



**Agència Catalana
de l'Aigua**



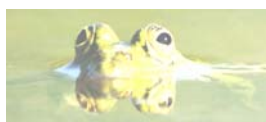
AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA

Documento de síntesis

GUIA "CLIMACA"

Climatización de edificios a partir de la energía del subsuelo (baja temperatura)

3 de marzo de 2010



Generalitat de Catalunya
**Departament de Medi Ambient
i Habitatge**



RESUMEN

La climatización de edificios por medio de **bombas de calor que realizan el intercambio de energía con el subsuelo, o sistemas geotérmicos**, es una técnica emergente debido a las ventajas de ahorro energético y económico que comporta (Sanner et al., 2003; Banks, 2008). En inglés, se denominan “Ground-source heat pumps” (GHP), término que suele traducirse como ‘*bombas de calor geotérmicas*’; pero esta traducción puede enmascarar el hecho de que un sistema geotérmico utiliza una bomba de calor convencional pero no hace el intercambio de energía con el aire o un fluido, sino que aprovecha las propiedades del subsuelo: gran volumen, inercia térmica, temperatura poco afectada por la superficie, menos oscilaciones, mayor rendimiento, existencia i flujo de agua subterránea.

Por ello, el **factor crítico a valorar es la viabilidad i sustentabilidad a futuro de una instalación geotérmica en función de la operación prevista i de las características del emplazamiento** elegido. Se diferencian dos tipologías (Figura 1):

Sistemas abiertos: se extrae agua subterránea (*única opción considerada en este documento*) como fluido para el intercambio de energía, y el agua calentada/enfriada (refrigeración/calefacción, respectivamente) tiene que ser gestionada, preferiblemente inyectándola al acuífero del que procede. La disipación del calor en el subsuelo se hace básicamente mediante los mecanismos de convección y conducción, de forma que puede causar afecciones hidráulicas i térmicas en el medio (Figura 2).

Sistemas cerrados: el fluido de los intercambiadores de las bombas de calor circula a través de un circuito sub(horizontal) o vertical de tubos. No captan agua subterránea, sino que aprovechan el mecanismo de conducción. El circuito puede alcanzar kilómetros de longitud total, dependiendo de la carga térmica a disipar. El método constructivo puede dar lugar a un impacto en el subsuelo (Figura 3).

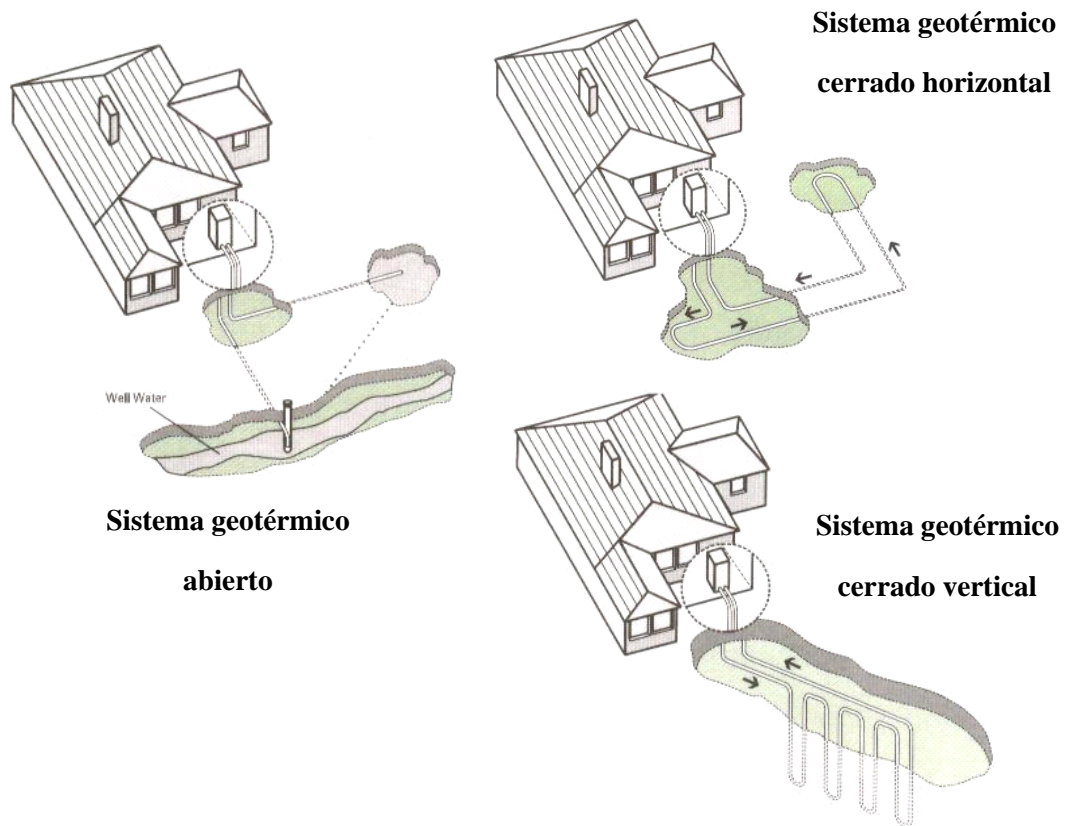


Figura 1. Esquema de funcionamiento de bombas de calor geotérmicas para climatización de edificios: a la izquierda, mediante un circuito abierto, que requiere agua (subterránea, en este ejemplo); a la derecha, por medio de un circuito cerrado horizontal (arriba) o vertical (abajo), que sólo intercambia energía con el subsuelo por conducción. Son figuras modificadas de las que aparecen en Natural Resources Canada's (2004).

Ante la proliferación de estos sistemas y a la falta de normativa y criterios técnicos, l'Agència Catalana de l'Aigua (*la Agencia*) impulsó la elaboración de una Guía con el fin de definir los permisos necesarios y garantizar la protección del medio y de terceros, la cual podrá contribuir a desarrollar futuras reglamentaciones. La denominada Guía "CLIMACA" se basa en una revisión de la normativa y de criterios técnicos en vigor en otros países, y contiene una evaluación de las técnicas analíticas y numéricas y de los códigos que pueden aplicarse para valorar la viabilidad de las instalaciones geotérmicas. Los proyectos in-situ de la Agencia ya realizados (BST) y en marcha (MDV) deberán contribuir a mejorar las propuestas de la Guía.

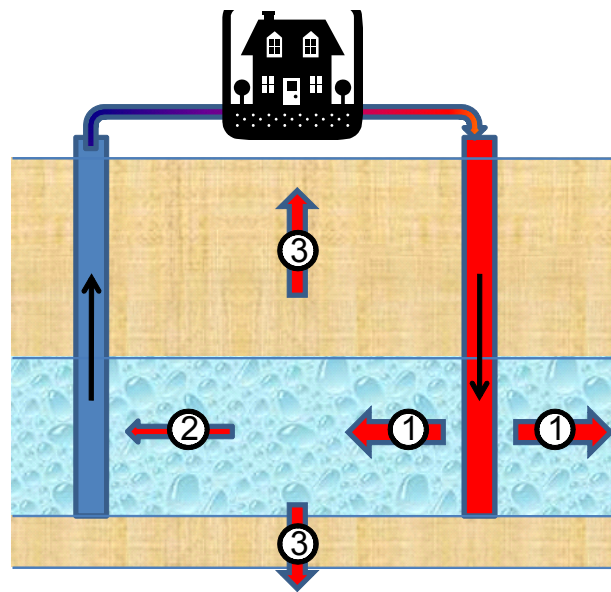


Figura 2. Mecanismos de transporte de calor en el subsuelo. En sistemas abiertos, la advección o convección (1) es generalmente el proceso dominante, pero puede haber problemas de recirculación en el pozo de extracción (2) y de conducción a través del suelo (3).

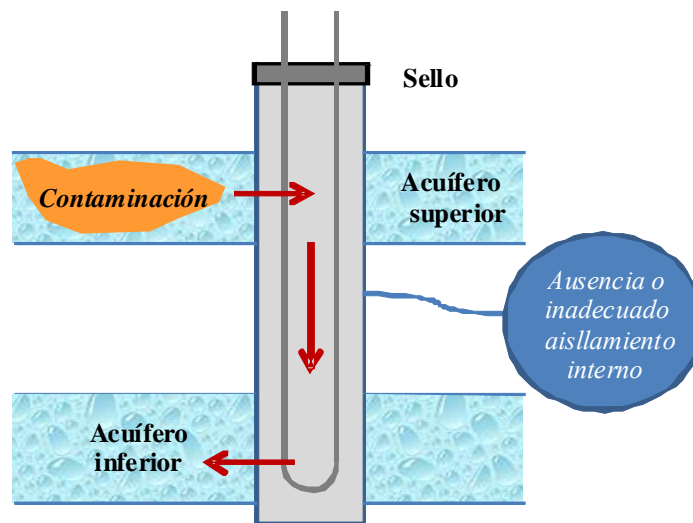


Figura 3. Algunos de los riesgos derivados de la instalación de sistemas cerrados.

La Guia CLIMACA fue elaborada por la consultoría hidrogeológica ENVIROS SPAIN SL (actualmente, AMPHOS XXI CONSULTING SL) bajo la dirección de la Unidad Técnica de de Concesiones de la Agència, en el marco del contrato CT06001578. La presenta Guía breve resume los datos y resultados considerados de mayor interés, y ha sido desarrollada por la Unidad Técnica de Concesiones, en fecha 3 de marzo de 2010. Cualquier consulta ha de ser dirigida a Alfredo Pérez-Paricio (aperezpa@gencat.cat).





ÍNDICE DEL DOCUMENTO

RESUMEN	3
1. REVISIÓN INTERNACIONAL: NORMATIVA	9
2. REVISIÓN DE criterios PARA sistemas abiertos	11
3. TRAMITACIÓN ADMINISTRATIVA PARA LA GEOTERMIA	13
4. TEORÍA DEL TRANSPORTE DE CALOR.....	15
4.1. Ecuaciones del transporte de calor	15
4.2. Soluciones analíticas de interés	16
5. APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE.....	21
6. SOSTENIBILIDAD DE LA GEOTERMIA DE BAJA T ^a : CRITERIOS	23
REFERENCIAS.....	25



1. REVISIÓN INTERNACIONAL: NORMATIVA

La conclusión principal de las consultas efectuadas a nivel internacional durante el período 2007-2008 es que **en pocos países existe legislación específica para instalaciones de sistemas geotérmicos abiertos de climatización** (Tabla 1).

Tabla 1. Normativa en los países estudiados.

EUA:	“Class V UIC study fact sheet”, de la Environmental Protection Agency (www.epa.gov): tiene apartados específicos para cada Estado (<i>shallow injection wells</i>). Se puede consultar las regulaciones para cada Estado en lo que respecta a las bombas de calor geotérmicas en: www.geoexchange.com .
Suecia:	Hay legislación específica y los documentos: <i>Normbrunn'97</i> i <i>Värmepumpar</i> de <i>Mijösamverkan</i> .
Francia:	La ley de aguas de 1992 limita la temperatura y se han desarrollado unas recomendaciones (AQUAPAC). También, existe la garantía AquaPAC, l'“Arrêté du 23 février 2001” y la “Méthodologie relative aux déclarations de mise en place des pompes à chaleur sur nappe en Ile-de-France”, de la ADEME.
Suiza y Austria:	Las bombas de calor son habituales. Han optado por desarrollar legislación específica para el uso del agua como fuente de energía, que no estaba disponible en el momento de cerrar esta Guía.
Alemania:	Tiene establecidos algunos estándares, pero el uso de sistemas abiertos es menos habitual y por ello la legislación más escasa. Se ha podido consultar el VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 4640 part 1, 2, 3 i 4.
Grecia y Rumanía:	Legislación inexistente para sistemas abiertos porque el uso de las bombas de calor es reciente y casi exclusiva de los sistemas cerrados.
Reino Unido:	Consta de tres documentos de la Environment Agency (Descripción, Marco técnico y Herramientas), más otro de Legislación que no es totalmente público. Consultable en: www.environment-agency.gov.uk .
Noruega:	Dispone de las actas en relación con el sector de las fuentes de energía y agua de Noruega del “Det Kongelige Olje- OG Energidepartement”, del “Royal Ministry of Petroleum and Energy”.

A nivel español, cabe destacar e importante esfuerzo que está llevando a cabo la Fundación para la Energía de la Comunidad de Madrid, con notables guías y material de interés (FENERCOM, 2007). Pero todavía no hay normas en vigor.



2. REVISIÓN DE CRITERIOS PARA SISTEMAS ABIERTOS

Tabla 2. Revisión comparada de los criterios técnicos usados en otros países para los sistemas geotérmicos abiertos.

GRADIENTE DE TEMPERATURA: <i>(diferencia máxima entre aguas extraídas e inyectadas)</i>	
NORMAS	Limitado a 11°C en Francia, a 6°C en Alemania, 3°C en Suiza y 0,5°C para el pozo de extracción en Dinamarca
CRITERIOS	Usualmente, en torno a 5° (Canadá y Austria). En Suecia, existe legislación pero no se especifica un límite
OTROS	En Idaho y Holanda, no se fija límite alguno pero se exige un estudio para verificar la viabilidad del sistema y crear una afección mínima al acuífero
UTILIZACIÓN DE ADITIVOS <i>(para limitar crecimientos bacterianos en el agua de inyección)</i>	
NORMAS	Está prohibida en general (Canadá, Delaware, Suecia, Suiza, Holanda...)
CRITERIOS	En otros países, se recomiendan algunas acciones preventivas (Suecia, Alemania y Holanda)
OTROS	En algunos casos, se puede obtener una derogación mediante un estudio y petición adecuada (Francia, Dinamarca, Idaho, Canadá)
ACUÍFEROS INVOLUCRADOS <i>(limitaciones relativas al agua extraída e inyectada)</i>	
NORMAS	Se exige utilizar un único acuífero (Canadá, Francia, Delaware, Missouri, Alemania, Suiza o Dinamarca). En Suecia, no hay limitaciones al respecto
CRITERIOS	En algunos casos (Idaho y Holanda) se recomienda preservar la calidad y cantidad de las aguas subterráneas

(sigue Tabla 2)

ÁREAS PROHIBIDAS <i>(zonas donde no se permite la instalación de bombas de calor con sistemas abiertos)</i>	
NORMAS	En muchos casos, se prohíbe instalar bombas de calor geotérmicas en zonas de suministro de agua potable y/o mineral (Alemania, Holanda...), o en zonas de protección como parques naturales (Francia...). Tampoco se puede construir en zonas contaminadas, o en aquellos lugares donde hay fosas sépticas (Estados Unidos o Suecia)
OTROS	En Francia, se requiere además un control del pozo de inyección de los parámetros siguientes: temperatura, presión, análisis del agua inyectada y del nivel freático. En Baviera (Alemania), existe una simplificación de la legislación cuando se utiliza las aguas subterráneas exclusivamente para calefacción y no para refrigeración

3. TRAMITACIÓN ADMINISTRATIVA PARA LA GEOTERMIA

Tabla 3. Propuesta de tramitación administrativa de los sistemas geotérmicos de climatización.

SISTEMAS CERRADOS	
Trámites ante l'Agència:	Hay que solicitar siempre autorización de obras antes de realizar las perforaciones La Agencia determinará si es necesaria autorización o no, en función del emplazamiento previsto
Requisitos constructivos:	Evitar contaminaciones cruzadas entre niveles permeables a diferentes profundidades durante y después de las obras de perforación y de la colocación del material de relleno alrededor de los tubos de intercambio geotérmico
SISTEMAS ABIERTOS	
Tramitación ante la Agencia:	Si los pozos no existen, es imperativo solicitar y obtener permiso de investigación previo , independientemente del volumen de extracción previsto Cuando los pozos ya están construidos, hay que solicitar y obtener concesión administrativa , procedimiento que incluirá tanto la extracción como el vertido (retorno) del agua, independientemente del volumen
Requisitos de diseño:	Presentar memoria o proyecto constructivo suscrito por técnico competente que incluya tanto la extracción (captación) como el retorno (vertido) del agua

NOTA: Se ha concebido unos formularios web de solicitud específicos para hacer los trámites descritos en la Tabla 3. Este planteamiento elimina la obligación de tramitar la captación i el vertido de forma separada en el caso de los sistemas abiertos, y puede simplificar los permisos para los sistemas cerrados.



4. TEORÍA DEL TRANSPORTE DE CALOR

El presente apartado resume los fundamentos del transporte de calor en el subsuelo, que viene gobernado, en ausencia de anomalías térmicas, por dos procesos: convección (debido al flujo del agua subterránea) y conducción (a través de los granos del suelo, en el que se basan los sistemas cerrados).

Entre la multitud de referencias consultables, destacan: Dwyer i Eckstein (1987), Diao et al. (2004) i Rafferty (2003). Mención especial merece el trabajo de Ferguson i Woodbury (2006), quienes demostraron que la distancia entre el pozo de extracción y el de inyección debe ser superior a un valor determinado –dependiente de las propiedades del medio i del caudal y salto térmico previsto– si se quiere garantizar la viabilidad de un sistema geotérmico abierto. La complejidad del problema (flujo de agua y transporte de energía) obliga en general a hacer cálculos numéricos, razón por la cual interesa citar los trabajos analíticos realizados por Uffink (1983) o Yang i Yeh (2008).

4.1. Ecuaciones del transporte de calor

El transporte de calor se puede escribir de la siguiente forma, donde la temperatura es la variable de estado (T , expresada en $^{\circ}\text{K}$):

$$\phi R \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(D \nabla T) - (q \nabla T) + \gamma_R \quad (\text{Ec. 1})$$

en la que intervienen 3 parámetros, denominados: factor de retardo, R (-); coeficiente de disipación, D ($\text{m}^2 \text{d}^{-1}$), y la conductividad térmica del acuífero, λ ($\text{J d}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$), los cuales están definidos mediante las ecuaciones siguientes:

$$R = 1 + \frac{(1 - \phi) \left(\frac{\rho_s c_s}{\rho_w c_w} \right)}{\phi} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$D = \alpha q + \frac{\lambda}{\rho_w c_w} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\lambda = (\phi \lambda_w) + ((1 - \phi) \lambda_s) \quad (\text{Ec. 4})$$

Las magnitudes que aparecen en las 3 ecuaciones anteriores son la densidad del agua, ρ_w (Kg m^{-3}) y del sólido, ρ_s (Kg m^{-3}), el calor específico del agua, c_w ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) y del sólido, c_s ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$); la porosidad, ϕ (-); el tiempo, t (d); la dispersión, D ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y la velocidad de Darcy, q (m d^{-1}). Además, puede haber un término de entrada o salida de energía al sistema, γ_R (J d^{-1}).

La ecuación (Ec. 1) puede adimensionalizarse para una mejor manipulación y comparación de resultados. Si se definen las denominadas variables adimensionales, que llevan el subíndice D, mediante el tiempo característico, t_c (d), la longitud característica, L_c (m), y la temperatura característica, T_c (K):

$$t_D = \frac{t}{t_c}, \quad L_D = \frac{x}{L_c} \quad \text{i} \quad T_D = \frac{T - T_0}{T_c - T_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

se obtiene la ecuación de transporte adimensional:

$$\frac{\partial T_D}{\partial t_D} = \frac{t_c}{L_c^2 \phi R} \left(\alpha q + \frac{\lambda}{\rho_w c_w} \right) \nabla^2 T_D - \frac{t_c q}{L_c \phi R} \nabla T_D \quad (\text{Ec. 6})$$

Se alcanza el estacionario cuando $t_D = 1$. Esto permite deducir los tiempos característicos de convección (t_{conv}) y de conducción (t_{cond}):

$$t_{conv} = \frac{L_c \phi R}{q} \quad t_{cond} = \frac{L_c^2 \phi R \rho_w c_w}{\lambda} \quad (\text{Ec. 7})$$

4.2. Soluciones analíticas de interés

La Tabla 4 sintetiza algunas de las soluciones analíticas que pueden ayudar en la determinación a priori del impacto/extensión de la pluma de calor en el acuífero. No obstante, son cálculos simplificados, teóricos, que no deben substituir en ningún caso otro tipo de análisis más completos, basados en datos reales de cada emplazamiento.

La Tabla 5 presenta ecuaciones de cálculo fácil que sirven como primera aproximación para cuantificar el avance del frente de calor en el subsuelo.

Tabla 4. Resumen de algunas soluciones analíticas de interés para el transporte de calor.

1. DIPOLO (inyecció en un pouzo y extracció en otro pouzo, mismo caudal Q)	
<p>Q (m³ d⁻¹): caudal</p> <p>b (m): espesor del acuífero</p> <p>L (m): distancia entre pouzos</p>	<p>Tiempo de recorrido de una partícula una distancia L:</p> $t_{TR} = \frac{\pi}{3} \frac{\gamma}{\rho_w c_w} \frac{L^2 b}{Q} \quad (\text{Ec. 8})$
2. COLUMNA SEMIINFINITA (inyecció constant de calor en un pouzo)	
<p>v (m d⁻¹): velocidad real (q/φ)</p> <p>T₀ (K): temperat. de inyecció</p> <p>x (m): distancia al pouzo</p>	$\frac{T(x,t)}{T_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left\{\frac{Rx - vt}{\sqrt{4RDt}}\right\} - \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{vx}{D}\right) \operatorname{erfc}\left\{\frac{Rx + vt}{\sqrt{4RDt}}\right\} \left(1 + \frac{Rx + vt}{\left(\frac{RD}{v}\right)}\right) + \sqrt{\frac{v^2 t}{\pi RD}} \exp\left(-\frac{vx}{D} - \frac{(Rx + vt)^2}{4RDt}\right) \quad (\text{Ec. 9})$

(sigue Tabla 4)

3. FRENTE RADIAL (inyección y extracción del mismo caudal en pozos distintos)

Q (m³ d⁻¹): caudal

T₀ (K): temperat.
inicial acuífero

r (m): distancia

T* (K): temperat.
de inyección

$$\left(\frac{T - T_0}{T^* - T_0} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r^2 - (r^*)^2}{2 \left[\left(\frac{4}{3} \alpha_L \right) (r^*)^3 + \left(\frac{\lambda}{A_T \rho c_w} \right) (r^*)^4 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$A_T = \left(\frac{\phi \rho_w c_w}{\gamma} \right) \frac{Q}{2\pi \phi b \rho_w} \quad r^* = (2A_T t)^{\frac{1}{2}}$$

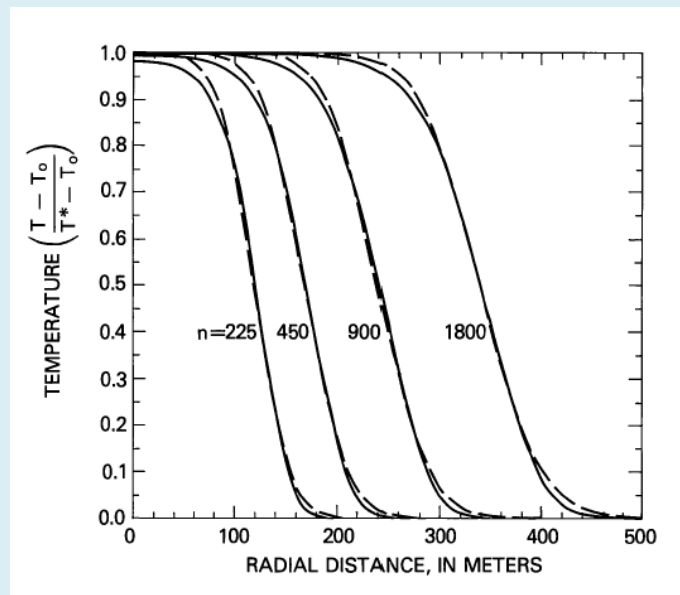


Tabla 5. Ecuaciones sencillas para una primera aproximación al transporte de calor.

1. Recirculación en sistemas abiertos	
<p>K (m d⁻¹): conductiv. hidráulica</p> <p>b (m): espesor del acuífero</p> <p>i (-): gradiente hidráulico natural</p>	$L < \frac{2 Q}{K b i} \quad (\text{Ec. 11})$ <p>Si la separación entre el pozo de inyección y el de extracción es inferior a la relación indicada, entonces se producirá afección térmica al pozo de extracción, o "reciclaje de calor"</p>
2. Velocidad (promedio) de transporte de calor	
<p>u* (m d⁻¹): velocidad de transporte de calor (promedio)</p>	$u^* = \frac{\rho_w c_w}{\rho_s c_s} v_D = \frac{\rho_w c_w}{\rho_s c_s} v \phi \quad (\text{Ec. 12})$ <p>El agua subterránea fluye desde el pozo de inyección al de extracción, pero el calor viaja más despacio. Esta ecuación es válida para acuíferos porosos, no para los fracturados.</p>
3. Tiempo de llegada del calor: Darcy	
<p>L (m): distancia</p> <p>Δh (m): diferencia de nivel</p>	$t = \frac{L}{v} = \frac{\phi L^2}{K \Delta h} \quad (\text{Ec. 13})$ <p>Aplicación convencional de la ley de Darcy.</p>
4. Tiempo de llegada del calor: Himmelsbach	
<p>Q (m³ d⁻¹): caudal</p>	$t = \pi \phi b \frac{L^2}{3 Q} \quad (\text{Ec. 14})$



5. APLICACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS DE TRANSPORTE

Se distingue tres métodos de resolución de la ecuación de transporte de calor, dependiendo de cómo se trate el término convectivo:

1. Seguimiento de partículas basado en métodos Eulerianos-Lagrangianos, como el Método de Características (MOC), el Método Modificado de Características (MMOC) i el Método Híbrido MOC/MMOC.
2. Diferencias finitas estándar en el tiempo, hacia delante (UFD, más estable) y centradas (CFD, más exacto). Es el único grupo de Métodos que pueden tratar el término convectivo de forma implícita o explícita en el tiempo (ponderado).
3. Método TVD.

Para resolver el transporte de calor con los códigos numéricos existentes de hidrología subterránea, hay que convertir los parámetros al transporte convencional de solutos, paso que requiere de ciertas manipulaciones. La Tabla 6 muestra la equivalencia de parámetros necesaria con un código numérico comercial ampliamente usado, el Visual MODFLOW.

Tabla 6. Equivalencia de parámetros de transporte de calor y soluto con Visual MODFLOW.

	<i>Transporte de soluto</i>	<i>Transporte de energía</i>
Porosidad	\emptyset	\emptyset
Retardo (R)	$1 + \frac{\rho_b k_d}{\phi}$	$1 + \frac{(1-\phi) \frac{\rho_s c_s}{c_w \rho_w}}{\phi}$
Coefficiente de difusión	Dm	$\frac{\lambda}{c_w \rho_w \phi}$
Dispersividad	α_L, α_T	α_L, α_T

La Tabla 7 resume las conclusiones de la comparativa realizada entre los códigos numéricos Visual MODFLOW (Harbaugh et al., 2000), TRANSIN (Medina et al., 2001) y SUTRA (Voss, 1984). Los tres permiten resolver el problema, aunque de manera sensiblemente diferente.

Tabla 7. Conclusiones de la comparativa de códigos numéricos.

Diferencias a tener en cuenta entre SUTRA, TRANSIN (TRAN) i Visual MODFLOW (VMOD).	
Unidad de tiempo	SUTRA exige trabajar en segundos, el resto no VMOD (vía MT3DMS) fija el paso de tiempo de cálculo ya que lo limita según el número de Courant, $C = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \leq 1$
Permeabilidad	SUTRA trabaja con permeabilidad intrínseca, k [m^2], mientras que TRAN i VMOD usan la conductividad hidráulica, K [$m\ d^{-1}$]. Ambas están relacionadas por $K = k \frac{\rho g}{\mu}$, cosa que implica que K puede variar con la temperatura en SUTRA
Densidad del fluido	SUTRA es el único que trabaja con densidad variable, expresada como: $\rho(T) \cong \rho_0 + \frac{\partial \rho}{\partial T}(T - T_0)$, donde $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ es una constante que toma valores diferentes en función del rango de temperatura; entre 20 y 60 °C, valeu nos 0,375 $kg/m^3/^\circ C$
Viscosidad del fluido	De nuevo, SUTRA utiliza una función de la temperatura para la viscosidad, μ ($kg\ m^{-1}\cdot s^{-1}$): $\mu(T) \cong (239,4\cdot 10 - 7)10^{\frac{248,37}{T+133,15}}$
Conductividad térmica	SUTRA: se introduce separadamente la del fluido y la del sólido, y el código calcula la del acuífero: $\lambda \cong \phi S_w \lambda_w + (1 - \phi)\lambda_s$
Caudal de agua	En SUTRA, se introduce como masa por unidad de tiempo. En TRAN y VMOD, como volumen por unidad de tiempo.
VARIABLES DE TRABAJO	SUTRA utiliza presiones, VMOD niveles piezométricos y TRAN puede usar ambas, que están relacionadas mediante: $h \cong z_0 + \frac{P}{\rho g}$

6. SOSTENIBILIDAD DE LA GEOTERMIA DE BAJA Tª: CRITERIOS

Los límites y criterios expuestos en el presente apartado deben ser tomados como **orientativos**, ya que el emplazamiento elegido y cuestiones como la vulnerabilidad del medio o los usos actuales/potenciales de la zona condicionarán la viabilidad final de la instalación geotérmica.

1. Realizar pruebas in-situ (siempre)	
Sistemas cerrados	Ensayos de respuesta térmica o “thermal response test” para disponer de información real i no sólo bibliográfica
Sistemas abiertos	Ensayos hidráulicos y, si es posible y conviene, de trazadores, para obtener información adicional sobre el transporte de <i>contaminantes</i> (concepto donde se incluye el calor)
2. Si la potencia instalada > 50 kW :	
Antes de construir el sistema:	Estudio de impacto que podría incluir simulaciones numéricas, preferiblemente 3-D si el sistema es abierto
Durante la vida útil del sistema:	Seguimiento, que podrá incluir aspectos hidráulicos (ascensos/descensos), térmicos (propagación de la pluma de calor) i bioquímicos (ante posibles cambios en el medio)
<p><i>El límite de los 50 kW es válido tanto para sistemas abiertos como cerrados, pero siempre dependerá del emplazamiento. Será objeto de revisión en el futuro.</i></p> <p><i>En sistemas cerrados verticales, dicho límite puede equivaler a entre 500 i 2.500 m de perforación total, en función del calor específico (supuesto entre 100 i 20 W/m, respectivamente). De aquí la importancia de las pruebas de campo.</i></p>	
3. Los sistemas geotérmicos sólo podrán ser autorizados si los edificios disponen de certificación de eficiencia energética elevada	
Comentario:	Criterio aplicable tanto a sistemas abiertos como cerrados
<p><i>Este requisito no es aplicable actualmente, pero ha de ser clave en el futuro inmediato, y exige coordinación entre los estamentos implicados</i></p>	

Criterios aplicables exclusivamente a sistemas abiertos:	
<i>La adopción de otras soluciones ha de estar siempre debidamente justificada</i>	
1	Inyectar el agua utilizada en el mismo acuífero del que se ha extraído
2	Explotar preferiblemente el acuífero superior
3	Limitar el gradiente térmico a 6 °C (diferencia de temperatura entre el agua inyectada y la del acuífero), excepto que se demuestre técnicamente la viabilidad de superarlo
4	Prohibirlos dentro de perímetros de protección de captaciones destinadas a consumo humana i en zonas protegidas o contaminadas
5	Comprobar los cálculos de distancias teóricas mediante pruebas in-situ y/o modelaciones numéricas. Las ecuaciones analíticas sencillas presentadas en el apartado 4. de esta Guía abreviada tienen carácter estimativo
6	Operar el sistema de climatización en modo dual (refrigeración y calefacción) siempre que sea posible para compensar la carga térmica estacional sobre el acuífero y ayudar a la sustentabilidad de la instalación a futuro
7	No utilizar aditivos, salvo que esté justificado (p.ej., para prevenir la colmatación del pozo de inyección) y se lleve a cabo un control y seguimiento de su incidencia en el medio

Criterios aplicables exclusivamente a sistemas cerrados:	
1	Evitar flujos verticales de agua a través de la perforación instalando materiales de buena calidad y baja permeabilidad
2	Los criterios aquí expuestos pueden ser relajados/suprimidos en casos de poco/nulo impacto en el subsuelo, como, por ejemplo: (1) perforaciones subhorizontales, (2) cuando sólo se atraviesa un nivel permeable d'agua

REFERENCIES

- Banks, D. (2008). An introduction to Thermogeology: ground source heating and cooling. *Blackwell Publishing*. 339 pp.
- Diao, N.; Q.Li; Z.Fang (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43: 1203–1211.
- Dwyer T.E.; Y.Eckstein (1987). Finite-element simulation of low-temperature heat-pump-coupled, aquifer thermal energy storage. *Journal of Hydrology*, 95: 19-38.
- FENERCOM (2007). Guía de la energía geotérmica. Reallitzada per G.Llopis i V.Rodrigo per a la *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid*. <http://www.fenercom.com/Publicaciones/Geotermia.pdf>
- Ferguson, G.; A.D.Woodbury (2006). Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14: 1206–1215.
- Harbaugh, A.W.; E.R.Banta; M.C.Hill; M.G.McDonald (2000). MODFLOW 2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. *US Geological Survey Open-File Report 00–92*, 130 pp. <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/ofr00-92.pdf>
- Medina, A.; G.Galarza; J.Carrera (2001). TRANSIN IV. Modelos de flujo y transporte en la geosfera: Código Transin. *IV Jornadas de I+D Tecnológico de Gestión de Residuos Radiactivo de ENRESA Vol. III. Technical publication PT09-01*, pp 195-204.
- Natural Resources Canada's (2004). Cooling and heating with a heat pump. ISBN 0-662-37827-X. 33 pp. <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/home/heating-heat-pump/booklet.pdf>
- Rafferty, K. (2003). Ground water issues in geothermal heat pump systems. *Ground Water*, 41 (4): 408-410.
- Sanner, B.; C.Karytsas; D.Mendrinis; L.Rybach (2003). Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. *Geothermics*, 32: 579–588.
- Uffink, G.J.M. (1983). Dampening of fluctuations in groundwater temperature by heat exchange between the aquifer and the adjacent layers. *J.Hydrology*, 60, 1-4: 311-328.
- Voss, C.I. (1984). A finite element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent groundwater flow with energy or chemically-reactive single species solute transport. *US Geological Survey WRIR 84-4369*, 409 pp.



- Yang, S.Y.; H.D.Yeh (2008). An analytical solution for modelling thermal energy transfer in a confined aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 16: 1507-1515.
- Verein Deutscher Ingenieure, VDI (2001). Thermal use of the underground-ground source heat pump systems. Guia (vol. 2) editada per Beuth Verlag GmbH, Alemanya.

Algunes pàgines web de interès:

www.environment-agency.gov.uk

www.epa.gov

www.fenercom.com

www.forumgeotermia.com

www.gencat.cat/aca

www.geoexchange.com

www.geoplat.org

www.groundreach.eu

www.qtrh.eu







**Agència Catalana
de l'Aigua**

Guia CLIMACA (abreviada)

