

Inyección de fluidos de baja entalpía en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México.

Fernando Ascencio Cendejas

Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, Morelia, Mich., México.

Recibido: marzo, 1991; aceptado: febrero, 1992.

RESUMEN

En este estudio se analizan las consecuencias de la inyección de fluidos de baja entalpía en la producción y estado termodinámico del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Puebla. Se utiliza un modelo analítico que evalúa la velocidad de propagación del frente térmico. Se concluye que la inyección de salmuera de desecho en el pozo H-28, a un ritmo de 90 ton/h, no afecta el estado térmico del yacimiento. Se discute la validez de este resultado.

PALABRAS CLAVE: Reinyección de fluidos, modelo analítico, velocidad de propagación, frente térmico, estado termodinámico del reservorio, campo geotérmico, Los Humeros (Puebla, México).

ABSTRACT

In this study we analyze the consequences of low-enthalpy brine-injection in the production- and thermodynamic- state of the geothermal reservoir of Los Humeros (Puebla State, Mexico). We used an analytic model that evaluates the propagation speed of the thermal front. The model considers that the fluid is incompressible, a radial propagation for the temperature front and an instantaneous thermal equilibrium between brine, geothermal fluids, and rock matrix through which it flows. It is estimated that geothermal brine reinjection at well H-28 at a rate of 90 ton/h does not affect the reservoir thermal state.

KEY WORDS: Brine injection, analytical model, speed propagation, thermal front, reservoir thermodynamic-state, geothermal field, Los Humeros (Puebla State, Mexico).

INTRODUCCION

La zona geotérmica de Los Humeros, Puebla, se encuentra localizada en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, a 180 km al oriente de la ciudad de México. Las ciudades más cercanas son Perote, Ver., al sureste y Teziutlán, Pue., al noreste (Figura 1).

Actualmente, en este proyecto geotérmico la Comisión Federal de Electricidad ha perforado 32 pozos geotérmicos e instalado tres plantas geotermoeléctricas con capacidad de 5 MWe cada una; y a mediano plazo, para fines de 1993, contempla la generación de 40 MWe con dos unidades turbogeneradoras con capacidad de 20 MWe.

En el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, al igual que en otros, la inyección al yacimiento del agua separada de pozos y condensado de vapor de plantas geotermoeléctricas suele ser la solución al manejo de los altos contenidos de sólidos contaminantes, y aunque tal operación tiene efectos positivos al mantener la presión en o en las fronteras del yacimiento; sin embargo, efectos colaterales pueden presentarse debido a la irrupción del frente de baja temperatura sobre zonas de producción. Por lo anterior, juega un papel principal el evaluar la velocidad de dicha irrupción y de esta manera establecer la viabilidad de los pozos de inyección.

ECUACIONES BASICAS

La ecuación diferencial parcial que describe en forma aproximada el principio de conservación de la energía o también denominado primera ley de la termodinámica para

un fluido incompresible viajando a través de un medio poroso homogéneo e isotrópico es:

$$w_i c_p f \frac{\partial T}{\partial r} = - 2 \pi r h \overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

En donde T es la temperatura del medio (fluido y matriz de roca), w_i es el flujo másico inyectado en el yacimiento, y h es el espesor de la zona permeable. Los demás símbolos son descritos en el anexo.

Las siguientes simplificaciones fueron consideradas para el planteamiento de la ecuación (1):

- Equilibrio térmico instantáneo entre el fluido y la matriz.
- El fluido inyectado se propaga radialmente en el medio poroso
- El transporte de energía por conducción es despreciable (+).

(+) La aproximación es justificable debido a que durante la etapa de inyección el transporte de energía es principalmente por convección (velocidad); por otra parte, cuando la inyección cesa, la zona enfriada tiende a adquirir su estado térmico inicial por transporte de energía por conducción (gradiente de temperatura).

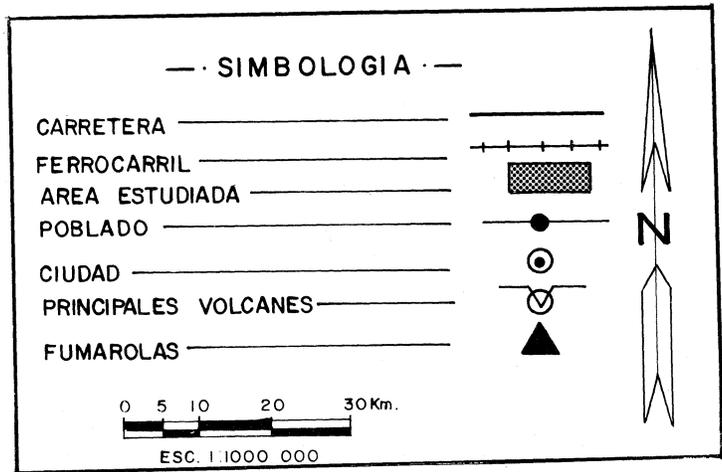
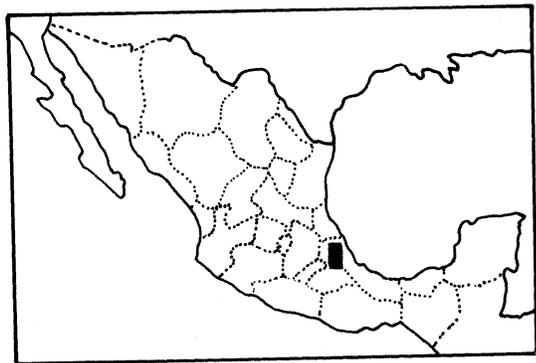
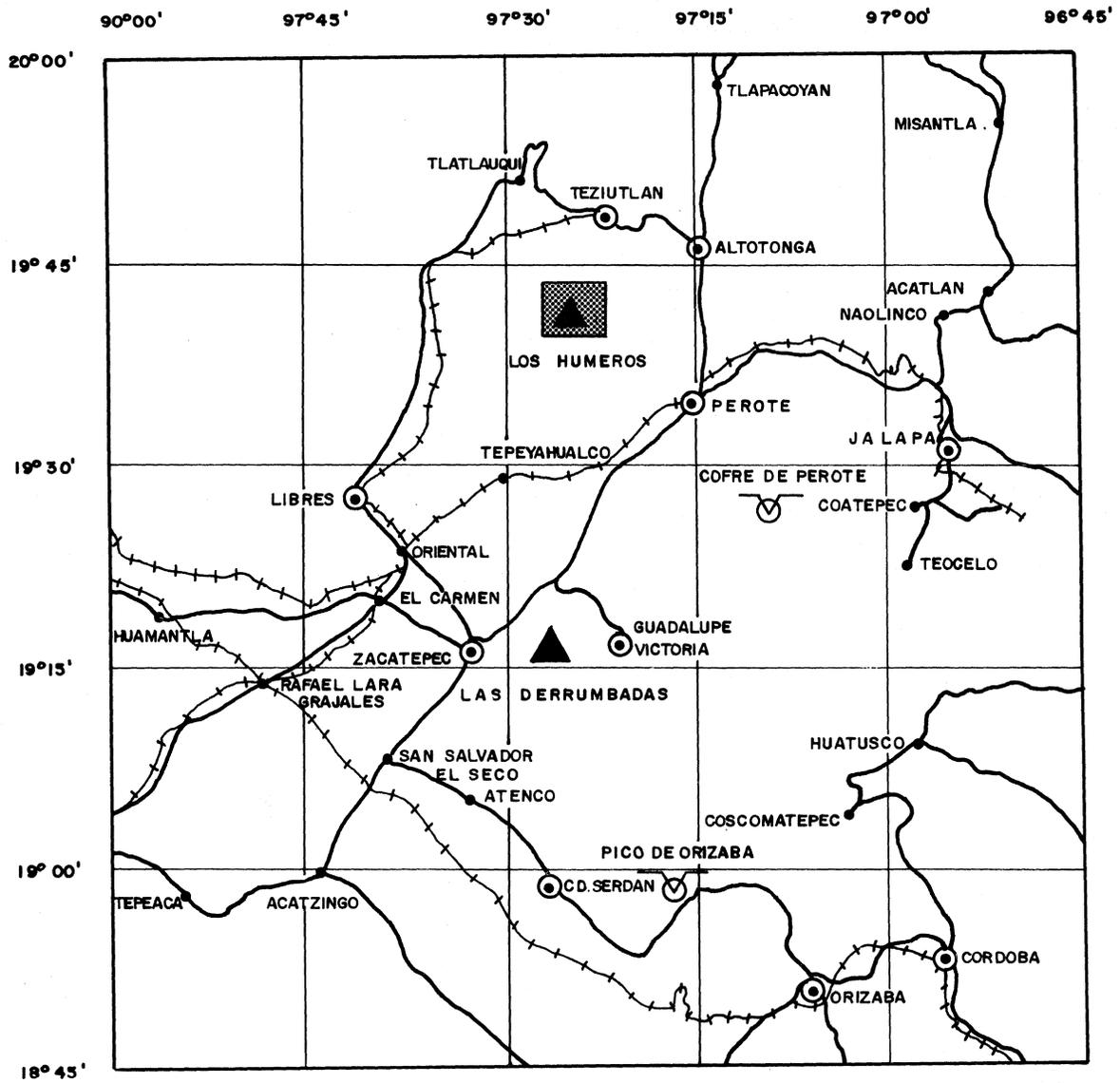


Fig. 1. Localización del campo geotérmico Los Humeros, Puebla.

Para análisis detallados y completos de este tipo de problemas véase por ejemplo los trabajos clásicos desarrollados por Bodvarsson (1969, 1972) y Bodvarsson y Chin (1982).

Al definir la siguiente variable adimensional:

$$T_D = \frac{T - T_o}{T_i - T_o}$$

la ecuación (1) se transforma en

$$w_i c_{pf} \frac{\partial T_D}{\partial r} = -2\pi r h \overline{\rho c_p} \frac{\partial T_D}{\partial t} \quad (2)$$

Para la definición completa del problema se consideran las siguientes condiciones inicial y de frontera:

$$T_D = 0 \quad \text{a} \quad t \leq 0 \quad \text{y} \quad r > 0$$

$$T_D = 1 \quad \text{para} \quad t > 0 \quad \text{y} \quad r = 0$$

Lo anterior en palabras establece que la temperatura del fluido y matriz de roca (T_o) es uniforme y constante en el yacimiento antes de la inyección ($t < 0$); y al inicio de ésta ($t \geq 0$) la temperatura en el pozo ($r=0$) es igual a la del fluido inyectado (T_i).

La solución del problema diferencial anteriormente planteado es,

$$T_D = U(t - \tau) \quad (3)$$

En donde U es la función de salto unitario definida por

$$U(t - \tau) = 0 \quad \text{para} \quad t - \tau \leq 0$$

$$U(t - \tau) = 1 \quad \text{para} \quad t - \tau > 0$$

y

$$\tau = \frac{\pi r^2 \rho_f h}{w_i} \frac{h}{\Theta} \quad (\text{Bodvarsson, 1972})$$

$$\Theta = \frac{\rho_f c_{pf}}{\rho c_p}$$

La solución dada por la ecuación (3) tiene una interpretación física sencilla: el fluido inyectado actúa como un "pistón" desplazando al fluido presente; y quedando el medio barrido, a la temperatura del fluido de inyección.

Finalmente, y a partir de las anteriores relaciones, el radio de la zona enfriada en función del volumen total de salmuera inyectada ($V = w_i t / \rho_f$) es evaluado a partir de la siguiente expresión

$$r = \left(\frac{V \Theta}{\pi h} \right)^{1/2} \quad (4)$$

ANÁLISIS DEL PROBLEMA

En el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, el agua separada de los pozos H-1, H-8 y H-12, que suma un gasto aproximado de 90 ton/h, será inyectada en el pozo

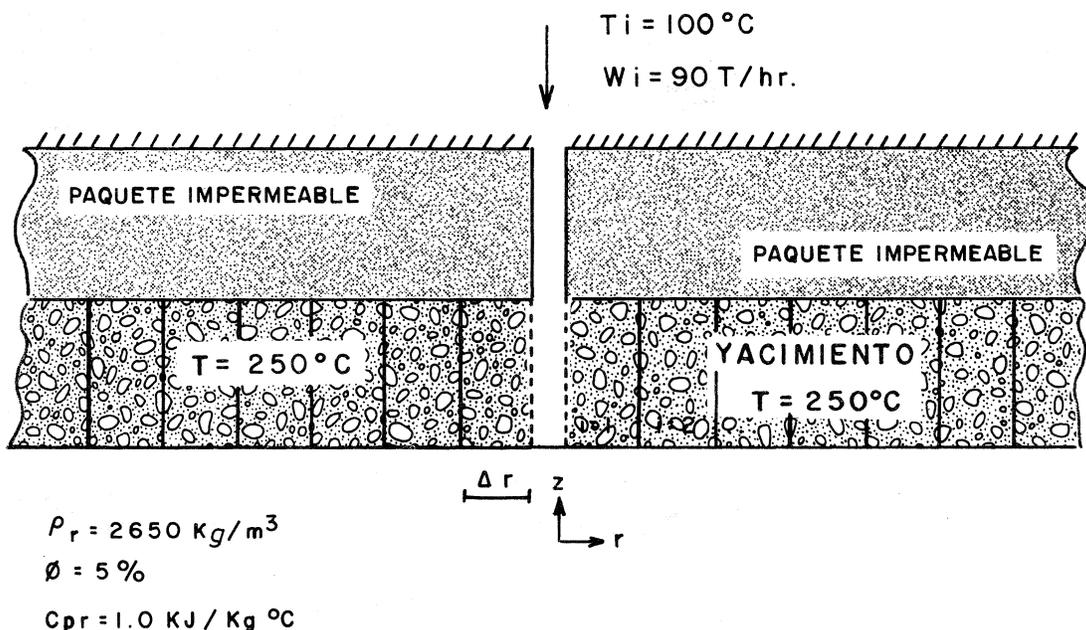


Fig. 2. Idealización del problema físico en estudio

H-28 a una temperatura del orden de 100 °C. La temperatura promedio del yacimiento es de 250 °C y el espesor de la zona permeable es de 250 metros.

Para propósitos ilustrativos la Figura 2 muestra una idealización del sistema en estudio; y la Figura 3, el plano de localización de pozos.

Para la evaluación de la ecuación (3) se considera como variable libre el radio r ; y para los restantes parámetros, se consideran los siguientes valores característicos del medio (Kappelmeyer y Haenel, 1974):

$$\rho_r = 2650 \text{ kg/m}^3$$

$$\phi = 5\%$$

$$c_{pr} = 1.0 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$c_{pf} = 4.2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$$

La Figura 4 presenta el tiempo de llegada, a distintos radios, del frente de baja de temperatura. Se puede apreciar que la lentitud de la velocidad de avance, depende en relación directa de r^2 ; así por ejemplo, para enfriar 130 m alrededor de la zona de inyección se requiere de un tiempo aproximado de 10 años, y los pozos más próximos a ésta, el H-32 y el H-11, se encuentran a 350 y 450 m respectivamente.

CONCLUSIONES

Se concluye que la inyección de fluidos de baja entalpía en el pozo H-28, a un ritmo de 90 ton/h, no afecta el estado térmico del yacimiento, específicamente, sobre los pozos más próximos a la zona de inyección, y aunque la suposición de equilibrio térmico no es del todo válida, los resultados generados implícitamente consideran un margen de seguridad para la planeación de las estrategias de inyección del campo en estudio.

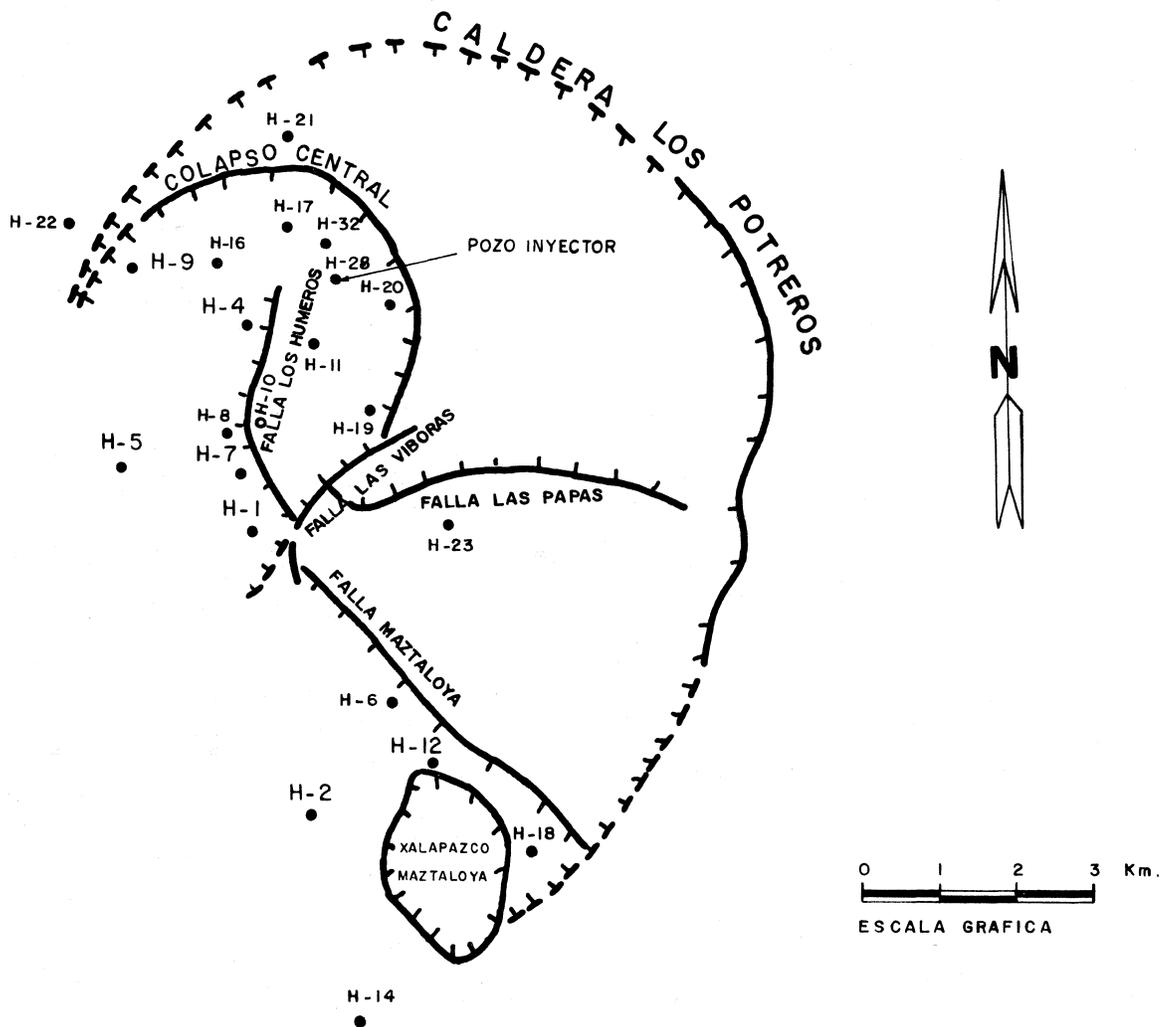


Fig. 3. Localización de pozos en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla.

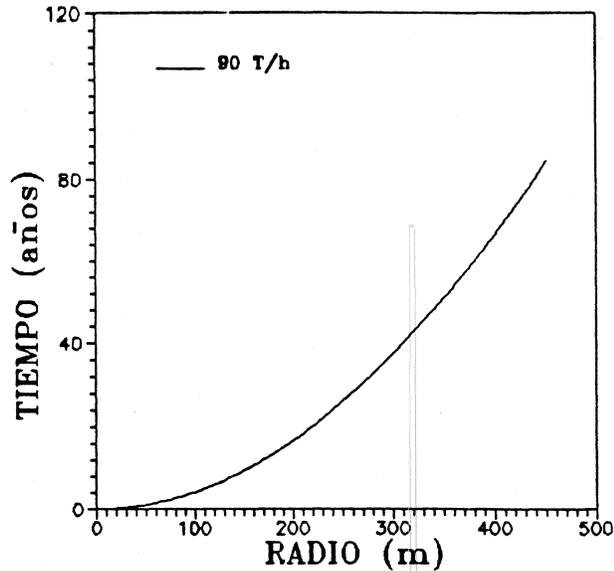


Fig. 4. Tiempo de llegada a distintos radios del frente frío de temperaturas debido a la inyección de fluido frío en el pozo H-28.

La anterior conclusión es válida siempre y cuando no existan zonas preferenciales de permeabilidad, por ejemplo, una fractura o falla conductora que canalizen el fluido hacia la zona de producción.

ANEXO

DESCRIPCION DE SIMBOLOS

h es el espesor zona permeable

r es el radio

t es el tiempo

T_0 es la temperatura inicial del medio (fluido, medio poroso)

T_i es la temperatura del fluido inyectado

V es el volumen total de salmuera inyectado

$$\overline{\rho c_p} = (1 - \phi) \rho_r c_{pr} + \phi \rho_f c_{pf}$$

c_{pr} es el calor específico de la roca

c_{pf} es el calor específico del agua

ϕ es la porosidad de la roca

ρ_r es la densidad de la roca

ρ_f es la densidad del agua

w_i es el gasto inyectado

BIBLIOGRAFIA

BODVARSSON, G., 1969. On the temperature of water flowing through fractures. *J. Geophys. Res.*, 74 (8), 1987-1992.

BODVARSSON, G., 1972. Thermal problems in the siting of reinjection wells. *Geothermics*, 1, 63-66. (2).

BODVARSSON, G. y F. I. CHIN, 1982. Injection and thermal breakthrough in fractured geothermal reservoir. *J. Geophys. Res.*, 87(B2), 1031-1048.

KAPPELMEYER, O. y R. HAENEL, 1974. *Geothermics with Special Reference to Application*. Geopublications Associates, Berlin, Stuttgart, 238.

Fernando Ascencio Cendejas
 Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
 Comisión Federal de Electricidad
 Apdo. Postal 31-C
 58290 Morelia, Michoacán, México

