



INFORME	Identificación: Imar-2010-01
	Fecha: 23-03-2010
TÍTULO: Recomendaciones para minimizar el impacto sobre la calidad del agua subterránea de los sistemas abiertos de climatización con aguas subterráneas (SAC)	
PROYECTO: Desarrollo metodológico para el análisis del impacto térmico, hidráulico e hidroquímico generado por los pozos de climatización en las aguas subterráneas. Aplicación a la ciudad de Zaragoza.	
RESUMEN (continuar al dorso en caso necesario): Los circuitos abiertos de intercambio de calor que emplean pozos para la extracción e inyección del fluido térmico (agua subterránea) pueden tener un impacto negativo sobre la calidad de esta, sobre todo cuando el acuífero está constituido por materiales muy solubles, tal como ocurre con los yesos en la ciudad de Zaragoza. En este informe se presentan una serie de recomendaciones básicas con objeto de minimizar este impacto.	
Revisión	Autores: Luis Moreno Merino Amalia Romero Prados
Nombre:	
Unidad:	Responsable: Luis Moreno Merino
Fecha:	

**Recomendaciones para minimizar el impacto sobre la calidad del
agua subterránea de los sistemas abiertos de climatización con
aguas subterráneas (SAC)**

L. Moreno & A. Romero

Abril 2010

Resumen

Los circuitos abiertos de intercambio de calor que emplean sondeos para la extracción e inyección del fluido térmico (agua subterránea) pueden tener un impacto negativo sobre la calidad de esta, sobre todo cuando el acuífero está constituido por materiales muy solubles, tal como ocurre con los yesos en la ciudad de Zaragoza. En este informe se presentan una serie de recomendaciones básicas con objeto de minimizar este impacto, basadas en minimizar el salto térmico del fluido inyectado y controlar adecuadamente los parámetros que determinan la precipitación de sales y la interacción del agua con la matriz sólida del terreno.

Palabras Clave: climatización, agua subterránea, Zaragoza

1. Introducción. Algunas definiciones previas:

Como se ha explicado en apartados anteriores, los sistemas de climatización interaccionan intensamente con el medio hídrico subterráneo, tanto desde un punto de vista cualitativo, modificando la composición natural del agua, como alterando el diagrama de flujo natural de la misma.

Desde la perspectiva de la composición de las aguas subterráneas el impacto de estos sistemas se debe básicamente a los siguientes procesos:

Modificación del esquema natural de flujo: esto puede traer consigo la aparición en el sondeo de captación de aguas de composición diferente a la natural del acuífero, por ejemplo, debido a la recarga inducida desde un cuerpo de agua superficial, arrastre de aguas mas profundas de diferente salinidad, conexión de acuíferos separados por un acuíardo etc.

Inducción de un flujo forzado de agua: De forma natural el agua subterránea se mueve a velocidades muy lentas, del orden de centímetros o decímetros/día. Los sistemas de extracción/inyección aumentan esta velocidad en varios órdenes de magnitud, el efecto sobre la cinética de disolución o alteración de los materiales que conforman el acuífero puede ser muy grande, se trata del mismo efecto que tiene la agitación sobre la disolución de una sustancia cualquiera.

Modificación de la temperatura del agua: la temperatura determina el IS (índice de saturación) de los minerales que forman el acuífero y por tanto la cantidad máxima que el agua es capaz de disolver en situación de equilibrio, la temperatura además determina la solubilidad de los gases. En general cuanto mayor es la temperatura mas solubles son las sustancias iónicas, pero como se verá más adelante no siempre es así, y menos solubles son los gases.

Introducción de aditivos de acondicionamiento del agua: El poder agresivo o incrustante del agua no solo tiene efecto sobre el material que forma el acuífero, también sobre las conducciones y depósitos, para evitar estos efectos existe una gran cantidad de aditivos que pueden ser empleados y que modifican la calidad del agua.

En este apartado se hará una breve introducción a los procesos que pueden modificar la composición del agua y se harán recomendaciones para minimizar este efecto al mínimo posible con objeto de garantizar la calidad del agua y sus usos actuales o potenciales.

No obstante, antes de pasar a la parte principal del trabajo conviene definir adecuadamente alguno de los términos que van a ser empleados con frecuencia y que pudieran dar lugar a confusión:

Composición: Se entiende por composición del agua la descripción cuantitativa de las especies químicas que contiene en disolución o suspensión. La composición es una descripción objetiva que no entra en su adecuación a un uso concreto.

Calidad: La calidad describe, de forma mas o menos cuantitativa, la adecuación del agua a un uso concreto. Un agua es buena, mala, mediocre etc. para bebida, o para riego etc.

Contaminación: Contaminación es cualquier forma de materia o energía extraña a la composición natural del agua. El termino contaminación hace referencia al origen del agua pero no necesariamente a su calidad, un agua puede estar contaminada pero ser adecuada para cualquier uso y viceversa, puede ser de muy mala calidad pero no estar contaminada al tener esta un origen natural.

Afección (impacto): Se dice que el agua está afectada cuando existe una modificación en su composición debido a los efectos de una actividad potencialmente contaminante. El impacto siempre supone modificación en la composición y por tanto contaminación, pero no necesariamente empeoramiento de la calidad.

Riesgo: El riesgo es una medida de la probabilidad de afección.

2. Interacción de los sistemas de climatización con el medio subterráneo.

2.1 Composición típica de las aguas subterráneas en la ciudad de Zaragoza.

Se muestra en este apartado una visión sucinta de las características más generales de la composición del agua subterránea captada en la ciudad de Zaragoza resaltando aquellos parámetros relevantes desde el punto de vista de los sistemas SAC.

Aunque la variabilidad en la composición de las aguas subterráneas es, de forma general, muy amplia, las aguas captadas en la ciudad de Zaragoza muestran una composición relativamente homogénea debido principalmente a la fuerte impronta que les confiere el sustrato evaporítico que conforma el acuífero. En la figura 1 se ha representado mediante un diagrama de Piper con 49 muestras representativas.

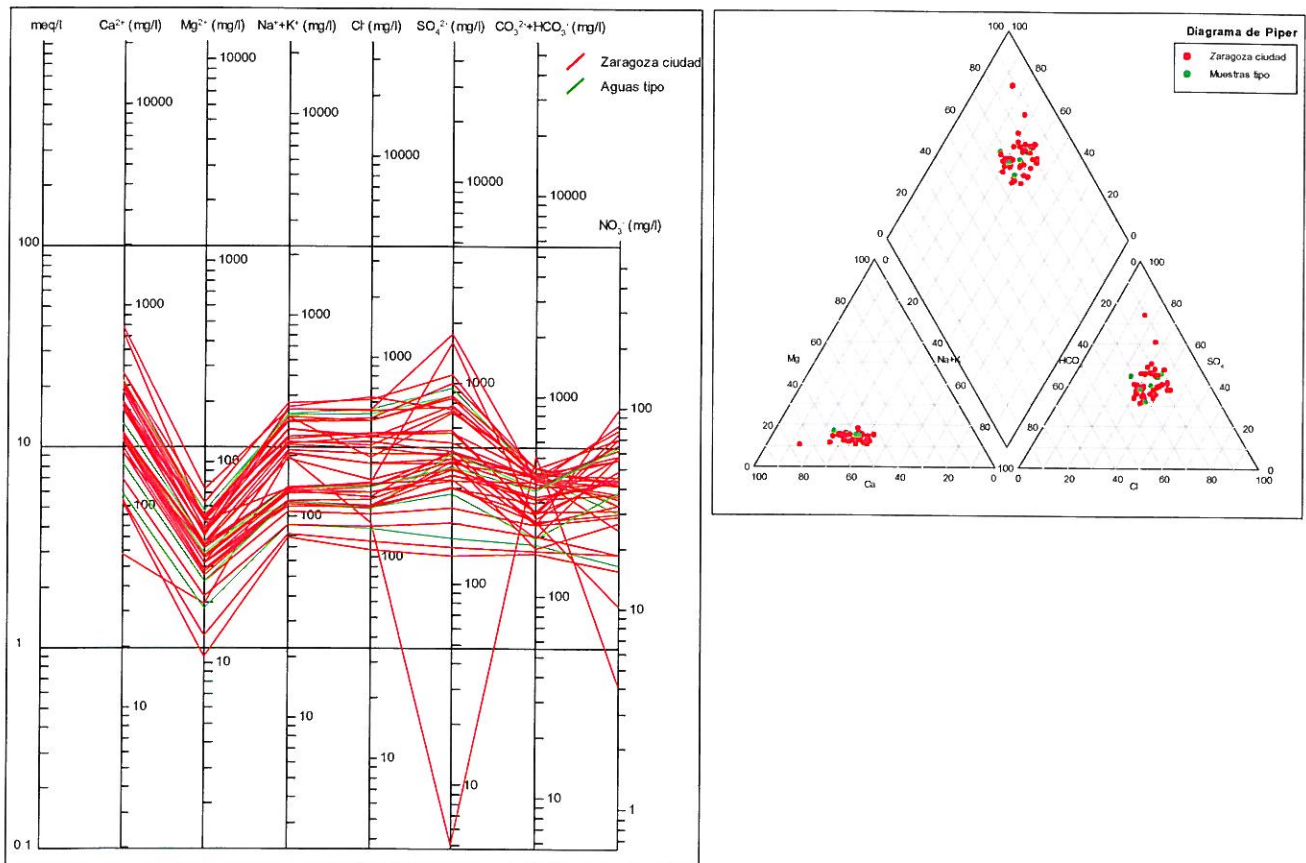


Figura 1.- Descripción de las características hidroquímicas básicas del agua subterránea de la ciudad de Zaragoza mediante diagramas de Schoeller-Berkaloff y de Piper.

Para poder interpretar estos diagramas hay que tener presente que la composición del agua subterránea en la ciudad de Zaragoza viene impuesta principalmente los siguientes factores:

Características de las aguas que recargan al acuífero aluvial del Ebro

Composición de las aguas del acuífero aluvial del río Gállego, que parcialmente deja su impronta de calidad en las aguas subterráneas de la margen izquierda al Ebro

Composición de las agua de regadío del Canal Imperial de Aragón, aguas superficiales del propio río Ebro derivadas en El Bocal (Navarra),

Transferencia subterránea de aguas del río Gállego a través de su aluvial

Otras aguas de recarga: escorrentías superficiales provenientes de los terrenos terciarios adyacentes o, incluso aportes subálveos salinos a través de materiales terciarios karstificados. Estos mecanismos no llegan más que a modificar muy localmente la calidad general.

En el entorno propiamente urbano resultan relevantes las fugas y pérdidas en las redes de distribución y saneamiento.

Pero son los materiales que forman parte del entorno geológico de los aluviales del Ebro y Gállego quienes determinan en gran medida la composición química del agua subterránea de Zaragoza. Las sales evaporíticas muy solubles, entre otras, yesos, cloruros de calcio y cloruros de sodio, dan lugar a aguas de elevada mineralización y pobre calidad general.

En vista de lo anterior se pueden pues distinguir claramente tres facies en las aguas subterráneas, aunque la primera es claramente dominante sobre el resto:

Sulfatada cálcica: Es la facies hidroquímica predominante, está relacionada con la presencia de rocas evaporíticas (yesos principalmente) de los materiales terciarios de la depresión del Ebro.

Clorurada cálcica: Se trata de una facies claramente minoritaria que únicamente la presentan siete puntos situados en su mayor parte en la margen izquierda.

Las facies sulfatadas y bicarbonatadas sódicas son muy escasas, se han encontrado en 3 y 1 punto respectivamente.

El grado de mineralización es mayor en la margen izquierda, esto se debe, posiblemente, a la influencia de aguas subterráneas del aluvial del Gállego, que tendrían un tiempo de residencia mayor en el acuífero y estarían, por tanto, más salinizadas. En la margen derecha, sin embargo, las aguas están menos mineralizadas, por provenir mayoritariamente del Canal Imperial, y porque las trayectorias del flujo subterráneo tendrían un recorrido sensiblemente más corto y rápido.

La principal característica de las aguas del aluvial es su elevada mineralización, con máximos en torno a 3.000-3.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los pH se encuentran siempre por encima de la neutralidad, en su mayoría entre 7,4 y 7,8 alcanzando en casos aislados las 8 unidades.

Desde el punto de vista de su uso industrial destaca que se trata de aguas ligeramente alcalinas, en ocasiones algo incrustantes. Además, según los criterios del DWAFS [4] los contenidos en cloruro y sulfatos son excesivamente elevados para la mayor parte de los usos sensibles. Así, elevadas concentraciones de Cl puede acelerar la corrosión, reduciendo así la vida útil del equipamiento o estructura a considerar. El grado de corrosión va a depender además de la acción no sólo de los cloruros, sino de otros cationes asociados como la concentración de carbonato cálcico y el pH. Los cloruros son particularmente agresivos con el acero, causando marcas o picotazos localizados; también puede dar lugar a la formación de depósitos de formas rugosas iridiscentes y cristalinos de Cd, Cu, Ag y baño/chapado de estaño en tanques. Por otra parte, el elevado contenido en sulfatos puede dar lugar a precipitación de sulfato cálcico en los sistemas de refrigeración, provocando daños en equipamientos; hay que tener en cuenta que la solubilidad del yeso aumenta con el pH y se ve poco afectada por la variación de la temperatura. La alta concentración de los sulfatos puede producir el crecimiento de organismos sulfato-reductores, lo que puede ocasionar corrosión microbiológicamente inducida (MIC). Altas concentraciones de sulfatos pueden potenciar la degradación de estructuras de hormigón.

2.2 Parámetros sensibles: T^º, oxígeno disuelto, CO₂.

Centrándonos en la afección a la composición del agua subterránea, el proceso SAC en circuito abierto interacciona con el medio según se presenta en la figura 2.

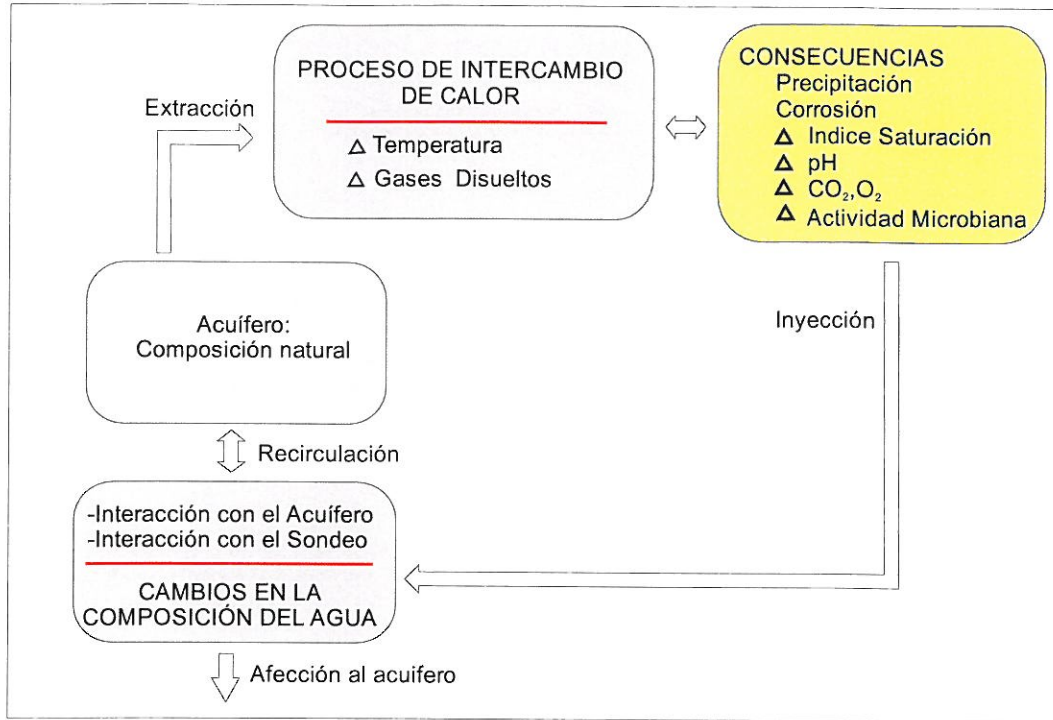


Figura 2.- Representación esquemática de la interacción entre un sistema SAC y el medio subterráneo.

El sistema SAC produce en primer lugar un cambio en la temperatura del agua y de forma inmediata en el equilibrio de los gases en disolución, los más relevantes son el O₂ y CO₂ pues de ellos depende la agresividad del agua así como la capacidad de incrustación. A estas variables les hemos llamado “parámetros sensibles” pues son las primeras en verse afectadas y la consecuencia de todo la cadena de procesos subsecuente. La temperatura de la solución determina no solo la solubilidad de los gases, también la de los sólidos.

En el caso de los gases, la solubilidad disminuye con el aumento de la temperatura, debido a la mayor tendencia que tiene el gas a expandirse. Según enuncia la ley de Henry, a temperatura constante, la cantidad disuelta en un líquido determinado es directamente proporcional a la presión parcial del gas en equilibrio con el líquido. Lo que expresado en notación matemática queda como:

$$p = k_H c$$

Donde p es la presión parcial del gas sobre la solución, c es la concentración del gas en la solución y k_H es la constante de Henry, una constante de proporcionalidad con unidades de presión/concentración. La solubilidad de un gas en un líquido puede expresarse mediante la constante de Henry cuyo valor es dependiente de la temperatura, generalmente aumenta según aumenta la temperatura y como consecuencia la solubilidad de los gases desciende.

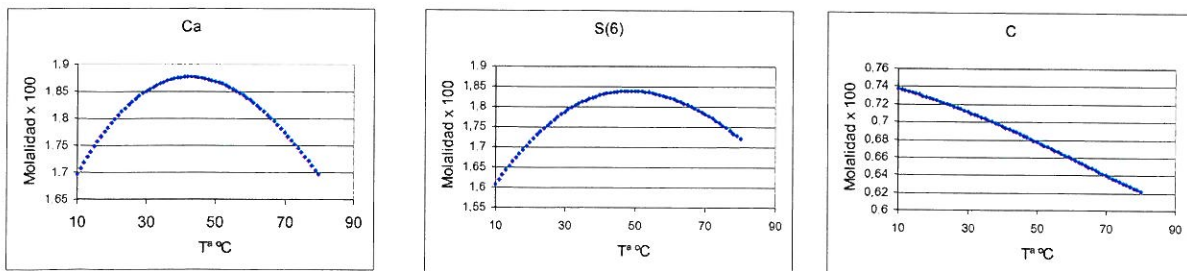


Figura 3.- Evolución frente a la temperatura del contenido en calcio, azufre del sulfato, y carbono de los carbonatos de un agua subterránea tipo de las captaciones en la ciudad de Zaragoza en equilibrio con la atmósfera y los minerales yeso y calcita.

Por su parte, de forma general, el aumento de la temperatura provoca un aumento de la solubilidad de los sólidos en líquidos, aunque existen casos donde la solubilidad sufre una pequeña variación e incluso casos donde al aumentar la temperatura la solubilidad disminuye. El carácter polar o apolar de la sustancia influye mucho, ya que, debido a estos la sustancia será más o menos soluble.

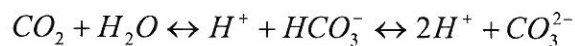
Además, la cinética de las reacciones que se producen en el seno de una disolución, depende de la temperatura. La constante de velocidad y por tanto la velocidad de una reacción, aumenta si aumenta la temperatura, porque la fracción de moléculas que sobrepasan la energía de activación es mayor. A mayor temperatura hay un mayor porcentaje de moléculas con energía suficiente para producir la reacción, puesto que las reacciones químicas se producen por los choques eficaces entre las moléculas de reactivo, tanto en la dirección adecuada, como con una energía mínima requerida.

La variación de la constante de velocidad con la temperatura viene recogida en la ecuación de Arrhenius.

$$K = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

Donde: A es el Factor Preexponencial o Factor de frecuencia que depende de la geometría de la molécula, E_a es la Energía de Activación, R la Constante Universal de los Gases y T la temperatura en grados Kelvin.

A modo de ejemplo se presentan las reacciones de equilibrio que regulan el equilibrio de disolución de carbonato y sulfato cálcicos



$$K_{PS} = [Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}] = 10^{-4.5}$$

Los precipitados de calcio, que son los de mayor consideración, se puede prever con el índice de saturación de Langelier, según el cual el calcio precipita en forma de carbonato cuando alcanza su límite de saturación en presencia de bicarbonato. Todas las aguas con valores positivos requieren medidas preventivas. El índice de saturación de Langelier indica el valor que debe tener el pH del agua para que dicho índice sea cero.

El carbonato cálcico es muy soluble en medio ácido, hay que controlar el pH del agua, ya que la forma de la especie carbonatada depende en gran medida de este valor.

El yeso es ligeramente soluble en el agua, $13,7 \cdot 10^{-3}$ mol/L a 25°C y presión atmosférica; Partridge and White, 1929). Su solubilidad muestra una dependencia positiva con la temperatura en aguas frías, llegando a un máximo alrededor de los 58°C y después decrece. (Posnjak, 1938). La solubilidad del yeso también tiene una variación positiva con la salinidad, pero la temperatura de máxima solubilidad, cerca de 58°C, no cambia significativamente. A presión atmosférica, la anhidrita es la fase termodinámicamente estable a temperaturas superiores a 56-58°C (Hardie, 1967; Blount and Dickson, 1973), pero por debajo de esta temperatura la anhidrita se vuelve inestable respecto al yeso. La disolución de la anhidrita por debajo de los 58°C aporta ión calcio e ión sulfato, dejando el agua ligeramente sobresaturada en yeso y provocando su cristalización.

De todo lo anteriormente expuesto se deduce que, desde la perspectiva de los parámetros analizados, para proteger la calidad del agua subterránea es necesario:

- Evitar la aireación del agua. La aireación aumenta el contenido en oxígeno disuelto y con ello la agresividad del agua.

- Evitar la desgasificación que puede ser causa de pérdida de CO_2 disuelto y con ello de formación de precipitados de carbonatos insolubles.
- Reducir el salto térmico de forma que el índice de saturación de las especies disueltas no varíe y se produzcan fenómenos de disolución/ precipitación anormales.

2.3 Afección a la matriz sólida. Impacto sobre las características hidráulicas del acuífero

La solución acuosa una vez ha cumplido su función en el sistema de cambio de calor es reintroducida en el acuífero, entonces atraviesa el material poroso e interacciona con este de muy diferentes maneras:

- a) Disolviendo los materiales solubles en función de su coeficiente de solubilidad, hasta alcanzar un equilibrio entre las fases sólidas y en solución. Entre los minerales abundantes en la zona de estudio pueden citarse minerales salinos, como la caliza (CaCO_3), la dolomía o caliza dolomítica ($(\text{Ca,Mg})\text{CO}_3$), el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la halita (NaCl) y la carnalita (KCl), u otras sales menos solubles como la anhidrita (CaSO_4) etc. La disolución de este tipo de rocas, muy abundantes en el entorno geológico de Zaragoza, da lugar a aguas de elevada mineralización, que suelen generar problemas de calidad para la mayor parte de usos.
- b) Hidrolizando los materiales susceptibles de ello. La hidrólisis, literalmente rotura por el agua, es un proceso de descomposición de algunos minerales constituyentes de las rocas por acción de las moléculas de agua. La hidrólisis causa la solubilización de minerales que de otra forma quedarían siempre en la estructura de las rocas. Es el principal proceso de alteración de los silicatos, que son las estructuras minerales más abundantes en la naturaleza. La hidrólisis de silicatos da lugar a la formación de arcilla e iones en solución. La hidrólisis es un proceso muy lento pues el agua es un mal donador de H^+ se ve acelerada a pH ácidos.
- c) La hidratación. Con frecuencia la hidratación es el primer paso en el proceso de ataque a un mineral, se trata de un proceso químico en el que una sal más o menos higroscópica absorbe agua, por ejemplo, de la atmósfera que la rodea, incorporándola a su estructura. Las propiedades físico-químicas de las sales hidratadas son diferentes a las de las sales anhidras de las que proceden.
- d) Especies químicas tan importantes en la composición de las aguas subterráneas como Fe^{2+} , SO_4^{2-} , H_2S , CH_4 , procesos como la transformación del nitrato o de los vertidos de contaminantes orgánicos o de metales pesados e, incluso, los ciclos de los principales elementos necesarios para la vida (carbono, azufre, nitrógeno) están regidos por procesos de oxido-reducción. La oxido-reducción es un conjunto de reacciones químicas en las que se produce un transporte de electrones de una especie a otra, variando de esta manera su estado de oxidación.
- e) Ataque biológico. La actividad biológica, y en especial la descomposición de la materia orgánica, genera dióxido de carbono y ácidos orgánicos con gran capacidad de ataque a diversos minerales, sobre todo los constituyentes de rocas carbonáticas y como se ha visto en el apartado b) los ácidos aceleran notablemente los procesos de hidrólisis.
- f) Precipitando aquellas especies sólidas que se encuentran por encima del coeficiente de solubilidad.

Los procesos anteriormente descritos pueden a su vez modificar las características hidráulicas del acuífero a través de dos mecanismos:

- a) Los procesos de disolución e hidrólisis, aumentan la permeabilidad debido al incremento de la porosidad secundaria. Un caso extremo es el desarrollo de karst en sales muy solubles como los carbonatos o los yesos.

- b) La precipitación y el desarrollo bacteriano de especies que generan geles orgánicos, taponan los poros de la matriz del terreno o de los filtros de los sondeos.

La cinética y equilibrio de las reacciones de equilibrio entre la matriz sólida del terreno y el agua que la atraviesa son dependientes de la temperatura, de forma general a mayor temperatura más rápidas son las reacciones y en la mayor parte de las ocasiones más se desplazará el equilibrio hacia las fases sólidas disueltas. El comportamiento de los gases es diferente, el incremento de la temperatura disminuye su solubilidad y esto puede ser especialmente relevante en el desarrollo de procesos de incrustación.

Por tanto, desde la perspectiva de la alteración de las propiedades hidráulicas del acuífero es importante que el sistema SAC:

- No favorezca el desarrollo bacteriano, lo que es equivalente a que no introduzca nutrientes en el sistema y la elevación de temperatura se restrinja al mínimo posible.
- No induzca la precipitación de sales disueltas.
- No favorezca la disolución de la matriz sólida del terreno.

Este último punto es especialmente relevante en el caso de la ciudad de Zaragoza, y en general de las captaciones situadas sobre materiales muy solubles como carbonatos o yesos. **Lo ideal sería encontrar una solución de compromiso entre los beneficios de aumentar la porosidad secundaria, lo cual puede favorecer los caudales de extracción e inyección de los sondeos del sistema SAC, y la aparición, o aceleración de procesos de kárstificación, que puedan tener consecuencias no deseadas sobre la estabilidad de edificaciones y otras obras civiles. Así pues, como regla general y desde un punto de vista de seguridad el sistema se debe optar por evitar el aumento de los procesos de disolución.**

2.4 Empleo de aditivos

Cualquier aditivo añadido al agua del circuito cambiador de calor, implica la introducción en el medio de sustancias ajenas al mismo y por tanto su contaminación. El número de aditivos que pueden utilizarse por una u otra razón es grande, pero los más frecuentemente empleados son (se pone alguno a título meramente orientativo):

Correctores del pH: Hidróxido sódico al 20%, ácidos clorhídrico y sulfúrico,

Anti-incrustantes: Solución ácida o alcalina acuosa de sal inorgánica y fosfato, solución acuosa de compuestos amínicos y solución de polímero/fosfato.

Agentes quelantes: ácidos policarboxílicos como el EDTA

Biocidas: Hipoclorito sódico.

Secuestradores del oxígeno: solución de derivados de hidracina, sulfito de sodio catalizado, nitritos.

La norma genérica debería ser prohibir el uso de aditivos químicos en cualquier agua que vaya a ser reintroducida en el acuífero. Pero, en el caso de aceptar el empleo de aditivos ajustarse a las siguientes recomendaciones:

- Utilizar únicamente los aditivos estrictamente necesarios y en las cantidades mínimas para cumplir con su función
- En caso de emplear aditivos estos no deben ser tóxicos.
- Los aditivos empleados no deben formar compuestos tóxicos en su reacción con otras especies químicas del medio.
- De preferencia han de ser biodegradables.
- Evitar emplear sustancias que puedan favorecer el crecimiento bacteriano
- Emplear como aditivos sustancias cuyos productos de degradación sean inertes y atóxicos
- Tener siempre en consideración que a pesar de emplear dosis muy bajas dado el gran volumen de agua que se trata la masa total de aditivo vertida al medio puede ser grande.

Recordar en este punto las tablas de las sustancias que se consideran contaminantes según el Anexo III del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio

Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI, VII, VIII del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

2.5 Aspectos relacionados con la actividad microbiana

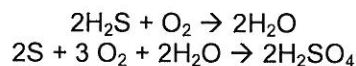
Uno de los principales problemas que pueden desarrollarse a consecuencia de la inyección de agua caliente en los acuíferos es la modificación de las tasas de crecimiento bacteriano y la colmatación de los sondeos de inyección debido a la acumulación de geles de origen biológico. En este apartado se explica la dinámica de estos procesos.

El crecimiento incontrolado de microorganismos en el sistema SAC puede tener consecuencias negativas, tanto sobre el rendimiento del sistema (disminución de la permeabilidad de los sondeos de extracción e inyección, corrosión de las conducciones) como sobre el propio acuífero al inducir reacciones de interacción entre el agua y la matriz diferentes a las esperables en condiciones normales. Además es sabido que las bacterias son responsables de muchos de los procesos de corrosión frecuentes en los circuitos de cambio de calor que emplean el agua como fluido. En este apartado se prestará atención únicamente a los efectos sobre la calidad del agua y el acuífero.

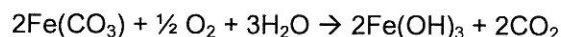
En los circuitos de refrigeración [2] pueden encontrarse fundamentalmente dos grandes grupos bacterianos desde el punto de vista de su interacción con el sistema:

a) Las bacterias que al formar una cápsula gelatinosa causan problemas de colmatación de los filtros. Además estas cápsulas son capaces de retener partículas muy finas aislándolas del medio. Entre otros géneros podemos encontrar *Flavobacterium*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Serratia* o *alcaligenes*.

b) bacterias causantes de la corrosión. En este grupo se engloban tanto las bacterias productoras de ácidos, del género *Thiobacillus* que obtienen energía oxidando el sulfuro (S^{2-}) a azufre elemental (S^0) y este oxidándolo hasta producir ácido sulfúrico:

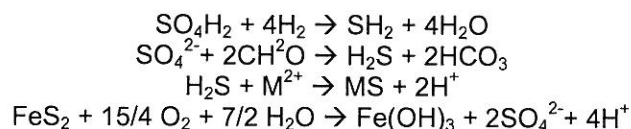


c) Las bacterias del hierro (ferrobacterias). Son bacterias que necesitan la presencia de oxígeno para desarrollarse, son capaces de obtener energía oxidando el hierro ferroso (II) en férrico (III).

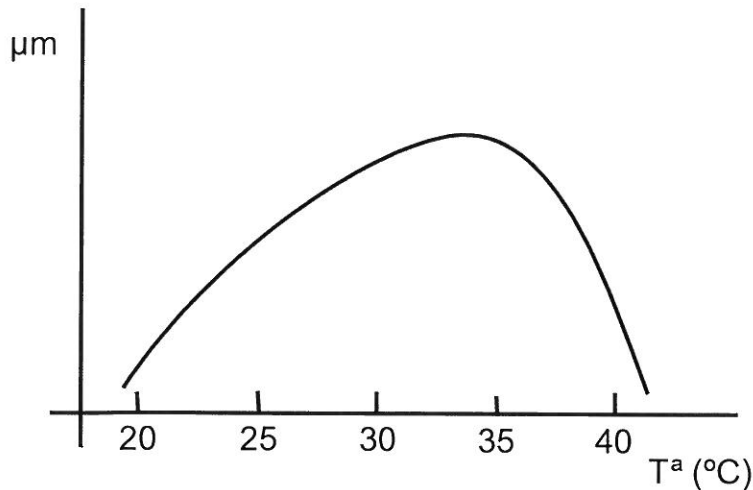


El consumo de oxígeno da lugar a condiciones reductoras que favorecen la proliferación de bacterias sulfato-reductoras.

d) Bacterias sulfato-reductoras. Son organismos anaerobios que emplean el sulfato como aceptor electrónico produciendo como desecho metabólico ácido sulfúrico. Se han descrito 18 géneros bacterianos con esta capacidad (*Campylobacter*, *Desulfuromonas*, *Desulfovibrio*, *Desulfobacterium* etc). Su distribución es muy amplia. Encuentran su pH óptimo entre 5,5 y 9,5 unidades, además, el rango de temperatura óptimo, muy dependiente de la especie concreta, es muy amplio, entre 10 y 60°C. Son además muy adaptables a la variación de las condiciones ambientales. A continuación transcriben alguna de las reacciones que permiten comprender el metabolismo de estas bacterias:



Hay que considerar pues que el desarrollo bacteriano está ligado a la temperatura del medio en que viven dichos microorganismos. La influencia de la temperatura sobre la velocidad de desarrollo bacteriano es complejo [1], por un lado cada reacción química individual, de todas las que conforman el metabolismo, es afectada por la temperatura, por lo que un incremento de ésta resulta en una mayor velocidad de reacción. Esto se traduce en un aumento de la tasa de crecimiento bacteriano con la temperatura. Por otra parte, aumentos de temperatura por encima de un determinado límite



inactivan las enzimas que catalizan las reacciones, con lo que el valor de μ_m decrece rápidamente. La temperatura óptima resulta de la interacción de estos dos efectos. En la figura 4 se presenta un ejemplo del aspecto que tienen las curvas μ_m/T^a (variación de la velocidad de crecimiento con la temperatura) para un organismo mesófilo típico.

Como regla general, se ha observado que los microorganismos psicrófilos poseen temperatura óptima de crecimiento que se sitúa entre 10 y 20 $^{\circ}\text{C}$, los mesófilos entre 30 y 40 $^{\circ}\text{C}$ y, finalmente, los

termófilos entre 50 y 60 $^{\circ}\text{C}$.

Figura 4.- Efecto de la temperatura sobre la velocidad de crecimiento para organismos mesófilos

Por otro lado, el medio subterráneo es un medio oligotrófico, siendo el fósforo y la materia orgánica los principales factores limitantes en cualquier tipo de agua, por tanto, al ser las bacterias organismos heterótrofos normalmente no se encuentran poblaciones muy desarrolladas en este medio. Pero en esquemas de circulación forzada se produce una renovación continua del agua y un aporte continuo de nutrientes lo que trae consigo un crecimiento de la masa bacteriana mucho mayor que en condiciones típicas de circulación muy lenta del agua subterránea, si en este esquema de funcionamiento se añade una fuente de carbono, como puede ser la contaminación por aguas residuales o de infiltración rápida desde el suelo, las tasas de crecimiento se pueden disparar varios órdenes de magnitud.

Un problema añadido es que el metabolismo bacteriano da lugar a la producción de CO_2 , ácidos orgánicos débiles (acético, láctico etc) sustancias todas ellas que confieren acidez al agua y por tanto son responsables de un aumento de la capacidad de corrosión de la misma.

Existen pues una serie de recomendaciones básicas para evitar o al menos paliar los problemas inducidos por el desarrollo bacteriano incontrolado en los sistemas SAC:

- Evitar la entrada de agua con elevado contenido en nutrientes de niveles superiores contaminados, en especial los relacionados con fugas de la red de alcantarillado o la infiltración rápida de aguas superficiales.
- Evitar la entrada de agua contaminada con fertilizantes agrícolas, en especial los de origen orgánico, comúnmente empleados en los jardines urbanos.
- Restringir al máximo el incremento de temperatura.
- Evitar el uso de fuentes de nutrientes en los aditivos de construcción de las instalaciones o de mantenimiento de las mismas, por ejemplo aditivos orgánicos o fosfatos como lodos de perforación
- Ligado al punto anterior, asegurar un correcto desarrollo y limpieza de los sondeos, especialmente el de inyección, antes de su equipamiento y puesta en servicio.

2.6 Otros aspectos importantes

Un aspecto importante en el diseño de las instalaciones SAC es la minimización de la tasa de recirculación de agua entre los sondeos de extracción y de inyección pues la existencia de recirculación puede disminuir sensiblemente el rendimiento del sistema. Esta optimización también es importante desde la perspectiva de la calidad del agua, básicamente por dos motivos: disminuye el salto térmico, y evita la creación de canales de circuito cerrado que favorecerían la disolución de la matriz al forzar el flujo. Por tanto se plantea como recomendación importante:

- Diseñar el sistema de forma que se limite al máximo la tasa de recirculación, esto no solo optimiza el rendimiento térmico del sistema sino que además disminuye el impacto sobre la calidad del agua.

3 Vigilancia y control

El seguimiento estricto de las recomendaciones expuestas en los apartados anteriores debe asegurar un mínimo impacto sobre la calidad del agua, no obstante, siempre que se trabaja en el medio natural, y mas en el subterráneo, que está oculto a la observación directa, pueden producirse fenómenos inesperados o accidentes que es preciso controlar. Básicamente es necesario diseñar un sistema de control que permita hacer frente los siguientes posibles problemas:

- Inadecuada gestión del sistema, por ejemplo empleo de aditivos no autorizados, salto térmico excesivo etc
- Fallo en la estructura de los pozos, tanto el de extracción como el de inyección. Un caso típico sería el fallo en el aislamiento de niveles superiores contaminados por fugas en la red de alcantarillado.
- Contaminación inesperada del sistema por aguas de fugas de alcantarillado, retorno de riegos con excesiva carga de nutrientes etc.
- Conexión con sistemas de flujo no controlados
- Procesos de disolución excesiva de la matriz no previstos en especial cuando puedan suponer desarrollo de procesos de karstificación.
- Colmatación de la matriz o del empaque de gravas.

3.1 Parámetros y protocolos de control (frecuencias y métodos de muestreo, análisis en campo y en laboratorio).

a) En los sondeos de extracción e inyección.

Se propone pues que el sistema de vigilancia del correcto funcionamiento del sistema SAC, se base en las siguientes acciones:

- Definición de los puntos de control.* Al menos se tomarán muestras en los sondeos de extracción e inyección en una toma diseñada específicamente para la toma de muestras situada lo más próxima posible al cabezal de bombeo.
- Establecimiento de un panel de indicadores físico-químicos de control.
 - Parámetro físico químicos: Tª, pH, Eh (potencial redox), C.E. (Conductividad eléctrica), alcalinidad.
 - Parámetros químicos:
 - Oxígeno disuelto, CO₂
 - Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃, CO₃, P
 - Fe, Mn, SiO₂
 - MO (material orgánica)
 - Compuestos susceptibles de ser empleados como aditivos en el caso de que se estime necesaria su determinación, por ejemplo: Cloro libre, aditivos fosforados etc.
- Se debe establecer un control sistemático de la evolución en el agua del sondeo de inyección de los índices de saturación de las fases "sensibles" en especial los sulfatos (yeso, anhidrita), los carbonatos (calcita, aragonito) y de la sílice.
- Un protocolo de muestreo que incluya: frecuencia de muestreo, técnicas de toma de muestra, conservación y transporte de las mismas, técnicas analíticas recomendadas y normas para la presentación de informes y resultados.
- Se debe además monitorizar los rendimientos de los sondeos comprobando si aumentan o disminuyen los caudales para unas mismas condiciones de extracción inyección (potencia de las bombas, carga hidráulica, etc).

b) Vigilancia y control en el acuífero.

La mejor manera de controlar el impacto real sobre el acuífero es localizar, o construir, un sondeo piezométrico, aguas abajo del bombeo de inyección, a una distancia que garantice que se encuentra dentro del radio de influencia del sondeo de inyección. En este sondeo, con una frecuencia de muestreo al menos semestral, se harán las mismas determinaciones que en los sondeos de extracción e inyección.

Es preferible que este sondeo sea construido ex profeso de forma que las características constructivas del mismo garanticen que se muestrea el agua procedente del sistema SAC, en especial hay que situar los tramos filtrantes y los tramos cementados en una situación equivalente a los de los sondeos del sistema.

Referencias

[2] Andrés Aznar Carrasco. *Técnica de aguas. Problemática y tratamiento*. 2ª ed. 1997. Editorial Alción. Madrid

[1] <http://www.biologia.edu.ar/microind/crecimiento%20bacteriano.htm#Efecto%20del%20pH>

[3] Gabriel Bitton, Charles P. Gerba. *Ground water pollution microbiology*. 1987. John Wiley & Sons.

[4] Department of Water Affairs and Forestry de Sudáfrica (1996). South African Water Quality Guidelines. Volume 3- Industrial Use (2ª edición). [www.dwaf.gov.za/iwqs/wq_guide/industrial.pdf]