

Composición química de la fase líquida a descarga total y a condiciones de reservorio de pozos geotérmicos de Los Humeros, Puebla, México.

Enrique Tello Hinojosa

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

Recibido: septiembre, 1989; aceptado: enero, 1992.

RESUMEN

Se aplicó en Los Humeros, la técnica desarrollada por Amorrson y Sigurdsson, (1982) que sirve para estimar la composición química de la fase líquida de un reservorio de dos fases a condiciones de descarga total y a profundidad, a partir del análisis químico del agua separada. Para la estimación de la temperatura y de la presión de saturación se utilizó la ecuación de Clausius-Clapeyron $dP/P = \lambda dT/RT^2$ donde R es la constante de los gases y (λ) es el calor molar de vaporización. En una primera fase se calcula la fracción de agua en la fase líquida a condiciones de descarga total. Para estimar las concentraciones de los solutos en los pozos de Los Humeros, se parte de 2 suposiciones fundamentales: 1) que los solutos están totalmente disueltos en la fase líquida, (ya que una parte despreciable se encuentra en la fase vapor), 2) que las 2 fases del fluido geotérmico (vapor y agua) están en equilibrio en el reservorio. Al realizar los cálculos se encontró que el pozo H-1 produce en una zona de líquido dominante, la cual pudiera representar la parte superior del yacimiento, ya que se comporta como una zona de condensación (Tello, 1989). El resto de los pozos producen en una zona de dos fases.

PALABRAS CLAVE: Geotermia, composición química, descarga total, condiciones de yacimiento, Los Humeros (Puebla, México).

ABSTRACT

The chemical composition of the liquid phase, in the two-phase geothermal-field of Los Humeros (Mexico) is discussed. The water fraction at full discharge conditions was calculated. Well H-1 is producing in a mainly liquid zone which probably is located in the upper part of the reservoir. The other wells are producing in a two-phase zone.

KEY WORDS: Geothermal fields, chemical composition, total discharge, reservoir conditions, Los Humeros (Puebla State, Mexico).

NOMENCLATURA

C = Concentración con respecto al agua [mg/l]

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/seg²

H = Entalpía por unidad de masa

Ho = Entalpía de mezcla

h = Altura sobre el nivel del mar = 2820 m (para Los Humeros)

P = Presión absoluta

Po = Presión de ebullición del agua al nivel del mar = 101335 Pa

Ps = Presión de saturación del agua en función de la altura sobre el nivel del mar.

R = Constante general de los gases = 8.315 joule/grmol°K

M = Peso molecular del aire = 28.85 gr/grmol

T = Temperatura absoluta

To = Temperatura de ebullición del agua al nivel del mar = 100 °C

Ts = Temperatura de saturación del agua en función de la altura sobre el nivel del mar

X₁ = Fracción de agua = Hv-Ho/Hv-H1

X_v = Fracción de vapor = Ho-H1/Hv-H1

$\lambda_{100^\circ\text{C}}$ = Entalpía de formación o calor molar de vaporización

ρ = Densidad del aire

SUBINDICES

DT = Descarga total

R = Reservorio

l = Fase líquida

v = Fase vapor

a = Datos analíticos

INTRODUCCION

El conocimiento de la composición química del agua separada a descarga total y a condiciones de reservorio es de gran importancia en la predicción de variaciones en la composición química del fluido geotérmico. El exceso de entalpía de los pozos nos ayuda a definir el tipo de yacimiento penetrado por los pozos. Valores bajos de exceso de entalpía indican que el reservorio penetrado por el pozo es de líquido dominante. Mientras que, un valor alto del exceso de entalpía refleja la presencia de 2 fases en el yacimiento.

Siguiendo los conceptos básicos desarrollados por Arnorsson y Sigurdsson, (1982), y haciendo algunas suposiciones sobre los procesos físicos y sobre el equilibrio soluto-mineral, se corrigieron los datos analíticos de algunos componentes químicos presentes en el agua separada de los pozos de Los Humeros (México) para obtener la composición química que se tendría en la descarga total y a condiciones de reservorio, basados en los datos sobre el exceso de entalpía de los pozos. La composición química del agua separada se calcula suponiendo que el exceso de entalpía de los pozos obedece 2 causas posibles: 1) las fases de vapor y agua no se transmiten a través de la formación del reservorio con igual facilidad debido a que las dos fases tienen propiedades físicas diferentes (transmisibilidades), 2) también es concebible que el exceso de entalpía se deba a la evaporación del agua ocasionada por un aporte conductivo de calor desde la roca del reservorio. Otra suposición fundamental es que los solutos se encuentran en equilibrio a la temperatura del reservorio y que las dos fases (vapor y agua) también están en equilibrio a condiciones de reservorio.

TEMPERATURA Y PRESION DE SATURACION DEL AGUA A CONDICIONES ATMOSFERICAS EN LOS HUMEROS, PUEBLA.

Para el inicio de los cálculos es necesario conocer la temperatura y presión de saturación del agua a la altura (con respecto al nivel de mar) del pozo en estudio. Para esto se emplea la ecuación de Clausius-Clapeyron (Hougen, Watson y Ragatz, 1978):

$$dP/P = \lambda dT/RT^2 \text{ o } d(\ln P) = -\lambda/R \cdot d(1/T) \quad (1)$$

donde R es la constante general de los gases, y λ es el calor molar de vaporización.

Cuando la temperatura no varía entre límites amplios, puede suponerse que el calor molar de vaporización (λ) es constante y la ecuación (1) se puede integrar, entre los límites P_0 , T_0 y P , T , para dar:

$$\ln P/P_0 = \lambda/R (1/T_0 - 1/T) \quad (2)$$

La ecuación (2) permite el cálculo de la presión de vapor de una sustancia a una temperatura T en función de la presión de vapor P_0 a otra temperatura T_0 , junto con el calor molar de vaporización (λ).

Sabemos que la presión total sobre el nivel del mar (P_0) es 101335 Pascales. Esto quiere decir que a este nivel la ebullición del agua ocurre si la presión de saturación es igual a 101335 Pascales, que corresponde a una temperatura de $T_0 = 100$ °C. El cálculo de la presión atmosférica a cualquier otra altura sobre el nivel del mar (considerando que es una presión fluidoestática), se puede hacer aplicando la fórmula de Torricelli (Mosqueira, 1969), la cual se representa analíticamente:

$$dP = -\rho g dh \quad (3)$$

donde h es la altura sobre el nivel del mar, ρ es la densidad del aire y g es la aceleración de la gravedad. Esta última puede considerarse constante ya que la variación con la altura es muy pequeña. Sin embargo, si se quiere mayor precisión puede corregirse de acuerdo con la siguiente expresión (Alonso y Finn, 1976).

$$g = g_0 (1 - 2h/R) \quad (4)$$

donde g_0 es la aceleración de la gravedad medida en un punto de referencia y R es el radio de la Tierra. Introduciendo los valores de g_0 y R se obtiene (Alonso y Finn, 1976).

$$g = 9.81 - 3.06 \times 10^{-6} h \quad (5)$$

Suponiendo que la temperatura del aire es constante entre las diferentes alturas consideradas y que además se comporta como un gas ideal, entonces es válida la ecuación de estado bajo la forma (Smith y Van Ness, 1980).

$$PV = RT \quad (6)$$

Considerando 1 mol de gas a temperatura y presión constante, la ecuación de estado puede escribirse como:

$$PV = nRT \quad (7)$$

donde

$$n = W/M \quad W = nM \quad (8)$$

y

$$\rho = W/v \quad (9)$$

sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (9) tenemos:

$$\rho = nM/V \quad n = 1 \text{ mol} \quad (10)$$

$$\rho = M/V \quad V = M/\rho \quad (11)$$

sustituyendo la ecuación (11) en la ecuación (6)

$$P M/\rho = RT \quad (12)$$

despejando a la densidad obtenemos:

$$\rho = PM/RT \quad (13)$$

sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (3) e integrando entre los límites $P = P_o$ y $P = P_s$ (respectivamente entre $h = 0$ y $h = h$) y despejando P_s , se obtiene:

$$\ln P_s - \ln P_o = - (M/RT) g[h-o] \quad (14)$$

y despejando P_s ,

$$P_s = P_o \exp - (Mgh/RT) \quad (15)$$

Para el caso de Los Humeros la altura promedio a la que se encuentran la mayoría de los pozos es de 2820 msnm. Al sustituir valores en la ecuación 15 tenemos que:

$$P_s = 0.0735 \text{ [MPa]} \text{ (Para Los Humeros, Puebla)}$$

Despejando a T de la ecuación (2) tenemos

$$T = \frac{1}{1/T_o - (R/\lambda) (\ln P_s/P_o)} \quad (16)$$

El calor molar de evaporación (λ) del agua a una atmósfera de presión y a 100 °C es igual a 9717 cal/grmol (Hougen, Watson y Ragatz, 1978). Sustituyendo datos en la ecuación (16) tenemos que:

$$T_s = 364^\circ\text{K} = 91^\circ\text{C}$$

Donde T_s es la temperatura de saturación a la cual hierve el agua en Los Humeros, Puebla. A partir de esta temperatura se puede obtener la entalpía del vapor y del líquido respectivamente, consultando tablas de propiedades termodinámicas del agua (por ejemplo Keenan, Keyes, Hill and Moore, 1969).

EXCESO DE VAPOR

Si la entalpía de descarga de los pozos excede a la del líquido saturado a la temperatura de reservorio, se considera que existe un exceso de vapor. Las entalpías de descarga de los pozos del campo geotérmico de Los Humeros varían de 1385 a 2662 KJ/kg. Una alta entalpía de descarga refleja dos fases (vapor y agua) en el yacimiento y su separación parcial en el acuífero antes de entrar al pozo. En la Tabla 1 está referida la entalpía de mezcla de los pozos de Los Humeros. Se observa en la Tabla 1 que la entalpía de descarga del pozo H-1 corresponde a la de un líquido saturado a la temperatura de reservorio; por consecuencia el exceso de vapor a condiciones de yacimiento es pequeño. Esto sugiere

Tabla 1

Composición química del agua separada de los pozos de Los Humeros, Puebla. La concentración de los solutos está dada en mg/l y la conductividad eléctrica está en $\mu\text{mhos/cm}$. La entalpía total está en kJ/kg.

No DE POZO	FECHA	ENTALPIA DE MEZCLA	PH	C.E.	Na	K	Ca	Mg	SiO2	Cl	SO4	HCO3	B	Li
H-1	121089	1385	8.2	1200	282.0	46.0	1.78	0.05	911	99.6	110.8	207.5	247	0.85
H-6	121089	2378	7.9	1025	227.0	41.0	0.80	0.05	1142	252.7	1.7	39.8	253	0.75
H-7	191089	2587	6.6	750	147.0	22.0	2.20	0.04	885	76.9	73.2	34.3	2410	0.30
H-8	121089	2168	8.0	1150	282.0	46.0	2.20	0.07	988	96.8	99.6	100.3	503	0.57
H-9	261089	2662	6.8	775	170.0	26.0	0.76	0.02	940	79.4	4.0	82.0	2648	0.76
H-10	190789	2662	6.0	1010	141.9	19.1	1.80	0.02		265.1	12.4	80.5	5331	0.34
H-11	111089	2636	4.8	3500	203.0	27.0	7.10	0.40	909	982.7	33.3	28.2	1716	0.83
H-12	121089	2596	7.1	440	180.0	32.0	0.50	0.04	1023	133.4	1.7	49.3	1743	0.58
H-13	121089	1671	8.1	1650	350.0	66.0	4.00	0.07	949	393.1	71.5	87.7	267	1.37
H-15	70689	2115	5.2	550	120.0	15.0	1.20	0.07	502	9.8	131.9	10.0	142	0.40
H-16	131089	2498	8.9	2100	586.0	32.0	0.90	0.05	551	99.3	142.0	463.8	220	0.85
H-17	131089	2662	7.6	635	112.0	19.0	0.84	0.03	519	158.8	75.3	41.5	184	0.40
H-18	131089	1747	8.0	1645	123.0	23.0	0.92	0.04	229	112.3	42.8	396.6	118	0.37
H-20	60989	2628	7.3	525	93.0	16.0	1.20	0.02	441	79.5	19.4	70.6	469	0.31
H-23	210189	2064	7.6	1060	146.0	10.0	6.00	0.06	163	193.6	107.7	2.4	73	0.20
H-24	180589	2491	7.6	1500	285.0	46.0	1.50	0.11	406	324.6	27.3	58.2	422	0.90
H-27	130489	2260	7.4	1075	75.0	6.0	1.70	0.07		252.5	21.0	10.3	187	0.10
H-28	180789	1731	8.4	2400	533.4	28.1	0.60	0.01		556.0	31.8	110.4	227	1.54
H-30	140389	2662	5.3	1925	112.0	14.4	0.80	0.08	152	498.4	13.9	259.6	5963	0.23
H-31	121089	2489	7.7	455	112.0	21.0	1.00	0.05	970	14.4	0.6	26.3	1192	0.42
H-32	131089	2637	5.7	1275	107.0	21.0	5.30	0.18	914	329.9	15.8	9.5	1628	0.24
H-33	261089	2662	7.2	900	180.0	27.0	1.70	0.04	911	178.0	5.7	33.2	1495	0.40

NOTA; C. E. conductividad eléctrica
Los análisis fueron realizados por CFE.

que el yacimiento penetrado por el pozo H-1 es de líquido dominante (Tello, 1984).

Para el resto de los pozos de Los Humeros la entalpía de mezcla es mucho mayor que la entalpía de un líquido saturado a la temperatura de yacimiento (Tabla 1), cuando esto se presenta se debe a que a condiciones de yacimiento en forma natural existe una fracción de vapor coexistiendo con la fase líquida (Tello, 1989).

Una de las causas del exceso de vapor o entalpía de los pozos es que las fases de vapor y agua no son transmitidas a través de las formaciones en el reservorio con igual facilidad ya que las dos fases se transmiten con diferencias relativas. Es también concebible que el exceso de vapor se deba a la evaporación de agua por calor de origen conductivo proveniente de la roca del reservorio, ya que la caída de presión causada por la extracción del fluido por medio de los pozos productores origina el enfriamiento (por ebullición) de este fluido y por esta razón hay que considerar un flujo extra de calor conductivo de la roca a ese fluido.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta otros factores en la estimación de la composición química del agua a condiciones de reservorio basada sobre los datos de exceso de vapor de los pozos. Si el reservorio contiene solamente agua, entonces es fácil relacionar la composición de las muestras hechas en superficie con las condiciones de reservorio. En el caso contrario, si el fluido en el pozo es un fluido de dos fases con exceso de vapor, no es posible relacionar la composición química del fluido en la superficie con las condiciones de reservorio, sin hacer algunas suposiciones fundamentales.

En este estudio la composición química del agua en Los Humeros fue evaluada suponiendo las dos posibles causas para el exceso de vapor de los pozos descritas con anterioridad (transferencia de calor conductivo de la roca y efectos de permeabilidad relativa para el flujo de ambas fases). Además, se consideró que ambos procesos ocurren en forma excluyente.

El primer caso supone que la transferencia conductiva de calor involucra evaporación de agua desgasificada (ya hervida), de tal forma que se añade vapor libre de gas al vapor formado con anterioridad. Este modelo aplicado al pozo H-1 implica que la descarga total representa una sola fase líquida en el yacimiento.

En el segundo caso, se supone que el exceso de vapor es debido a los efectos de permeabilidad relativa para las fases agua-vapor. Aquí, los cálculos de las concentraciones de agua en el yacimiento suponen dos fases en el reservorio, lo cual ocurre en los pozos H-6, H-8 y H-13.

Es importante mencionar que para los pozos H-9, H-10, H-11, H-12, H-16, H-17, H-18, H-19, H-20, H-23, H-27,

H-28, H-29, H-30, H-31, H-32 y H-33 el método de exceso de entalpía no es posible aplicarlo para corregir las concentraciones de los solutos en el yacimiento debido a que estos pozos producen poca agua, y la poca que producen es difícil muestrearla, o bien presentan entalpías que corresponden a las de un vapor saturado.

COMPOSICION A DESCARGA TOTAL Y EN EL YACIMIENTO

Considerando que las concentraciones de solutos en las fases individuales (agua y vapor) son función de la presión ejercida en la descarga, se puede decir que la concentración en la descarga total permanece constante cuando las condiciones de yacimiento no varían. Los componentes son distribuidos entre las distintas fases de acuerdo con la fracción de vapor (la cual es una función de la presión). De este modo la descarga total es una característica del reservorio.

La concentración de solutos de los fluidos evaporados a presión atmosférica se corrigió a descarga total usando la ecuación de Arnorsson y Sigurdsson, (1982).

$$C_{DT} = C_a (1 - X_v) + C_v X_v \quad (17)$$

Sabemos que

$$X_1 + X_v = 1 \quad X_1 = 1 - X_v \quad (18)$$

Si se considera que la concentración de los solutos en la fase vapor es despreciable, o bien, que se trate de un sistema de fase líquida únicamente entonces $C_v=0$, y si además sustituimos la ecuación (18) en la ecuación (17) tenemos que:

$$C_{DT} = C_a (1 - X_v) = C_a (X_1) \quad (19)$$

donde C_{DT} es la concentración en la descarga total del componente C, C_a es la concentración a presión atmosférica del componente C, y X_v es la fracción de vapor, la cual se calcula de acuerdo con:

$$X_v = H_o - H_a / H_v - H_a \quad (20)$$

donde H_o es la entalpía de mezcla y H_a y H_v son la entalpía de líquido y vapor a la temperatura de saturación respectivamente (esta última en el caso de Los Humeros es de 91°C).

Es importante determinar las concentraciones a condiciones de yacimiento, ya que es posible detectar variaciones en la composición del fluido del reservorio. Estas concentraciones pueden ser calculadas por medio de la siguiente expresión (Arnorsson y Sigurdsson, 1982):

$$C_{DT} = C_a (1 - X_v) = C_R (1 - X_v^R) \quad (21)$$

despejando obtenemos

$$C_R = C_{DT}/(1 - X_v^R) \quad (22)$$

donde C_R es la concentración a condiciones de reservorio del componente C, C_{DT} es la concentración del componente C en la descarga total y X_v^R es la fracción de vapor en el reservorio, la cual se calcula de acuerdo con,

$$X_v^R = H_o - H_a/H_a - H_v \quad (23)$$

donde H_o es la entalpía de mezcla y H_a y H_v son las entalpías del líquido y vapor a la temperatura del yacimiento. Esta última puede ser calculada por medio del geotermómetro de Na/K (Fournier, 1979).

En las Figuras 1 y 2 están representadas las concentraciones de cloruros en el yacimiento y a condiciones de descarga total contra el tiempo para los pozos H-1, H-6, H-8 y H-13. Se puede ver en estas figuras que solamente las concentraciones del pozo H-1 concuerdan muy razonablemente tanto a descarga total como a condiciones de yacimiento. Ahora bien, el hecho de que coincidan el contenido de cloruros en la descarga total como a condiciones de yacimiento significa que el pozo está produciendo en una zona de líquido dominante (Tello, 1984). Por lo tanto, cuando esto

ocurre la composición química a condiciones de yacimiento es igual a la descarga total. Para el pozo H-6 la composición química a condiciones de descarga total no es la misma que a condiciones de yacimiento. Esto indica que está produciendo en una zona de dos fases (Figura 1).

Para los pozos H-8 y H-13 nuevamente se presenta la separación entre ambos valores lo que indica que también estos pozos producen en una zona de dos fases (Figura 2).

Para el resto de los pozos como se mencionó en párrafos anteriores no es posible aplicar este método para corregir la concentración de los solutos a descarga total y a condiciones de yacimiento. En la Tabla 2 está referida la composición química a descarga total y a condiciones de yacimiento de los pozos H-1, H-6, H-8 y H-13.

CONCLUSIONES

La altura promedio a la cual se encuentran ubicados los pozos geotérmicos de Los Humeros es de 2820 m.s.n.m. De tal manera que al aplicar la ecuación de Clausius-Clapeyron para calcular la presión y temperatura de saturación para el campo geotérmico de Los Humeros se obtienen valores de 0.073 Mpa y 91 °C respectivamente. Al hacer la corrección de la composición química del agua separada de los pozos de Los Humeros evaporados a presión atmosférica y obtener las concentraciones que se tendrían a condiciones de descarga total y en el reservorio, basados en los datos de exceso de entalpía, se encontró que, el pozo H-1 produce en una zona de líquido dominante. El resto de los pozos de Los Humeros producen en una zona de fases.

Tabla 2

Composición química del agua separada a descarga total y a condiciones de yacimiento. La entalpía está dada en kJ/kg y la concentración en mg/l.

CONCENTRACION EN LA DESCARGA TOTAL										
POZO	FECHA	ENTALPIA	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	Cl	B	T Na/K
H-1	121089	1385	158	26	1.0	0.03	510	56	138	263
H-6	121089	2378	28	5	0.1	0.006	142	31	32	273
H-8	121089	2168	61	10	0.5	0.02	214	21	109	263
H-13	121089	1671	152	29	2.0	0.03	412	171	116	278

CONCENTRACION A CONDICIONES DE YACIMIENTO										
POZO	FECHA	ENTALPIA	Na	K	Ca	Mg	SiO ₂	Cl	B	T Na/K
H-1	121089	1385	182	30	1.0	0.03	596	65	161	263
H-6	121089	2378	110	20	0.4	0.02	552	122	122	273
H-8	121089	2168	160	26	1.0	0.04	562	55	286	263
H-13	121089	1671	213	40	2.0	0.04	577	239	162	278

T Na/K. Geotermómetro de sodio/potasio (°C) (Fournier, 1979).

CLORUROS CONTRA TIEMPO LOS HUMEROS

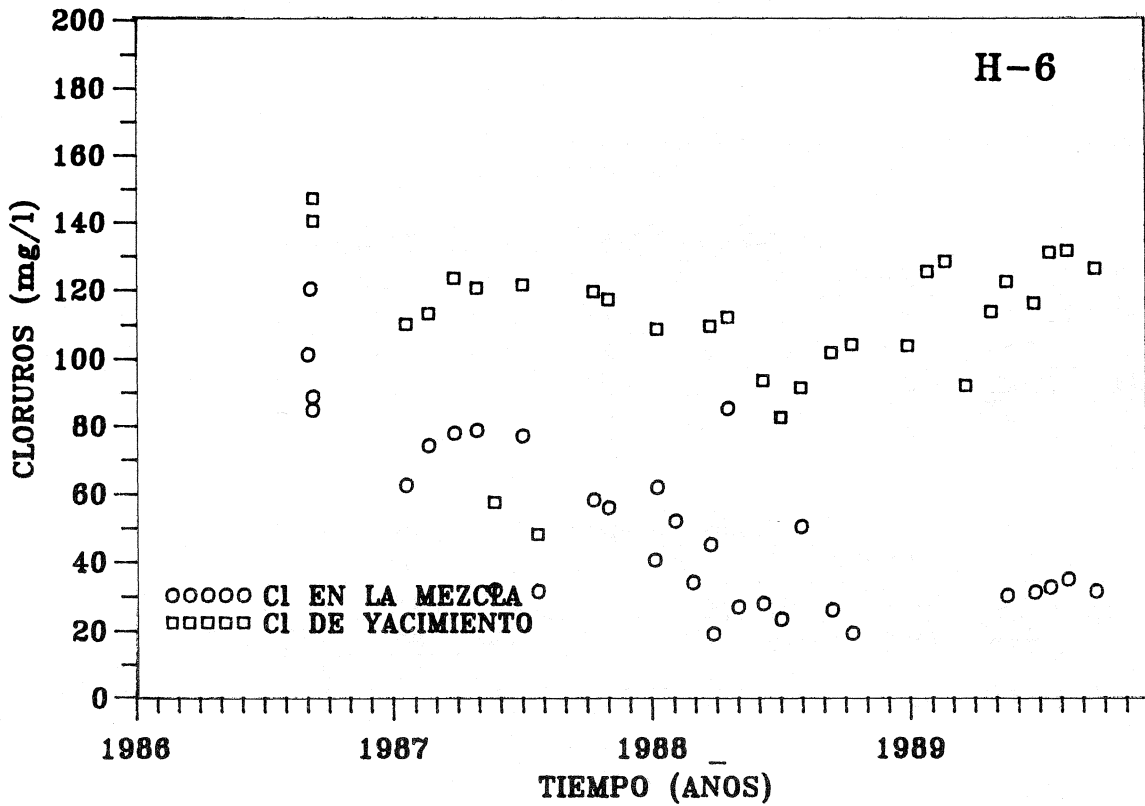
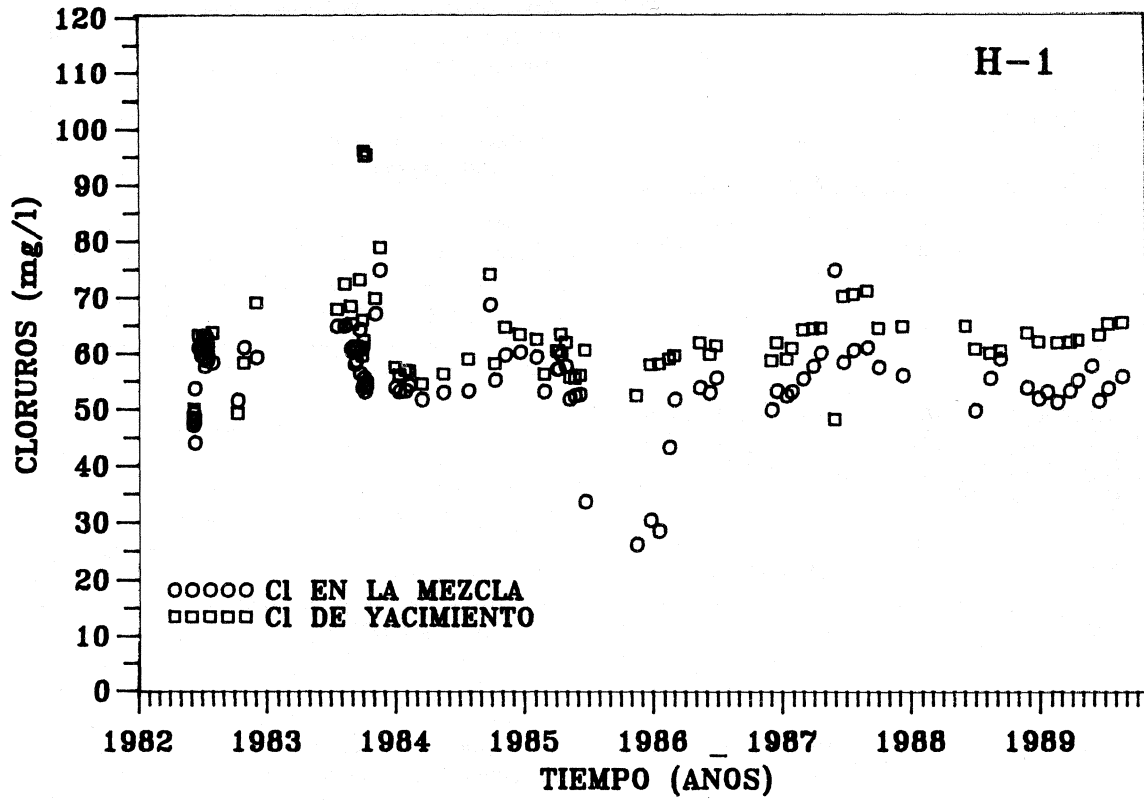


Fig. 1. Evolución de la concentración de cloruros con respecto al tiempo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Arriba pozo H-1, abajo pozo H-6.

CLORUROS CONTRA TIEMPO LOS HUMEROS

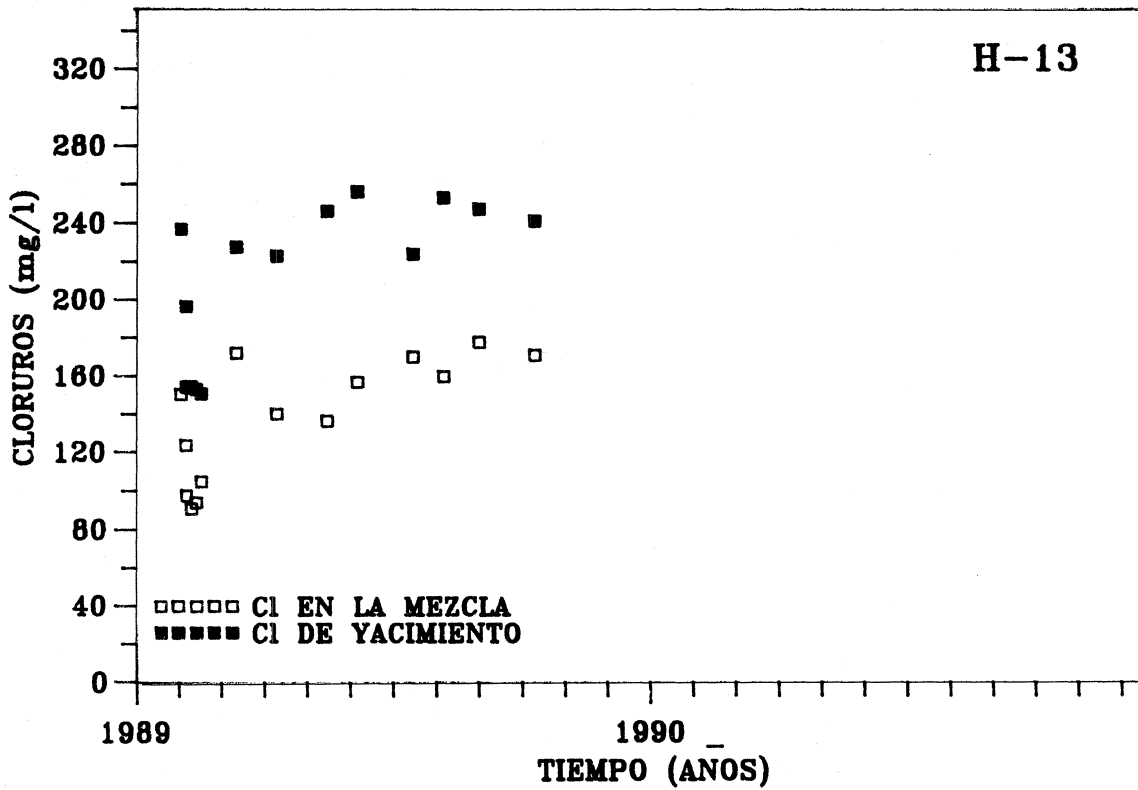
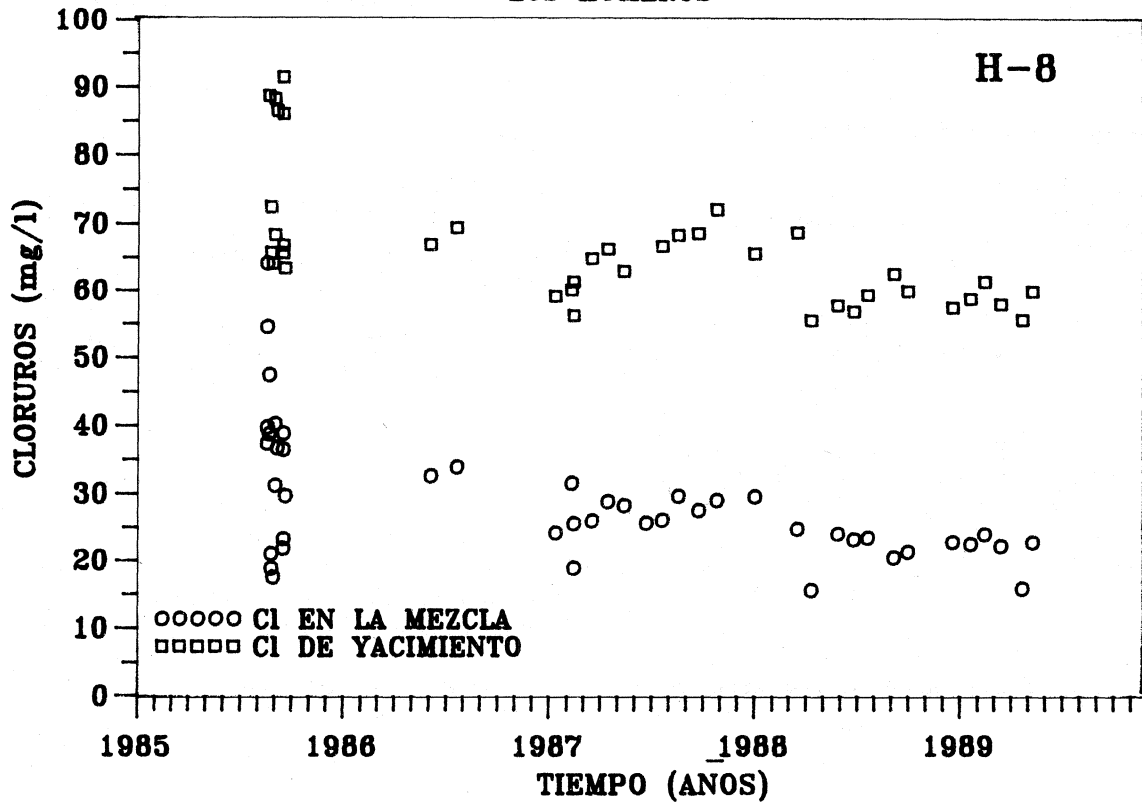


Fig. 2. Evolución de la concentración de cloruros con respecto al tiempo en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Arriba pozo H-8, abajo pozo H-13.

BIBLIOGRAFIA

ARNORSSON, S. y S. SIGURDSSON, 1982. The chemistry of Geothermal waters in Iceland I. Calculation of speciation from 0° to 370°C. Science Institute, University of Iceland, Dunhagiz, Reykjavik.

ALONSO, M. y J. E. FINN, 1976. Física: Volumen I: Mecánica Ed. Fondo Educativo Interamericano, S. A. pp.411-444.

FOURNIER, R. O. 1979. A revised equation for the Na/K Geothermometer. Geothermal Resource Council, *Trans.*, 3, 221-224.

HOUGEN, O. A., K. M. WATSON y R. A. RAGATZ, 1978. Principios de los procesos químicos. Ed. Reverté, S. A. pp. 80-89 y pp. 284-288.

MOSQUEIRA, R. S., 1966. Física General. Ed. Patria. pp. 155-156.

KEENAN, J. H., F. G. KEYES, P. G. HILL y J. G. MOORE, 1969. Steam Tables-Thermodynamic prop-

erties of water including vapor, liquid, and solid phases (International Edition-metric-units): John Wiley, New York, pp. 162.

SMITH, J. M. y H. C. VAN NESS, 1980. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. Ed. McGraw-Hill pp. 66-70.

TELLO, H. E., 1984. Química de los fluidos de descarga del pozo Humeros 1, CFE, Gerencia de Proyectos Geotermeléctricos. Informe 16-84. Morelia, Michoacán, México.

TELLO, H. E., 1989. Modelo geoquímico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. CFE, GPG. Informe 07/89. Morelia, Michoacán, México.

Enrique Tello Hinojosa
*Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos,
Comisión Federal de Electricidad
Alejandro Volta 655
58290 Morelia, Michoacán, México*