

Definición del factor de relajación para la gestión distribuida de recursos geotérmicos someros

Definition of the relaxation factor for the distributed management of shallow geothermal resources

Alejandro García Gil¹, José Ángel Sánchez Navarro², Eduardo Garrido Schneider¹, Isabel Gimeno Pérez³, Antonio Pérez García² y Jesús Mateo Lázaro²

¹ Instituto Geológico y Minero de España. Unidad de Zaragoza. Manuel Lasala 44, 9ºB 50006, Zaragoza, España. agargil@unizar.es, egarrido@igme.es

² Departamento de Ciencias de la Tierra Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España. joseange@unizar.es, anperez@unizar.es, jesusmateo@eid.es

³ Dirección General del Agua, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente. Pº. Infanta Isabel 1, 28014, Madrid, España. igimeno@magrama.es

ABSTRACT

A new methodology is proposed based on the thermal impact estimation using a groundwater and heat transport model which, combined with the definition of a relaxation factor, allows the approval of new exploitations in an organized and distributed way. This new methodology will make a step further into a clear legislative framework and a scientifically motivated concession protocol for new shallow geothermal exploitations. This paper presents an example of application of this methodology and the different potential advantages of its implementation are discussed. New indicators of the groundwater quality from a thermal point of view are proposed.

Key-words: Shallow geothermal energy, low temperature geothermal resources, resources management.

RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología basada en la evaluación de impactos térmicos mediante un modelo numérico de flujo de agua subterránea y transporte de calor, que combinado con la definición de un factor de relajación permite la concesión de nuevas explotaciones de forma ordenada y distribuida en zonas urbanas. Ello contribuye hacia una normativa clara y un protocolo científicamente motivado para la concesión de derechos de explotación y así evitar la "ley del primero en llegar, primero en servirse". A modo de demostración, se ofrece un ejemplo de la aplicación de la metodología propuesta y se discuten las posibles ventajas de su implementación así como la propuesta de nuevos indicadores para evaluar el estado de calidad del agua subterránea desde un punto de vista energético.

Palabras clave: Geotermia somera, geotermia de baja entalpía, gestión recursos geotérmicos someros.

Geogaceta, 60 (2016), 91-94
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 8 de febrero de 2016
Revisión: 20 de abril de 2016
Aceptación: 20 de Mayo de 2016

Introducción

Se espera que la demanda de energía geotérmica somera siga creciendo en zonas urbanas como medio para conseguir una climatización económica de edificios a la vez que respetable con el medio ambiente. No obstante, este sector se encuentra en la actualidad enfrentándose a una serie de dificultades o barreras que afectan al desarrollo de esta tecnología (Jaudin, 2013). La primera barrera haría referencia a la sostenibilidad energética de las instalaciones ante la existencia de interferencias térmicas, es decir, a la necesidad de una adecuada gestión térmica de estos recursos. La segunda barrera deriva de un impreciso o inexistente marco legal, que produce una considerable incertidumbre en

los usuarios, un tema especialmente sensible si se tiene en cuenta que el periodo de amortización de esta tecnología es elevado. Como respuesta a esta problemática, se propone un modelo de gestión basado en la evaluación de impactos térmicos combinada con la definición y utilización de un *factor de relajación*, que estará en función de los recursos geotérmicos del acuífero que se reserven para otros usuarios.

Definición del *factor de relajación*

El subsuelo presenta una temperatura estable cuasi-isoterma, lo que se puede denominar temperatura de fondo (T_B), que es representativa de la mayor parte del terreno y que suele tener una magnitud de 1–2 °C

mayor a la temperatura media anual (Parsons, 1970). En un escenario de demanda predominante de refrigeración, como sucede en las principales ciudades del sur de Europa, la temperatura del agua subterránea tenderá a aumentar con el uso geotérmico del agua subterránea, alejándose así de la temperatura de fondo inicial. Consecuentemente, el rango de temperatura de explotación del acuífero ($T_{MAX}-T_B$) estará, en general, entre la temperatura de fondo del acuífero y una determinada temperatura máxima permitida en el acuífero establecida por la administración (T_{MAX}). Nótese que si se establece una temperatura máxima de vertido, queda inmediatamente definida T_{MAX} . Por otra parte, localmente, la temperatura del agua subterránea captada por un aprovechamiento

(T_{AS}), que idealmente debería ser la temperatura de fondo, suele ser superior a ésta en climas cálidos, debido al efecto de plumas de calor generadas por otros aprovechamientos (o por él mismo en caso de autointerferencia térmica). A la diferencia entre la temperatura máxima permitida en el acuífero y la temperatura del agua subterránea en un punto determinado del acuífero considerado, se le puede denominar rango de temperatura de explotación local ($T_{MAX}-T_{AS}$).

Conforme aumenta el número de explotaciones destinadas a la refrigeración en un entorno urbano, el rango de temperatura de explotación local se reduce respecto al rango teórico de temperatura de explotación del acuífero. Teniendo en cuenta que el coeficiente de rendimiento (COP) de las bombas de calor está directamente relacionado con la diferencia de temperatura entre el término fuente y el término sumidero, se entiende que el rango de temperaturas de explotación disponible en un punto del acuífero determinará el potencial geotérmico (PG) de ese lugar. Por lo tanto, la relación entre el rango de temperaturas de explotación local y el rango de temperaturas de explotación del acuífero podría entenderse como el porcentaje de potencial geotérmico local explotable en ese punto respecto al total explotable teórico. El porcentaje de potencial geotérmico local existente viene determinado por:

$$PG = \frac{T_{MAX}-T_{AS}}{T_{MAX}-T_B}$$

(1)

Siguiendo el mismo concepto, se ha definido el *Factor de Relajación (RF)* como el porcentaje, en tanto por uno, de los recursos geotérmicos del acuífero reservados para otros usuarios, y viene expresado por la relación entre el rango de temperaturas reservadas para uso de otros usuarios ($T_{RF}-T_B$) y el rango de temperaturas de explotación del acuífero ($T_{MAX}-T_B$):

$$RF = \frac{T_{RF}-T_B}{T_{MAX}-T_B}$$

(2)

Donde T_{RF} es el máximo valor de temperatura del agua de captación que se debería permitir en un aprovechamiento dado, y debe ser considerada como temperatura de diseño de todas las explotaciones. La administración es el órgano competente en asignar el valor del *factor de relajación* y de la temperatura máxima permitida (referida al punto de inyección o una distancia del mismo); ambos pará-

metros pueden estar definidos espacialmente basándose en criterios técnico-administrativos.

Los valores de T_{AS} por encima de T_B son debidos, en general, al impacto térmico generado por otro(s) aprovechamiento(s). Por ello, se define el *factor de relajación* directo (*DRF*) como factor indicador del impacto térmico producido por un aprovechamiento geotérmico conocido, que provoca un incremento de temperatura del agua subterránea (T_{AS}).

$$DRF = \frac{T_{AS}-T_B}{T_{MAX}-T_B}$$

(3)

Es posible que aparezcan nuevas explotaciones geotérmicas con el tiempo, de modo que se van acumulando *DRF* de distintas explotaciones.

Se ha definido el *factor de relajación* indirecto *IRF* como la suma de los *DRF* acumulados, representando por tanto un indicador de impacto acumulado. Cuando $IRF = RF$, se puede decir que el impacto producido por el resto las explotaciones es igual a los recursos geotérmicos que se habían reservado para estos. Una vez alcanzada esta situación, no se deberían permitir más impactos térmicos en el aprovechamiento considerado.

Para evitar que el RF se agote exclusivamente por una única explotación, es posible definir un máximo de *DRF* (DRF_{max}), de tal forma que los recursos se repartan de forma equitativamente distribuida entre los usuarios.

Aplicación del factor de relajación

Los índices arriba definidos se obtienen a partir de la evaluación de impactos, idealmente mediante un modelo numérico calibrado y permanentemente actualizado. A modo de ejemplo de aplicación, aquí se presenta un caso hipotético de un acuífero urbano donde inicialmente existe un aprovechamiento geotérmico que es impactado progresivamente por cuatro nuevos aprovechamientos geotérmicos.

Modelo numérico

Mediante el código FEFLOW (Trefry y Muffels, 2007) se ha modelizado el flujo de agua subterránea y flujo de calor en dominio de 3 x 5 km (Fig. 1). Las condiciones de contorno de nivel constante tipo Dirichlet para el flujo son de 15 m en el límite superior (línea roja en Fig. 1) y de 0 m en el límite inferior (línea azul). Para implementar los

aprovechamientos geotérmicos, se ha impuesto condición de contorno de caudal prescrito tipo Neumann de 60 L·s⁻¹ en los pozos de captación (puntos azules en Fig. 1) y reinyección (puntos rojos) de las 5 explotaciones. Las condiciones de contorno para el problema de transporte de calor son una temperatura prescrita de entrada de 17 °C (TB) en el límite superior y una temperatura prescrita de los caudales de inyección de 22 °C para todos los aprovechamientos. Los parámetros hidráulicos y de transporte de calor utilizados se presentan en la Tabla I. Se han realizado 5 simulaciones en régimen de flujo y transporte estacionario (Fig. 2) para evaluar el impacto de cada aprovechamiento (AP-1, AP-2, AP-3 y AP-4) en el aprovechamiento de referencia (*i*).

Cálculo de indicadores de impacto

Los resultados del modelo numérico han evaluado el aumento de la temperatura en el pozo de captación del aprovechamiento de referencia (*i*) a medida que van apareciendo nuevos aprovechamientos (Fig. 3A). Considerando una T_{MAX} de 27 °C, un $DRF_{max} = 0,15$ y un *factor de rela-*

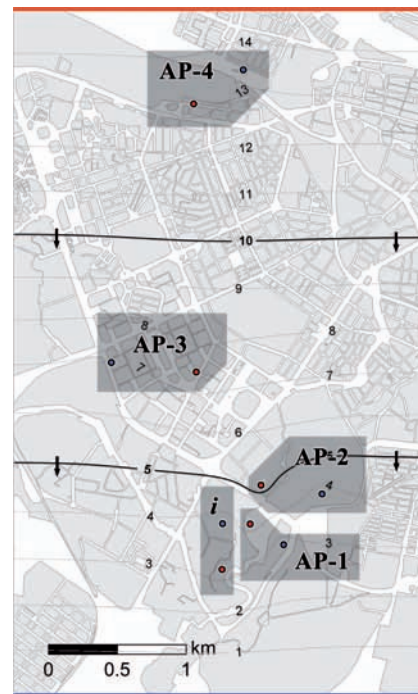


Fig. 1.- Modelo numérico sintético con las condiciones de contorno implementadas incluyendo 5 aprovechamientos geotérmicos someros. Ver figura en color en la Web.

Fig. 1.- Numerical model with boundary conditions used including 5 shallow geothermal exploitation systems. See colour figure on the Web.

jación de un 30% de los recursos ($RF = 0,3$) se puede obtener que T_{RF} es 20 °C mediante la ecuación 2, temperatura que nunca debería superar el pozo de captación de la explotación de referencia (*i*), ya que alcanzada esa temperatura dicha explotación ya habría compartido de forma solidaria el 30% del potencial geotérmico somero disponible.

En el momento en que entra en funcionamiento la instalación *i*, no existe ningún otro aprovechamiento en el acuífero, y se trata de un aprovechamiento pionero en el que la temperatura de captación es de 17,03 °C, lo que implica una autointerferencia térmica entre sus pozos de explotación de 0,03 °C. Este impacto debe ser considerado como DRF (ecuación 3) de 0,003. Aparece un nuevo aprovechamiento (AP-1) que produce un aumento de 1,17 °C en el pozo de captación *i*, que supone un DRF de 0,117 y el IRF es de 0,003. Con la puesta en marcha de un nuevo aprovechamiento (AP-2) se produce un aumento de temperatura adicional en el en el pozo de captación *i* que supone un DRF de 0,2, y el IRF acumulado es de 0,12, como la suma del DRF del aprovechamiento AP-1 más el impacto producido por la autointerferencia. De la misma forma, aparecen hasta dos aprovechamientos más AP-3 y AP-4. No obstante, el IRF acumulado al iniciar la explotación del aprovechamiento AP-3 es de 0,32, que es ligeramente superior al RF definido. Por lo tanto, el régimen de explotación del aprovechamiento AP-3 debería ser limitado para que

$IRF = RF$. En consecuencia, el aprovechamiento AP-4 no debería ser permitido, ya que el *Factor de Relajación* está completo y la administración debería proteger la captación del aprovechamiento de referencia para que no se produjeran más impactos en la misma. Dicha evolución de impactos puede ser seguida en la figura 3B. Nótese que, además, el aprovechamiento AP-3 produce un impacto directo excesivo, superando DRF_{max} y por lo tanto dicho aprovechamiento debería ser limitado también en este sentido.

Discusión

La primera consecuencia que se desprende de un modelo de gestión basado en la metodología propuesta es que aunque el aprovechamiento de referencia capte el agua inicialmente a la temperatura de fondo (17 °C), deberá estar diseñado para captar y funcionar adecuadamente a T_{RF} (20 °C), temperatura que podría alcanzarse por la utilización de los recursos geotérmicos someros por terceros. El uso de un *factor de relajación* supone la aceptación o no de una interferencia controlada. En función de la magnitud del mismo que se adopte, se permitirá una mayor o menor interferencia térmica. En el caso más conservador, el RF podría ser incluso cero, es decir, no se permitiría ninguna interferencia. En tal caso, aunque sería un sistema de gestión donde se aseguraría de forma extrema la no afección, no se repartirían de forma solidaria los recursos geotérmicos entre usuarios futuros o existen-

Parámetros	Valor
Transmisividad	3000 m ² ·d ⁻¹
Espesor saturado	15 m
Porosidad	30%
Capacidad calorífica fluido	4,2 MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹
Capacidad calorífica sólido	2,5 MJ·m ⁻³ ·K ⁻¹
Conductividad térmica fluido	0,65 W·K ⁻¹ ·m ⁻¹
Conductividad térmica sólido	2,9 W·K ⁻¹ ·m ⁻¹
Dispersividad longitudinal	5 m
Dispersividad trasversal	0,5 m

Tabla I.- Parámetros hidrodinámicos y térmicos utilizados en el modelo numérico.

Table I.- Hydrodynamic and thermal parameters used in the numerical model.

tes. En el otro extremo, factores de relajación muy altos reducen los recursos geotérmicos disponibles, haciendo no atractivo el uso de esta tecnología renovable. Una postura moderada podría estar en $0,2 < RF \leq 0,4$.

La definición de un término DRF_{max} permite que el número de usuarios con los que se comparten los recursos sea mayor o menor. Cuanto menor sea DRF_{max} , mayor será el número de usuarios susceptibles de interactuar con los recursos reservados para terceros.

Entre los extremos a la hora de definir un RF y DRF_{max} existe un amplio rango de posibilidades, lo que demuestra la utilidad y flexibilidad de adaptación del *factor de relajación* propuesto para cualquier acuífero y comunidad de usuarios. No obstante, cabe resaltar que, en todo caso, independientemente de la

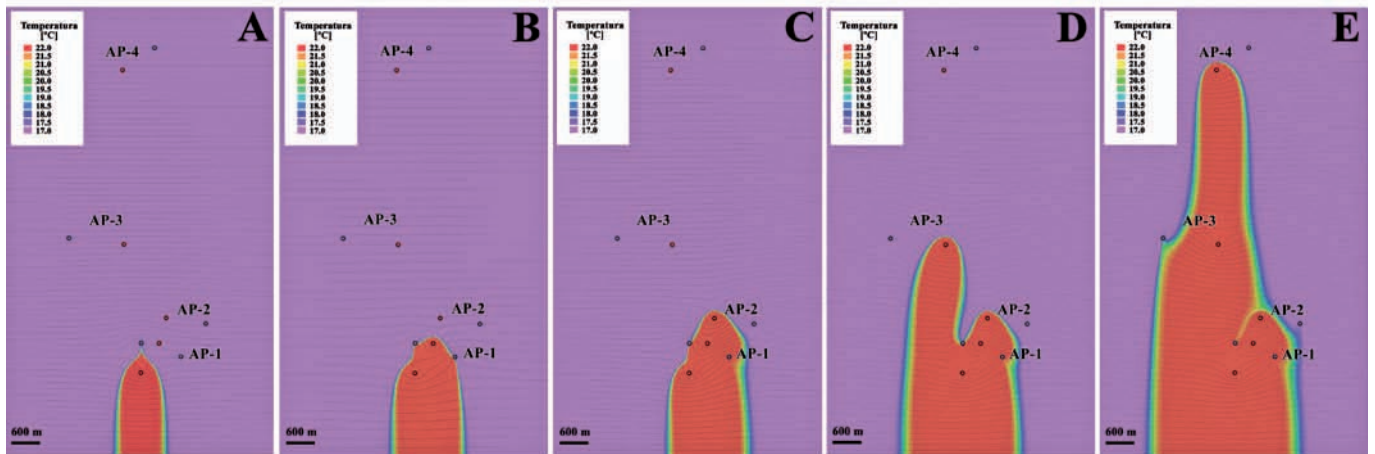


Fig. 2.- Resultados de la simulación numérica de las interferencias térmicas entre 5 aprovechamientos geotérmicos someros en un acuífero urbano. Se muestra la distribución de temperatura del agua subterránea para: A) un aprovechamiento de referencia en régimen permanente, B) la interacción del aprovechamiento AP-1 con el de referencia, C) la interacción de los aprovechamientos AP-1 y AP-2 con el de referencia, D) la interacción de los aprovechamientos AP-1, AP-2 y AP-3 con el de referencia y E) la interacción de los aprovechamientos AP-1, AP-2, AP-3 y AP-4 con el de referencia. Ver figura en color en la Web.

Fig. 2.- Results obtained from the numerical modelling of the thermal interferences between 5 geothermal exploitation systems in a urban aquifer. Ground-water temperature distribution is shown for: A) the reference exploitation system alone, B) the interaction of exploitation system AP-1 with the reference one, C) the interaction of exploitation system AP-1 and AP-2 with the reference one, D) the interaction of exploitation system AP-1, AP-2 and AP-3 with the reference one, and E) the interaction of exploitation system AP-1, AP-2, AP-3 and AP-4 with the reference one. See colour figure on the Web.

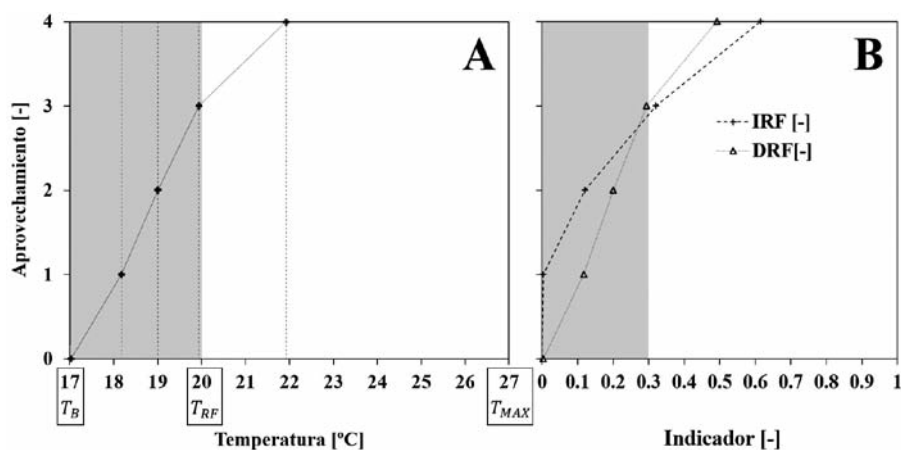


Fig. 3.- A) Evolución de la temperatura de captación en el aprovechamiento de referencia (*i*) a medida que aumenta el número de explotaciones en función de las temperaturas umbral definidas. B) Evolución de los indicadores de impacto DRF e IRF a medida que aumenta el número de explotaciones. En ambos casos la magnitud del RF queda expresada por un rectángulo gris.

Fig. 3.- A) Evolution of capture temperature in the reference exploitation (*i*) considering the temperature threshold values as the number of third party exploitations increases. B: Evolution of thermal impact indicators DRF and IRF as the number of third party exploitations increases. The IR magnitude is expressed as a grey rectangle in both cases.

magnitud del *factor de relajación*, se debería tener en cuenta la incertidumbre asociada a todo modelo numérico, que debe evaluarse para poner en práctica dicho modelo de gestión de recursos geotérmicos e implementar consecuentemente cierto factor de seguridad.

Las principales temperaturas umbral para definir los rangos de temperatura de trabajo son susceptibles de variar espacial y temporalmente. Por ejemplo, la existencia de pozos de captación de agua para abastecimiento urbano podría modificar estos rangos, limitándolos para garantizar un impacto nulo en estos puntos de interés general. En ese caso, dichos puntos sensibles pueden ser considerados por la metodología propuesta como si fuesen puntos de captación de otros aprovechamientos geotérmicos donde los recursos compartidos fueran nulos.

Por último, además de evaluar el impacto de un aprovechamiento en otro, los indicadores propuestos pueden servir de forma adicional como indicadores del estado de calidad del agua subterránea desde un punto de vista energético, como es el caso del IRF, que indica el impacto acumulado en una explotación. Si estos valores son representados para todos los puntos de explotación del acuífero, se obtiene una visión conjunta del estado de explotación del acuífero, siendo RF el valor de referencia para declarar un acuífero como sobreexplotado desde un punto de vista energético.

Conclusiones

Mediante la metodología propuesta, basada en la utilización del concepto de *factor de relajación*, se han propuesto los

criterios fundamentales para el proceso de concesión de explotaciones geotérmicas someras. Dichos criterios se basan en una gestión térmica sostenible útil para la distribución equitativa de los recursos geotérmicos de baja entalpía existentes en acuíferos urbanos. Se han desarrollado indicadores que posibilitan, tanto cuantificar el porcentaje de los recursos a compartir entre los usuarios, como aumentar o disminuir el número de usuarios susceptibles a compartir dichos recursos reservados. Estos indicadores, además de cuantificar los impactos térmicos entre explotaciones, son útiles para evaluar el estado de la calidad del agua subterránea desde un punto de vista energético.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del Convenio de Colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Confederación Hidrográfica del Ebro para el estudio del impacto térmico generado por los pozos de climatización en la ciudad de Zaragoza. Este trabajo ha sido financiado, en parte, por el proyecto de la Universidad de Zaragoza nº UZ2014-CIE-04.

Referencias

- Jaudin, F. (2013). *D2.2: General Report of the current situation of the regulative framework for the SGE systems*. RE-GEOCITIES, 50 p.
- Parsons, M.L. (1970). *Water Resources Research* 6, 1701-1720.
- Trefry, M.G. y Muffels, C. (2007). *Ground Water* 45, 525-528