



**INVESTIGACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DE
EXTREMADURA (ESPAÑA), ALENTEJO Y REGIÓN CENTRO
(PORTUGAL) EN EL MARCO DEL PROYECTO
PROMOEENER_A_4_E**

**Guía para el análisis, valoración e
interpretación de perfiles térmicos**



PROGRAMA
COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA
ESPAÑA ~ PORTUGAL
COOPERAÇÃO TRANSFRONTEIRIÇA
2007 - 2013

Unión Europea
**Fondo Europeo
de Desarrollo Regional**
"Una manera de hacer Europa"



ÍNDICE

1.- CONSIDERACIONES PREVIAS	1
2.- LOS PERFILES TÉRMICOS	2
3.- PERTURBACIONES Y ANOMALÍAS SOBRE EL GRADIENTE GEOTÉRMICO NATURAL	5
4.- CÁLCULO DEL GRADIENTE GEOTÉRMICO	8

1.- CONSIDERACIONES PREVIAS

El calor es energía que fluye de un cuerpo a otro debido a una diferencia de temperatura; existen tres posibles formas de transmisión de calor: por conducción, por convección y por radiación.

En la Tierra, las fuentes de calor interno proceden del calor radiogénico natural producido en las rocas, de la gravitación, de las reacciones químicas exotérmicas, del calor latente de cristalización y cambios de fase exotérmicos, del calor friccional y del calor remanente de formación del planeta. En ella se manifiestan estas tres formas de propagación del calor, existiendo entre ellas interrelaciones complejas en muchos casos.

En el núcleo externo terrestre y en gran parte del manto dominan los procesos convectivos que transmiten al manto superior el calor por conducción. En la corteza litosférica más rígida, y accesible para el aprovechamiento geotérmico, predomina la transmisión térmica por conducción, aunque este calor puede ser modificado por procesos de convectivos del agua subterránea.

El flujo de calor terrestre es positivo, de tal manera que la Tierra, inmersa en un espacio frío, pierde calor continuamente. La determinación del flujo de calor terrestre y sus anomalías pueden permitir conocer la descripción de la distribución de las temperaturas con la profundidad.

El calor se transmite en la zona litosférica de la tierra, fundamentalmente de forma conductiva, esta transmisión conductiva del calor requiere la existencia de un gradiente térmico, necesario para que el calor fluya de las zonas de mayor temperatura a las zonas de menor temperatura. El flujo calórico Q que pasa de una zona caliente a una fría depende, además, del coeficiente de conductividad térmica, K , que es una constante para cada material.

La ley fundamental de la conductividad térmica es la ley de Fourier, que tiene la siguiente expresión:

$$Q = -k \frac{dT}{dZ}$$

, donde Z es la distancia en la dirección de la variación de la temperatura y T es la temperatura; el signo menos significa que el calor fluye en una única dirección y que es hacia la zona de menor temperatura.

El flujo de calor " Q " se expresa en mW/m^2 , o lo que es lo mismo mWm^{-2} , El valor medio de flujo de calor superficial continental es $57 mWm^{-2}$ (según datos aportados por Sclater et al. en 1980) de los cuales, aproximadamente, un 40% es debido a la producción radiogénica de calor (Pollack y Chapman, 1977) y su cálculo se realiza mediante el producto de la conductividad por el gradiente geotérmico.

La conductividad térmica "K" se expresa en W/mK, o lo que es lo mismo $Wm^{-1}K^{-1}$. La conductividad térmica de rocas consolidadas suele presentar valores comprendidos entre 1.5 y 5 $Wm^{-1}K^{-1}$, aunque los valores mas frecuentes se encuentran entre 2 y 4 $Wm^{-1}K^{-1}$ (Cermak y Rybach, 1982), y para sedimentos marinos superficiales entre 0.6 y 1.4 $Wm^{-1}K^{-1}$ (Louden y Wrigth, 1988). La determinación de la conductividad térmica de las rocas suele realizarse mediante medidas en laboratorio de muestras de sondeos, o de afloramientos rocosos; también se puede calcular la conductividad térmica de un sondeo mediante los ensayos denominados TRTs "test de respuesta térmica; además existen numerosas tablas experimentales con valores de conductividad térmica en función de la litología, composición mineral de las rocas, etc.

La temperatura en el subsuelo litosférico aumenta con la profundidad, es lo que se suele conocer con el nombre de gradiente geotérmico, que corresponde a la medida dT/dz , en la vertical y que se expresa en milikelvin por metro (mK/m, ó mKm^{-1}). Su valor medio en las zonas continentales es de 30 mK/m, y de 50 mK/m en las zonas oceánicas, aunque habitualmente se considera un gradiente geotérmico medio en la tierra de 33 mK/m; su valor medio en la Península Ibérica se cifra en $28 \pm 13 mKm^{-1}$.

2.- LOS PERFILES TÉRMICOS

La determinación regional de los valores del gradiente geotérmico y de los flujos de calor regional es indispensable en los estudios de prospección geotérmica. Para lo cual debe determinarse por una parte la conductividad térmica de las rocas y por otra el gradiente geotérmico.

Para obtener datos de gradiente geotérmico en las zonas continentales se realizan medidas sistemáticas de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades, es lo que habitualmente se conoce como termometrías, cuya representación gráfica constituyen los perfiles térmicos.

Las termometrías realizadas con objetivos geotérmicos deben realizarse en sondeos en los que se presuponga que exista un equilibrio térmico del agua con el terreno, por lo que se ejecutan en sondeos que hayan estado sin uso durante al menos un mes, y cuanto más tiempo mejor.

Las medidas termométricas en los sondeos son registradas, a intervalos constantes, a lo largo de la profundidad del sondeo, con sondas térmicas de precisión, generalmente del orden de 1 a 3 milikelvins.

El perfil térmico teórico de un medio homogéneo en una zona de gradiente medio sin ningún tipo de interferencias presenta una recta de pendiente uniforme, cuyo valor corresponde al gradiente geotérmico (figura 1).

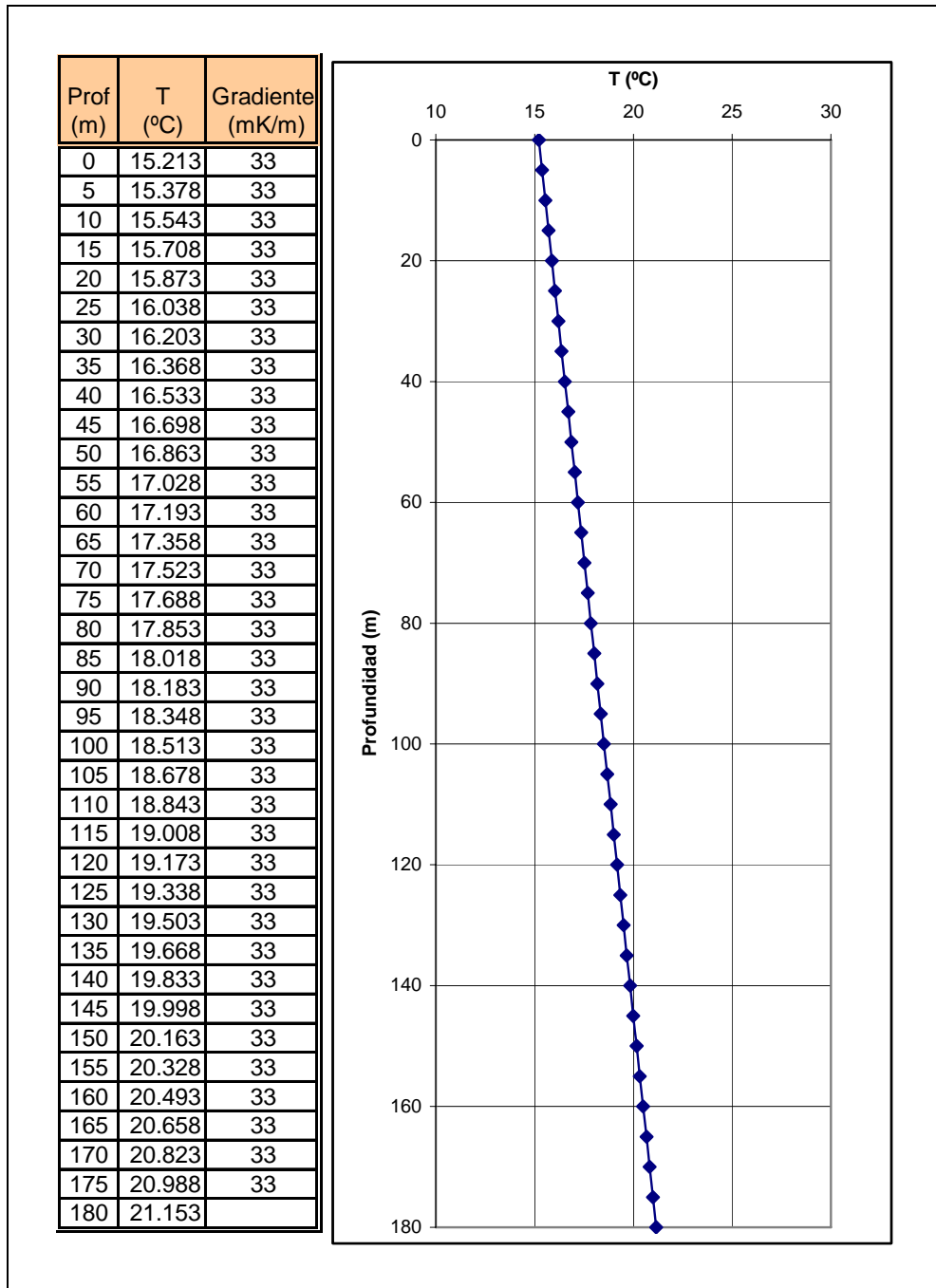


Figura 1. Perfil térmico de un sondeo en un medio ideal homogéneo en ausencia de perturbaciones

La mayor parte de los perfiles térmicos suelen diferir del nivel teórico por que los sondeos en los que se realizan atraviesan materiales con diferente conductividad térmica. Es evidente que el flujo térmico es constante por lo que las diferencias de conductividad térmica de los niveles



atravesados tienen una influencia en el gradiente y por tanto en el perfil térmico, como se puede observar en la figura 2. La presencia de cambios litológicos suele conllevar variaciones de las propiedades térmicas del medio y, en particular, de la conductividad térmica, induciendo cambios en los perfiles térmicos, siguiendo la ley de Fourier, por lo que cualquier variación en la conductividad térmica, producirá una variación inversamente proporcional en el gradiente geotérmico, por lo que resulta de gran importancia conocer las variaciones de conductividad térmica a lo largo del medio para poder interpretar correctamente los registros termométricos.

Para rocas consolidadas, la conductividad térmica suele oscilar entre 2 y 4 W m⁻¹ K⁻¹ por lo que el gradiente geotérmico puede presentar variaciones asociadas a cambios litológicos de hasta un factor 2, dependiendo de la litología, geometría y disposición de los estratos litológicos.

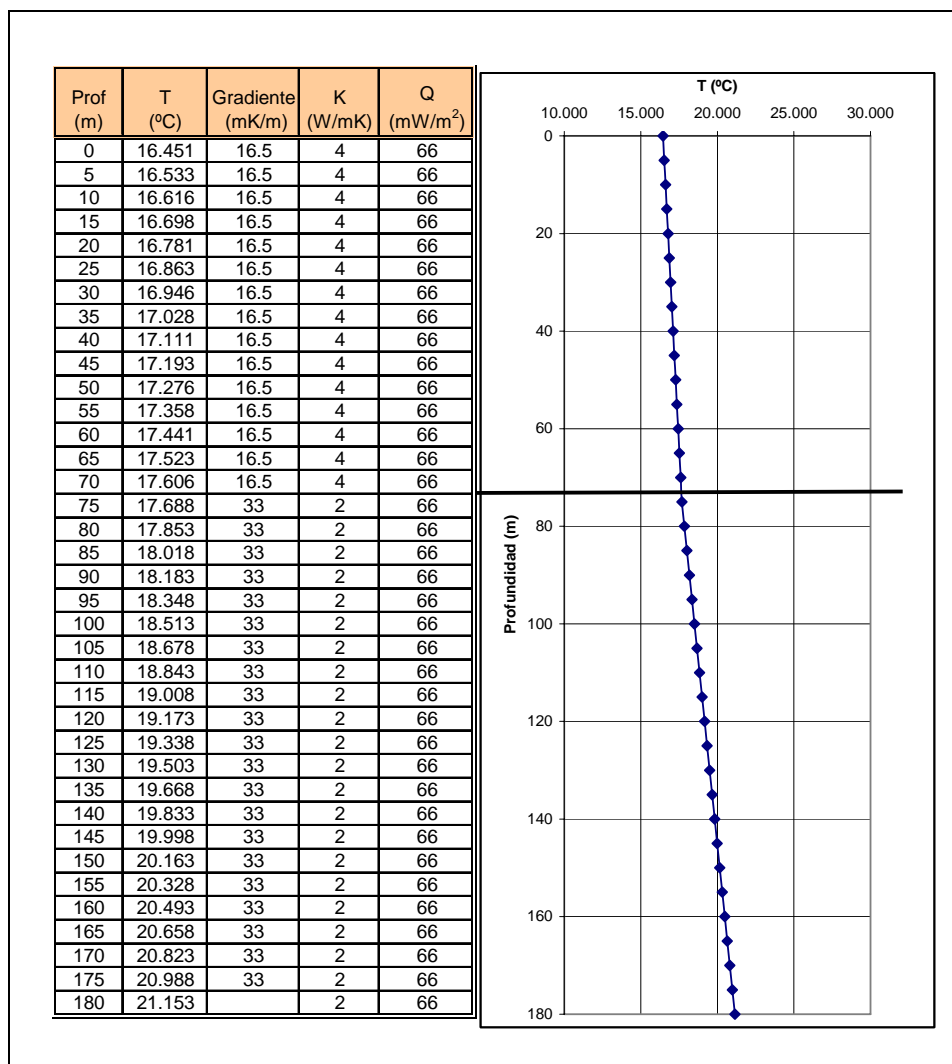


Figura 2. Perfil térmico de un sondeo en un medio con dos litologías homogéneas de diferente conductividad térmica.

Además de esto existen numerosas perturbaciones o anomalías en las termometrías que pueden llegar a hacerlas ininterpretables, y no poder determinar el valor del gradiente, las más significativas de describen en el siguiente apartado.

3.- PERTURBACIONES Y ANOMALÍAS SOBRE EL GRADIENTE GEOTÉRMICO NATURAL

Para el cálculo del flujo de calor regional se requieren termometrías con escasas alteraciones, o con anomalías de escasa longitud de onda que puedan ser controladas, por lo que muchas de las termometrías deben ser desechadas por presentar excesivas perturbaciones. Habitualmente se considera que una de cada 100 termometrías realizadas suelen ser realmente útiles, seleccionándose para ello las termometrías no afectadas por anomalías.

Las perturbaciones de los perfiles termométricos responden a distintas causas, entre las que destacan los procesos convectivos ligados a la circulación del agua subterránea, heterogeneidades del medio que pueden comportar variaciones de conductividad térmica, presencia de fuentes de calor fundamentalmente radiogénicas, o incluso generadas por la fricción de fallas. También hay que considerar las alteraciones provocadas por variaciones de la temperatura superficial (atmosféricas y del suelo), las asociadas al propio proceso de perforación del sondeo, incluso las debidas a factores ambientales como topografía, vegetación, etc.

Las perturbaciones de mayor intensidad son las debidas a la circulación del agua, sobre todo en los primeros cientos de metros del sondeo, que alteran las termometrías de varias formas: aumentando o disminuyendo el gradiente natural de forma continua con la profundidad pero sin mostrar valores negativos; estas perturbaciones se asocian con circulación descendente o ascendente, respectivamente, típicas de zonas de recarga o descarga en acuíferos granulares (Figura 3).

Si las variaciones térmicas son de alta frecuencia positivas o negativas, implican circulación ascendente o descendente a través de zonas de alta permeabilidad, que pueden estar ligadas a zonas de fractura o conductos kársticos. En zonas muy fracturadas o carstificadas las perturbaciones del gradiente suelen ser de gran intensidad y longitud de onda de decenas de metros y están asociadas a circulaciones de agua a través de un medio muy transmisivo.

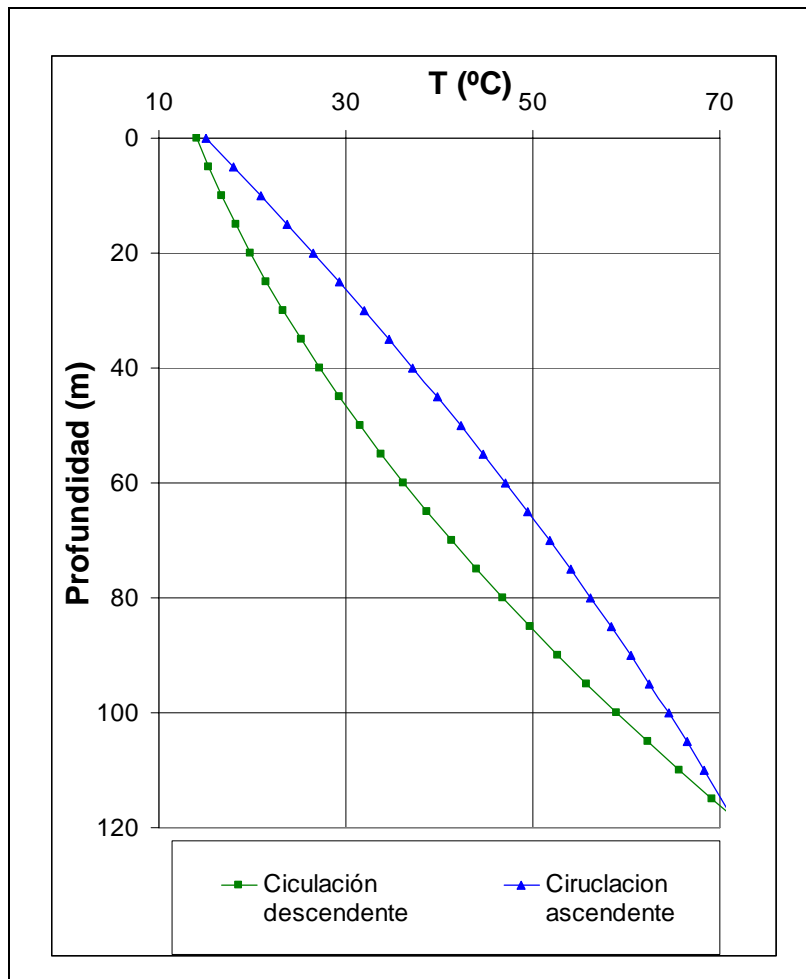


Figura 3.- Gráficas sintéticas de perturbaciones por circulación hídrica descendente y ascendente.

La presencia de elementos radiactivos de largo periodo de semidesintegración, tales como el U, Th y K", cuyas concentración suele estar asociada a rocas ígneas ácidas o rocas sedimentarias procedentes de aquellas, a no ser que se que se encuentren anómalamente muy concentrados, ocasionan modificaciones en el gradiente de muy alta longitud de onda, de modo que no suelen apreciarse en las termometrías de los sondeos más comunes de algunos cientos de metros.

Otras fuentes de calor como emplazamiento de magmas o fricción mecánica de fallas pueden ocasionar significativas alteraciones en los perfiles térmicos.

Las variaciones térmicas superficiales diurnas suelen ser del orden de decenas de grados pero solo son apreciables hasta unos 2 metros de profundidad, las variaciones estacionales pueden alcanzar una decena de grados y sus perturbaciones pueden percibirse hasta unos 25 metros de profundidad; por ultimo las variaciones paleoclimáticas (centenares y miles de años) presentan

una variación en superficie de algunos grados, pero su penetración puede ser de centenares, e incluso miles, de metros.

Las variaciones de temperatura superficial también pueden estar asociadas a procesos internos, es decir, aquellos que afectan a la zona continental terrestre: erosión, sedimentación y levantamiento tectónico. Estas perturbaciones térmicas dependen del tiempo transcurrido y de la velocidad de los procesos; la erosión produce un aumento del gradiente geotérmico mientras que la sedimentación y el levantamiento tectónico conllevan una disminución del gradiente.

Las variaciones topográficas distorsionan la distribución térmica en el subsuelo, aumentando el gradiente geotérmico en los valles y provocando un descenso en las zonas elevadas. Por otra parte, la presencia de vegetación y el albedo producen variaciones en la temperatura superficial, aunque su efecto suele ser apreciable exclusivamente en los primeros 15 metros.

También el proceso de perforación de un sondeo conlleva perturbaciones térmicas que pueden ser importantes sobre todo por la inclusión de lodos de perforación, o por que se produzca una conexión artificial de acuíferos con diferente nivel lo que provoca circulación hídrica entre ambos.

Los lodos de perforación alteran el régimen térmico, dependiendo del tiempo que dure la circulación, del diámetro del sondeo y de la permeabilidad del terreno. El fluido tiende a homogeneizar la temperatura del sondeo, calentando el tramo superior y enfriando el inferior. En consecuencia, se produce una disminución del gradiente térmico aunque la temperatura media del sondeo se conserva. Esta perturbación es transitoria y va disminuyendo con el tiempo hasta restablecerse de nuevo el equilibrio térmico con el terreno. Se suele considerar que el tiempo mínimo de reequilibrio se alcanza durante un mes de reposo absoluto.

La posible conexión hidráulica entre acuíferos o zonas de fractura con permeabilidad diferencial que presentan diferentes niveles piezométricos, provoca la circulación del agua a través del sondeo entre los tramos conectados. En este caso, el gradiente geotérmico se vera alterado dependiendo de la velocidad de circulación a través del sondeo, haciéndose casi nulo en el caso de velocidades elevadas. Si la temperatura en el nivel superior es igual a la temperatura del tramo de conexión indica circulación descendente, agua más somera desciende hasta un nivel más profundo y caliente, y a la inversa si la circulación es ascendente. Esta perturbación es permanente y la única forma de eliminarla es entubando el sondeo y sellando el anular entre la tubería y la pared de la perforación.

En la figura 4 (Marzán, I., 2000), se muestran las perturbaciones causadas en los perfiles térmicos.

La presencia de fuentes de calor en el medio también afecta a la forma de las termometrías, sumándose al flujo de calor procedente del estrato subyacente, e incrementando la temperatura en función de su distribución. La principal contribución a la producción radiogénica de calor, por

su abundancia y larga vida media, es debida a la desintegración radioactiva de los isótopos radiactivos de uranio, thorio y potasio.

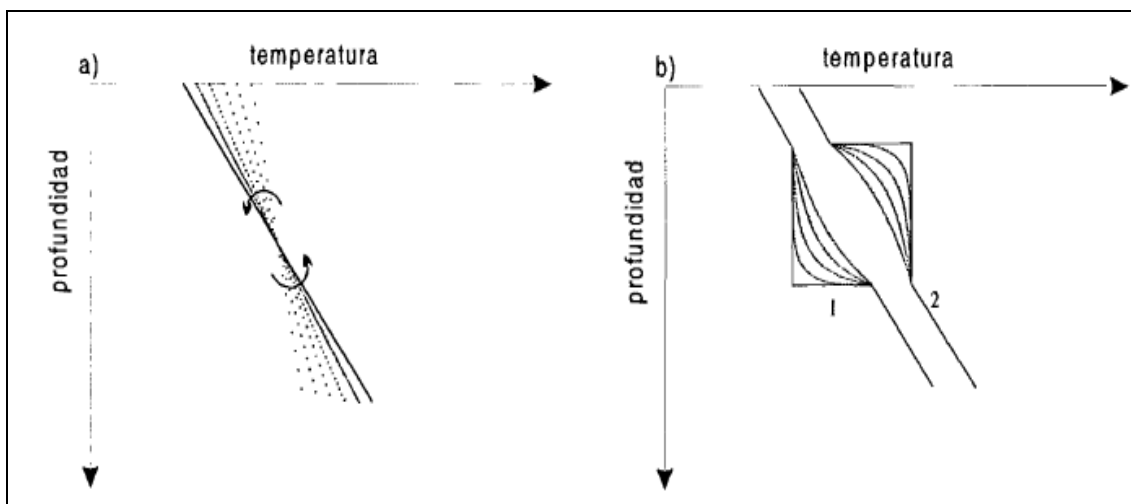


Figura 4.- Perturbaciones de las termometrías debidas a la perforación del sondeo

- a) Evolución hacia el equilibrio térmico de un sondeo perturbado por los fluidos de perforación.
 b) Conexión de niveles piezométricos diferentes y circulación hídrica (1 descendente, 2 ascendente).

4.- CÁLCULO DEL GRADIENTE GEOTÉRMICO

El cálculo del gradiente geotérmico se realiza exclusivamente en termometrías que no presenten excesivas perturbaciones, en primer lugar conviene desechar las lecturas correspondientes a los 30 primeros metros del sondeo, para evitar el efecto de las variaciones térmicas diarias y anuales (perturbaciones externas de pequeña longitud de onda).

Se seleccionan los tramos rectilíneos del perfil, en los que se calcula el gradiente térmico medio mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

El flujo de calor superficial emitido se calcula mediante el producto del gradiente calculado por la conductividad térmica media del sondeo.

Ya se ha comentado que existen diversas tablas experimentales sobre los valores de conductividad térmica en función de la tipología de rocas, edades, composición mineral, etc.; además estos valores se pueden medir en laboratorio sobre muestras de testigos del sondeo, muestras de rocas aflorantes; también pueden calcularse mediante ensayos específicos como TRTs, etc.

Existen patrones conocidos de perturbación térmica de termometrías que pueden servir de referencia a la hora de interpretar las curvas obtenidas (Figuras 5 y 6)

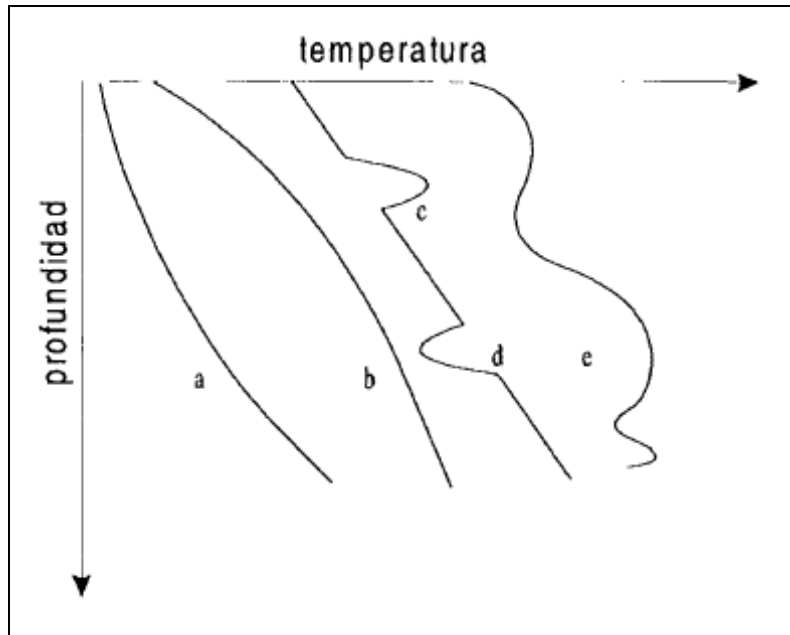


Figura 5.- Termometrías sintéticas con perturbaciones por circulación de agua: a) circulación descendente. b) circulación ascendente. c) y d) circulación a través de fracturas. e) circulación en medios karstificados masivamente. (Marzan, I; 2000).

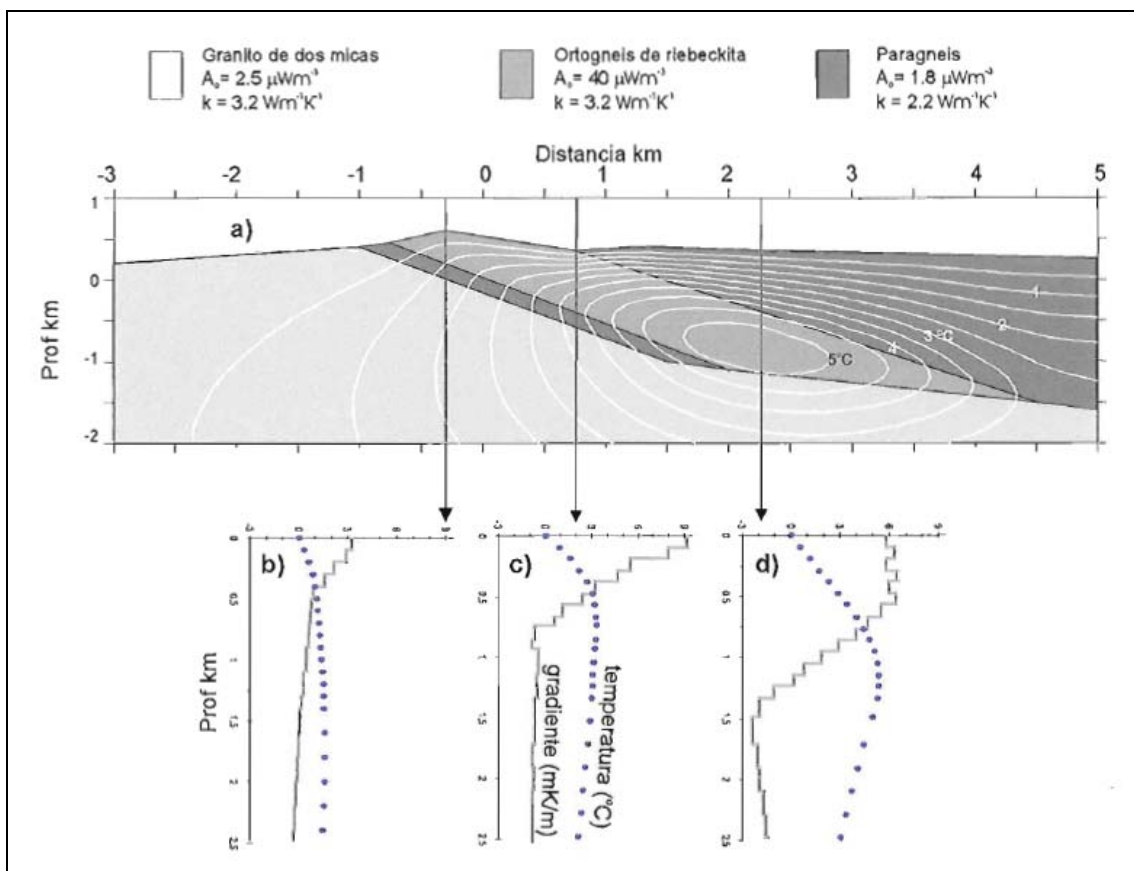


Figura 6.- Perturbaciones provocadas por foco radiogénico. b) geoterma diferencial en el punto de mínimo flujo de calor superficial total, c) en el punto de máximo flujo de calor superficial total y d) en el punto de máxima perturbación (Marzán, I., 2000).