $^3\text{H}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ , CFCs,  $\text{SF}_6$ ...):

- La presencia de alguno (generalmente varios) de estos componentes indica que se trata de aguas más jóvenes de 50 años. Estas aguas están potencialmente impactadas por la actividad humana. Por tanto, es probable que su fondo natural se haya modificado. Por otro lado, la ausencia de cualquier componente joven garantiza que las condiciones naturales originales prevalecen.
- La ausencia de componentes jóvenes indica que se trata de aguas de más de 50 años. La calidad de las aguas de más de 50 a 100 años en el acuífero corresponde al fondo natural y se debe, como se ha dicho antes, a reacciones agua-roca que dependen del tiempo. El conocimiento de estas reacciones requiere tanto de la modelación hidrogeoquímica como de la datación con trazadores adecuados.

Lo anterior permite clasificar a priori cualquier parámetro químico, independientemente de su rango de variación, en dos grupos con diferentes tiempos de residencia: los medidos en aguas con componentes jóvenes y los medidos en aguas sin componentes jóvenes. Ello simplifica el muestreo y tratamiento de los datos para el establecimiento del fondo natural.

La principal conclusión del estudio de los tiempos de residencia del agua en los distintos acuíferos estudiados es que no existe una técnica o conjunto de técnicas única válida para todos los casos, sino que cada acuífero necesita un conjunto de técnicas específico que depende principalmente de: la escala de los tiempos de residencia del agua, el ambiente hidrogeoquímico del medio (p.e. en medios redox muchos trazadores no son útiles) y los recursos económicos disponibles.

### **Estudio de tendencias evolutivas del fondo natural para conocer sus causas y discriminar las naturales de las antrópicas**

Se deriva del requerimiento de la futura DAS de que se utilicen las series temporales para: 1) observar la posible existencia de tendencias crecientes sostenidas y estadísticamente significativas de la concentración de algún elemento químico atribuible a contaminación; 2) controlar y detectar la inversión de esas tendencias tras la puesta en práctica de las medidas de restauración correspondientes.

El uso de técnicas estadísticas como indicador principal, tal como propone el borrador de la DAS (LOESS, ANOVA), está aún siendo discutido en el ámbito hidrogeológico, ya que si no se combinan con interpretaciones hidrogeoquímicas e hidráulicas, se corre el riesgo de interpretar tendencias crecientes de origen natural como casos de contaminación (Fig. 5).

En el marco del proyecto BaSeLiNe el estudio de series históricas de datos químicos ha tenido como objetivos: 1) averiguar qué tipos de series temporales cabe esperar que existan en los distintos países europeos; 2) observar y definir tendencias evolutivas del fondo natural con el fin de obtener fundamentos químicos

de apoyo para entender el funcionamiento natural de los acuíferos, 3) apoyado en lo anterior, discriminar cambios naturales de aquellos debidos a la actividad antrópica.

Pocos países tienen series temporales de calidad, salvo para algunos acuíferos concretos. El estudio de estas series ha llevado a diferenciar dos tipos de tendencias evolutivas espaciales y temporales y también a proponer la necesidad de interpretar y conocer las causas de las primeras, que están vinculadas a unas determinadas condiciones hidrodinámicas e hidrogeoquímicas, antes de interpretar las segundas. Estos dos tipos de tendencias evolutivas de la calidad natural del agua son:

1. Tendencias de origen natural:

- Unas se deben a procesos que originan cambios a escala del acuífero. Dependen de las velocidades de transporte de solutos y son, por tanto, muy lentas (p.e. la sustitución de aguas salinas congénitas por aguas dulces).
- Otras se deben a la variabilidad espacial a pequeña escala, causada por la heterogeneidad, también de pequeña escala, del acuífero. Esto genera fluctuaciones en torno a ciertos niveles, las cuales pueden ser erróneamente interpretadas (si sólo se usa la aproximación estadística) como procesos de contaminación (tendencias crecientes) o como inversión de los mismos (tendencias decrecientes observadas a continuación de otras crecientes).

2. Tendencias causadas por la explotación de los acuíferos:

- Son cambios de origen puramente natural y no contaminación, aunque sean inducidos por la actividad humana. Se deben al aumento de la velocidad del flujo causado de la explotación, lo cual acelera la manifestación de tendencias naturales que de otra forma requieren mucho más tiempo para ser observadas. La explotación puede también inducir reacciones naturales que en ausencia de bombeos no se producirían, como es el caso de las mezclas de agua por ascenso de conos salinos o los cambios de estado redox, pH, etc. por oscilación del nivel freático o por el desplazamiento de cuerpos de agua de distintas características.

Las principales conclusiones metodológicas y conceptuales son:

- Para distinguir una tendencia evolutiva de origen natural de otra ocasionada por contaminación es imprescindible entender el origen de las tendencias observadas.
- Los principales procesos que ocasionan cambios en las tendencias de evolución de la calidad natural del agua subterránea son:
  - a. Cambios en las proporciones de mezcla entre aguas diferentes: p.e. la salinización por flujo lateral o por ascenso de conos salinos; sustitución de agua salina congénita por agua dulce; etc.
  - b. Cambios de las condiciones y de los frentes redox: p.e. la oxidación de pirita, desplazamiento de las zonas de reducción de nitrato, sulfato, hierro, etc.
  - c. Cambios en la composición del agua de recarga: p.e. los cambios de la tasa de recarga; cambios de la composición de la lluvia, etc.
- Para confirmar la existencia de tendencias evolutivas de la calidad del agua, ya sean de origen natural o antrópico, es necesario disponer de series históricas. Si estas existen, las tendencias observadas deben interpretarse. De esta forma se puede llegar a conocer la composición inicial del agua. Este dato es de suma importancia para la interpretación de los datos químicos, y se recomienda que todo nuevo pozo y sondeo perforado en un acuífero sea

adecuadamente muestreado para conservar esa información inicial de referencia.

- La medida de las características químicas iniciales permitirá disponer en el futuro de una información de referencia valiosa tanto para el control de la evolución del fondo natural como para la modelación numérica o la gestión futura del acuífero.
- Cuando se trata de observar la evolución temporal de la calidad el agua hay que realizar un análisis cuidadoso para distinguir entre tendencias naturales y aquellas debidas al impacto humano.

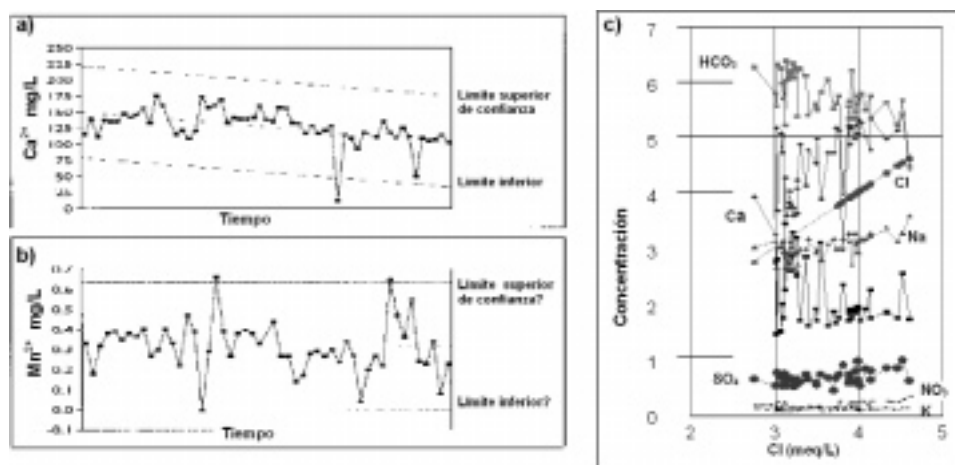


Fig. 5.- El estudio de series temporales permite reconocer tendencias de evolución e identificar sus causas, ayudando a distinguir cambios de origen natural de aquellos debidos a contaminación. a) Tendencias crecientes/decrecientes de muchos solutos pueden deberse tanto a procesos naturales como a contaminación; el estudio estadístico simple sólo permite establecer valores característicos de las concentraciones (LSC, LC, LIC), pero no sus causas. b) Series temporales sin tendencias evolutivas consistentes, como ésta, pueden aportar más información si los datos se dibujan y estudian de forma adecuada, como en la figura siguiente. c) Esta representación permite identificar tendencias evolutivas, aunque no sean sostenidas en el tiempo, y orienta acerca de los posibles procesos responsables de las mismas. (Modificado de BaSeLIN e, 1999).

## INDICADORES

El borrador de la DAS indica que tanto el establecimiento del fondo natural como la identificación de posibles procesos modificadores de la calidad natural original deben establecerse mediante análisis sucesivos de elementos mayoritarios y traza, entre los cuales deben encontrarse los siguientes (llamados "indicadores"): Al, NH<sub>4</sub>, As, Cd, Cl, Cr, Cu, Hg, Ni, NO<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, K, Na, SO<sub>4</sub>, Zn, TOC. A ellos hay que sumar los parámetros físico-químicos: conductividad eléctrica, Eh y pH.

La lista de elementos indicadores estará sujeta a revisión de forma regular. No obstante, se recomienda a los Estados Miembros que realicen determinaciones de un número mayor de componentes, tanto naturales como antropogénicos, con el fin de ayudar al entendimiento del sistema.

## CONCLUSIONES

La entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua en la Unión Europea, y la inminente entrada de la Directiva del Agua Subterránea, con sus estrictos requerimientos a los Estados Miembros respecto a la caracterización del estado de la calidad de los distintos cuerpos de agua y la puesta en marcha de programas de restauración, hace necesario establecer una definición del concepto de fondo natural con dos objetivos claros:

- 1) Distinguir entre calidad de origen natural (fondo natural) y calidad modificada por la presencia de componentes antropogénicos (contaminación).
- 2) Establecer la composición natural característica de los distintos acuíferos o cuerpos de agua que sirva de referencia en caso tener que realizar actuaciones de restauración.

En el proyecto europeo BaSeLiNe (1999-2003) se ha establecido una definición de fondo natural que tiene una sólida base científica y es a la vez útil para gestores y políticos. Además, se ha propuesto y probado una metodología para establecer el fondo natural y su origen que se ha constatado es aplicable a toda Europa. Esta metodología se ha comentado aquí sucintamente, así como las principales conclusiones de tipo metodológico y conceptual de su aplicación a datos de 21 acuíferos europeos.

De forma integrada, las principales conclusiones del trabajo expuesto son:

- Es imprescindible interpretar siempre la composición química observada en el agua subterránea (ya sea para establecer su fondo natural, deducir procesos geoquímicos naturales o causados por la contaminación, detectar tendencias evolutivas y sus posibles tiempos de inicio y finalización, etc.) desde el punto de vista del conocimiento que se tenga del funcionamiento hidrodinámico del acuífero.
- Dado que el conocimiento que se tiene acerca del funcionamiento de la mayoría de los acuíferos es mínimo o incluso nulo, esto supone la necesidad, apoyada por los requerimientos de la legislación de aguas, de realizar los trabajos y estudios adecuados para obtener un conocimiento básico en los próximos 10-15 años. Entre esos trabajos están, necesariamente, la perforación de algunos nuevos sondeos y su adecuado y completo estudio mediante registros geológicos, geofísicos, geoquímicos e hidrodinámicos, el inicio de series temporales de calidad adecuadamente diseñadas para observar el fondo natural y detectar cualquier modificación del mismo desde su inicio. También es ya inexcusable la utilización de modelos numéricos (no necesariamente sofisticados) para completar y robustecer los modelos conceptuales de funcionamiento de los acuíferos, incluyendo el origen de la calidad del agua, las causas –naturales o antrópicas– de su modificación, la evolución futura previsible, o las características principales del fondo natural cuando éste no se conserva.

## AGRADECIMIENTOS

La mayor parte de lo que se ha expuesto se deriva de los trabajos realizados en el marco del proyecto europeo "BaSeLiNe", (Natural BaSeLiNe quality in European aquifers: a basis for aquifer management, EVK1-CT1999-0006), en el cual



participaron los autores. Se trata de las contribuciones de un conjunto de 30 científicos y expertos, entre los que están los autores de este artículo, a los que se deben las diferentes contribuciones, bajo la dirección del Dr. Mike W. Edmunds. El presente trabajo coincide parcialmente con el de Manzano et al. (2003).

## BIBLIOGRAFÍA

BaSeLiNe, 1999. *BaSeLiNe. Natural BaSeLiNe quality in European aquifers. A basis for aquifer management.* [http://www.bgs.ac.uk/hydrogeology/baseline/europe/EU\\_Baseline.pdf](http://www.bgs.ac.uk/hydrogeology/baseline/europe/EU_Baseline.pdf).

DMA, 2000. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de Octubre de 2000.*

DAS (GWD), 2003. Draft 1.0. Communication from the Commission. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing strategies to prevent and control pollution of groundwater.* Brussels, 20.02.2003.

Manzano, M.; Custodio, E. y Nieto, P. 2003. El fondo natural de la calidad del agua subterránea: implicaciones para la aplicación del Directiva Marco del Agua en Europa. *Tecnología del Agua*, 241: 38 – 47.