

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LA ROCA Y CONDICIONES TERMODINAMICAS INICIALES EN SISTEMAS HIDROTERMALES

Mario César Suárez Arriaga
Fernando Ascencio Cendejas

Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos
Comisión Federal de Electricidad. Fax : (45) 144735
A.P. 31-C, 58290 Morelia, Michoacán.

RESUMEN

Algunos sistemas hidrotermales con fluido en dos fases y uno o mas componentes - agua, sales y gases - presentan en condiciones naturales, perfiles iniciales de presión y temperatura singularmente característicos, donde en las porciones someras se aprecia la predominancia del vapor mientras que en las profundas predomina el líquido, con un estrato intermedio de transición. El saber cómo y por qué se forman estos perfiles en equilibrio, es importante tanto por razones científicas como comerciales. Hemos realizado varios experimentos numéricos estudiando la influencia de diversos parámetros en la formación termodinámica inicial de un yacimiento prototipo. Los resultados sugieren fuertemente que la influencia de la conductividad térmica de la roca entre la capa sello y el reservorio es decisiva en la formación original y la evolución en tiempos geológicos de los sistemas hidrotermales volcánicos en dos fases. Ajustando los cálculos a perfiles observados, es posible deducir el flujo térmico vertical transportado por conducción a través de la capa sello, hacia la atmósfera, existente en la zona simulada.

INTRODUCCION

En muchas regiones geotérmicas, el flujo superficial de energía térmica aparece en forma de manifestaciones superficiales diversas: suelos vaporizantes, fumarolas, géysers, lodos hirvientes, etc. En algunos de los sistemas hidrotermales mexicanos mas conocidos, como Los Azufres en el estado de Michoacán, o Los Humeros en Puebla, existen pozos con alta calidad de vapor, cuyos gradientes verticales de presión y temperatura medidos son pequeños. No obstante, las descargas de vapor, gas y calor observables en la superficie del terreno son importantes. Este transporte de masa y energía es explicable por la ocurrencia de un proceso bifásico convectivo, que tiene lugar principalmente en la dirección vertical. En este mecanismo, aplicable a sistemas volcánicos fracturados, el calor es transportado desde el fondo del yacimiento por vapor ascendente, el cual se condensa a cierta altura, en las cercanías de la capa sello, expulsando hacia arriba su energía interna; el líquido condensado desciende para evaporarse nuevamente. El proceso ha sido descrito con cierta profusión: Pruess (1985); Pruess y o. (1987); McKibbin y Pruess (1988); Iglesias y Arellano (1988); Suárez y o. (1989). Sin embargo, ese calor latente liberado en la condensación, sólo puede escapar del yacimiento a través de la capa sello mediante un proceso de conducción combinado a veces, con pequeñas descargas convectivas de fluido geotérmico a través de fisuras en la capa sello. Si así no fuera, presenciaríamos con harta frecuencia, la existencia de sistemas hidrotermales supercalentados, cercanos o arriba del punto crítico, debido al excesivo calentamiento del sistema casi cerrado. En realidad, la convección superficial es importante sólo a escala local, en focos bien ubicados. La mayor parte del flujo térmico regional es causada por la conducción (Tovar, R. y García, G., 1991). El parámetro que rige este fenómeno es la conductividad térmica presente en el yacimiento. Entre la superficie del campo geotérmico y el techo del reservorio, el gradiente de temperatura puede alcanzar valores tan altos como 1 °C/m, hasta llegar abruptamente a valores diez veces mayores en la vecindad de la frontera entre la capa sello y el mismo yacimiento. Por tanto, la conductividad térmica de la capa sello, debe ser un factor crítico para el transporte efectivo del calor ahí descargado.

Hemos realizado experimentos numéricos para investigar la influencia de la conductividad térmica de la roca, en la formación de las condiciones termodinámicas naturales que conforman a los yacimientos volcánicos en estado quasi-estacionario; incluyendo los efectos del bióxido de carbono presente en el fluido.

Estas investigaciones sugieren que la forma de los perfiles de presión y temperatura observados en tales sistemas, y que se caracterizan por un súbito salto o discontinuidad en los gradientes verticales respectivos, están dominados por el valor de la conductividad térmica en las cercanías de la capa sello separando al yacimiento de la superficie. En particular, ese valor controla totalmente la altura del punto de discontinuidad en los gradientes de presión y temperatura, originando reservorios dominados por vapor, si la conductividad térmica es pequeña; o dominados por líquido si la conductividad es grande. Un valor medio pudiera ser responsable de las condiciones iniciales observadas en el campo geotérmico de Los Azufres.

LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN EL YACIMIENTO

La conductividad térmica de la roca en un reservorio geotérmico, es un parámetro físico muy importante en la formación del mismo. La estimación de su valor permite calcular el flujo de calor subterráneo. Es además la causa de la distribución de temperaturas en el yacimiento así como de la delimitación de sus fronteras térmicas. La conductividad térmica de las rocas alteradas hidrotermalmente en el yacimiento, depende de la conductividad de los distintos minerales que la componen, de la conductividad del fluido geotérmico contenido, de la porosidad y de la geometría misma de los poros (Zimmerman, 1988).

En el campo geotérmico de Los Azufres se han medido en laboratorio, diversos valores de la conductividad térmica de la roca (andesitas) del yacimiento a diferentes profundidades, en diferentes pozos (Contreras y o., 1988). Esas mediciones pueden resumirse con ayuda de un modelo analítico de regresión lineal dado por :

$$K_T(z) = 1.87 - 1.76 \cdot 10^{-4} z \text{ [W/m/}^\circ\text{C]} , \text{ para } -79.0 < z < 1850 \text{ msnm.}$$

$$K_T(z) = 7.65 - 2.66 \cdot 10^{-3} z \text{ [W/m/}^\circ\text{C]} , \text{ para } 1850 < z < 2850 \text{ msnm.}$$

En un yacimiento, la influencia de $K_T(z)$ se aprecia claramente en la ecuación :

$$Q_T = -K_T \nabla T - \sum_i \frac{\kappa k_{ri}}{\mu_i} h_i \rho_i (\nabla P_i - \rho_i g) \dots \dots \dots (1)$$

Donde Q_T es el flujo térmico total en W/m^2 ; el primer término del segundo miembro es la conducción de calor debida al gradiente de temperatura. El 2º término del 2º miembro es la suma de componentes convectivas acopladas a la ley de Darcy, tanto en forma de líquido como en forma de vapor. Para gradientes de presión pequeños, es decir cuando hay poco flujo de masa, el término dominante es el conductivo.

ESTUDIOS NUMERICOS SOBRE K_T

Empleando el simulador numérico MULKOM para fluido geotérmico conteniendo CO_2 , desarrollado por el Laboratorio Lawrence Berkeley de California (Pruess, 1988), efectuamos una serie de experimentos numéricos, con el propósito central de investigar la influencia de la conductividad térmica de la capa sello, sobre el comportamiento y estabilidad termodinámica del reservorio. Los cálculos se hicieron sobre un modelo geológico vertical, heterogéneo, representando una zona de $10,000 \text{ m}^2$ y 3000 metros de espesor en el sector sur del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. En esa zona los perfiles de presión-temperatura han sido medidos y son aproximadamente representados por las siguientes regresiones:

$$P(z) = \begin{matrix} 180.46 - 0.071 z ; \text{ si } & 0 < z < 1600 \text{ msnm.} \\ 80.96 - 0.012 z ; \text{ si } & 1600 < z < 2600 \text{ msnm.} \end{matrix} \dots (2)$$

$$T(z) = \begin{matrix} 351.65 - 0.041 z ; \text{ si } & 0 < z < 1600 \text{ msnm.} \\ 290.96 - 0.007 z ; \text{ si } & 1600 < z < 2600 \text{ msnm.} \end{matrix} \dots (3)$$

La sección vertical se dividió en 16 estratos verticales cuyas dimensiones y propiedades petrofísicas están indicadas en la Tabla 1. Los valores numéricos de las propiedades de la roca, se obtuvieron por interpolación de las mediciones reportadas por Contreras y o. (1987); los valores de la permeabilidad vertical son representativos gruesos de algunas pruebas de presión. La sección modelada tiene su base en un acuitardo regional (ACUIT), de donde proviene el calor profundo, situado aproximadamente a nivel del mar (0 msnm); mientras que la capa sello (CAP01) toca la atmósfera a 3000 msnm. Los elementos TEJ01 hasta TEJ13 representan al yacimiento.

Manteniendo estas condiciones fijas, se asignaron distintos valores crecientes a la conductividad térmica de la capa sello, entre [0.1 , 1] W/m/°C, según se detallan en la Tabla 2. Se hicieron los cálculos correspondientes para cada valor asignado y se graficaron los principales resultados de la Presión, Temperatura, Saturación de Vapor y Presión Parcial del CO₂, una vez que el sistema alcanzó un estado permanente en equilibrio termodinámico.

TABLA 1.- PARAMETROS PETROFISICOS DE LOS NIVELES CONSIDERADOS EN EL MODELO GEOLOGICO.

Espesor (m)	NIVEL	DENSIDAD ROCA (kg/m ³)	POROSIDAD (%)	PERMEABILIDAD Vertical (m ²)	Conductividad Térmica(W/m/°C)
-	ATMOS	-	-	1.0 10 ⁻¹²	0.025
600	CAP01	2251	1.95	1.0 10 ⁻²⁰	K _T
300	TEJ01	2355	11.95	1.0 10 ⁻¹⁴	1.65
100	TEJ02	2434	8.32	1.0 10 ⁻¹⁵	2.19
100	TEJ03	2434	8.32	1.0 10 ⁻¹⁵	2.45
100	TEJ04	2434	8.32	1.0 10 ⁻¹⁵	2.72
100	TEJ05	2434	8.32	1.0 10 ⁻¹⁵	1.56
100	TEJ06	2434	8.32	1.0 10 ⁻¹⁵	1.58
100	TEJ07	2528	5.50	1.0 10 ⁻¹⁵	1.59
100	TEJ08	2528	5.50	1.0 10 ⁻¹⁵	1.61
100	TEJ09	2528	5.50	1.0 10 ⁻¹⁵	1.63
100	TEJ10	2528	5.50	1.0 10 ⁻¹⁵	1.65
100	TEJ11	2677	2.95	1.0 10 ⁻¹⁵	1.66
200	TEJ12	2677	2.95	1.0 10 ⁻¹⁵	1.69
400	TEJ13	2677	2.95	1.0 10 ⁻¹⁵	1.74
500	ACUIT	2834	1.59	1.0 10 ⁻¹⁸	1.82

TABLA 2.- VALORES EMPLEADOS DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA EN LA CAPA SELLO EN W/m/°C

K _T	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.300	0.460	0.600	1.000
----------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Según se aprecia en las figuras 1, 2, 3 y 4, el parámetro K_T es capaz de controlar por sí solo, la evolución de la termodinámica en un yacimiento geotérmico y, según lo sugieren los resultados obtenidos, es el principal responsable del estado de equilibrio que alcancen las condiciones iniciales en un reservorio en estado natural (sin explotación). En el rango de valores de K_T estudiados, el valor mas alto de $1.0 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, correspondería a un yacimiento con perfil vertical de líquido comprimido con una muy pequeña cantidad de vapor en el nivel superior. Este comportamiento en presión y en saturación de vapor, es muy similar para valores de K_T inferiores a 1.0 y mayores a $0.46 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$; no obstante la temperatura sí experimenta un incremento debido a que va habiendo un menor flujo de calor hacia el exterior del reservorio.

A partir de $K_T \leq 0.30 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, el perfil bifásico somero dominado por vapor se va acentuando, a la vez que se amplía el rango de presiones aproximadamente vaporestáticas y el punto de discontinuidad, claramente apreciable en el gradiente de presión, se profundiza. Para $K_T = 0.30 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, ese punto se sitúa a los 2000 msnm. Para $K_T = 0.1 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$, el punto de discontinuidad se sitúa a los 1250 msnm. Este último caso, corresponde al mayor calentamiento del reservorio, en donde habrían casi 1000 metros de espesor con una saturación constante de vapor igual a casi un 65 %.

El comportamiento teórico del CO_2 es bastante mas complejo, según puede apreciarse en la figura 4. Cabe mencionar que la fracción másica real de CO_2 contenida en el fluido producido es distinta en diferentes pozos. Varía entre 0.2 % (pozo Az-4) y 8.5 % (pozo Az-34), en la descarga de vapor a una presión de separación de 10 bar. El contenido mas alto de CO_2 se ha encontrado en pozos someros con alta calidad de vapor localizados en la vecindad de la falla Puenteillas. En esta área hay un gradiente en la concentración de CO_2 , positivo en dirección W-E. En todos los casos estudiados, el bióxido de carbono se acumula en niveles someros, alcanzando máximas concentraciones en la vecindad de la capa sello. Su respuesta a los diferentes valores de conductividad térmica, es muy heterogénea y no hay una correspondencia simple entre K_T y la presión parcial de este gas incondensable. Nótese que en todos los casos simulados, se supuso una concentración constante del CO_2 en el acuitardo, correspondiente a una presión parcial constante e igual a 1 bar absoluto.

El valor de conductividad térmica que mejor ajusta el perfil de presiones medido en el sector sur de Los Azufres es $K_T = 0.175 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$. Este permite un flujo de calor conductivo promedio igual a 0.075 W/m^2 , descargando a través de la capa sello hacia la atmósfera. Para el caso de Los Humeros, K_T debería ser inferior o igual a $0.10 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$.

REFERENCIAS

- CONTRERAS E., DOMINGUEZ B., IGLESIAS E., GARCIA A., HUITRON R., 1988. 'Compendio de Resultados de Mediciones Petrofísicas en Núcleos de Perforación del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.', Geotermia-Revista Mex. de Geoenergía, Vol.4 No.2, pp. 79-105.
- IGLESIAS E., ARELLANO V., 1988. 'El Campo Geotermico de Los Azufres: Prototipo de los Sistemas Hidrotermales "VAPLIQ"'. Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía, Vol.4. No.1, pp. 229-246.
- PRUESS K., 1985. 'A Quantitative Model of Vapor Dominated Geothermal Reservoirs as Heat Pipes in Fractured Porous Rock'. (LBL-19366).
- PRUESS K., CELATI R., CALORE C., CAPPETTI G., 1987. 'On Fluid and Heat Transfer in Deep Zones of Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs'. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford Ca.
- PRUESS K., 1988. 'SHAFT, MULKOM, THOUGH: A Set of Numerical Simulators for Multiphase Fluid and Heat Flow.' Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía, Vol.4, No.1, pp. 185-202.
- TOVAR, R. Y GARCÍA, G. (1991). Evaluación de la Descarga Térmica Superficial en la Zona Geotérmica de Araró, Mich. Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía, Vol.7, No.2, pp. 117-143.
- SUÁREZ, C., PRUESS, K. Y LIPPMANN, M. (1989). Preliminary Modeling Studies on Los Azufres Geothermal Field: Free Convection in Tejamaniles. Proceedings: Symposium in the Field of Geothermal Energy (Acuerdo bilateral entre el Departamento de Energía de los EUA y la Comisión Federal de México). San Diego, California, 4-5 de Abril de 1989 (pp.161-184).
- ZIMMERMAN, R. (1988). Thermal Conductivity of Fluid-Saturated Rocks. Preprint LBL-25197. Lawrence Berkeley Laboratory, Earth Sciences Division.

Fig.1 - DISTRIBUCION DE PRESIONES EN FUNCION DE Kt.

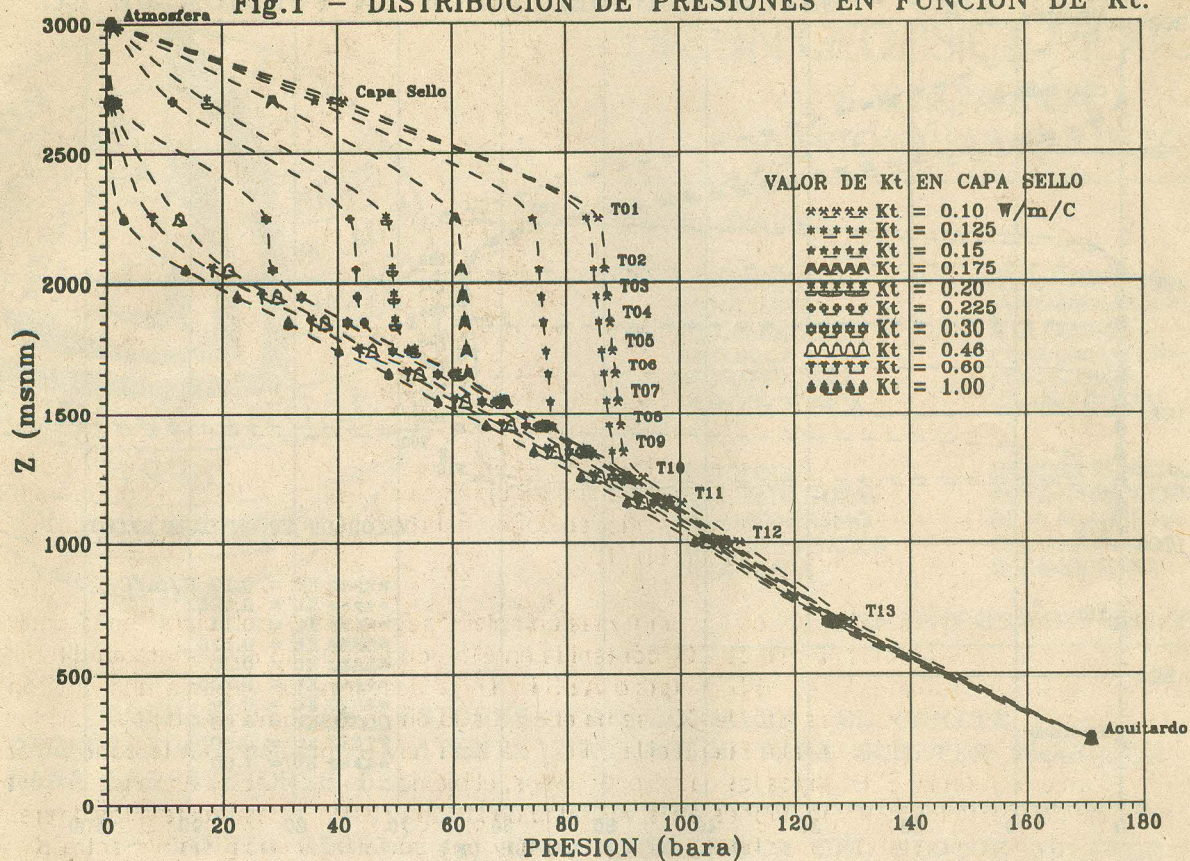


Fig.2 - DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN FUNCION DE K_t .

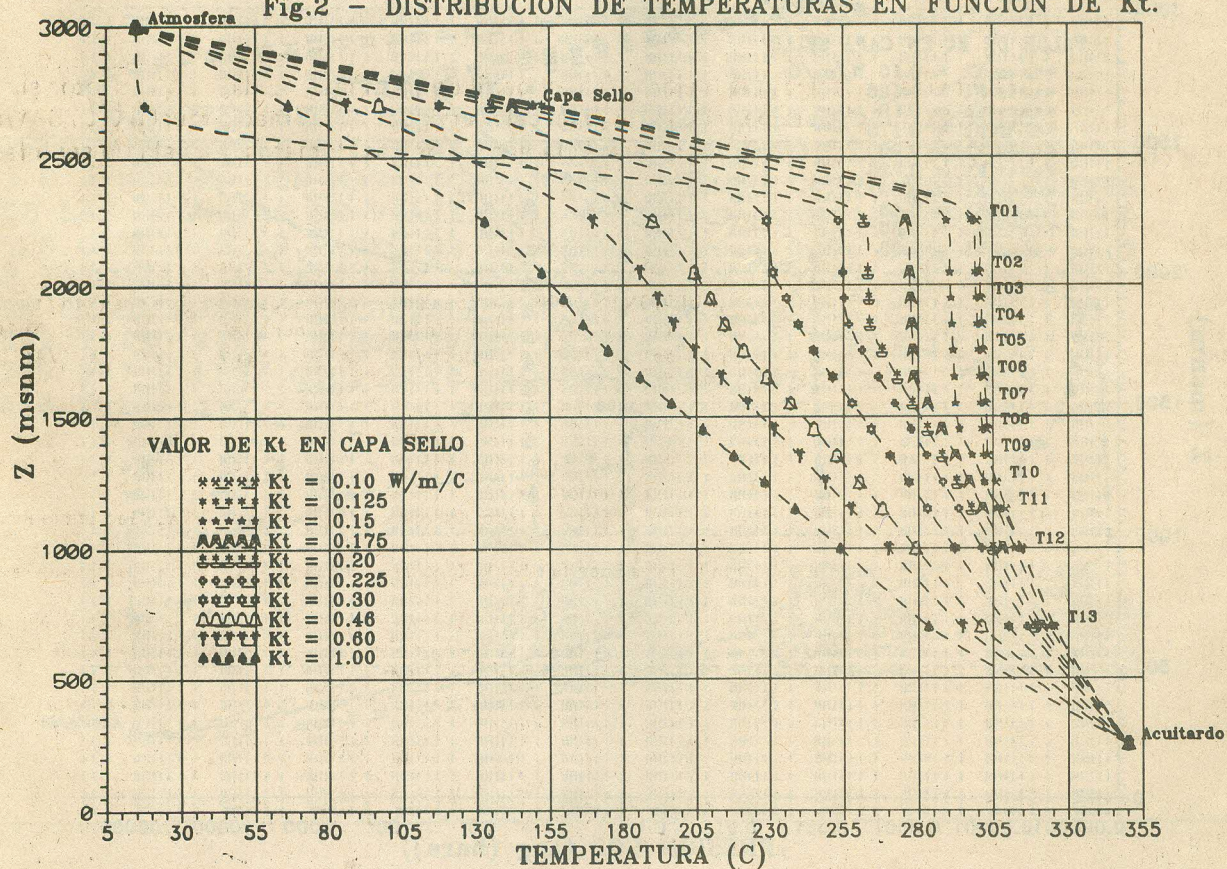


Fig.3 - SATURACION DEL VAPOR EN FUNCION DE Kt.

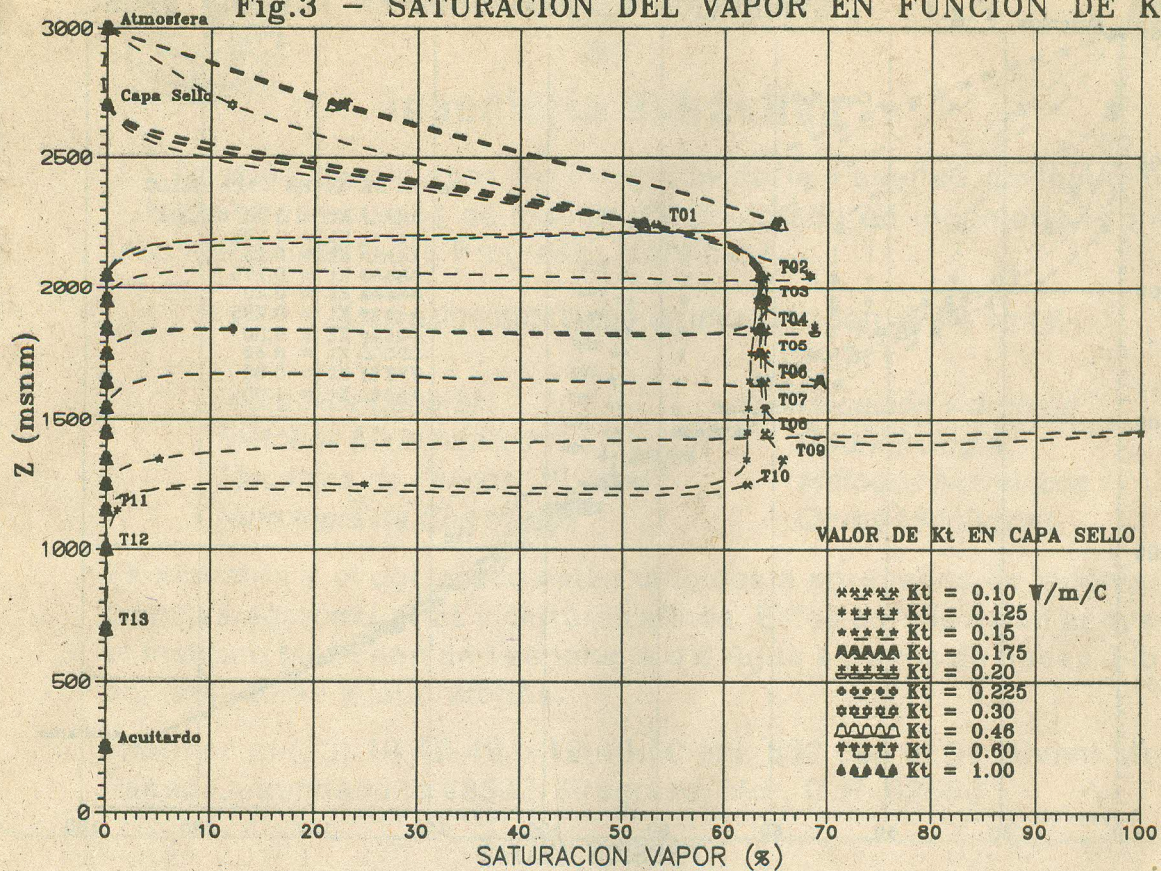
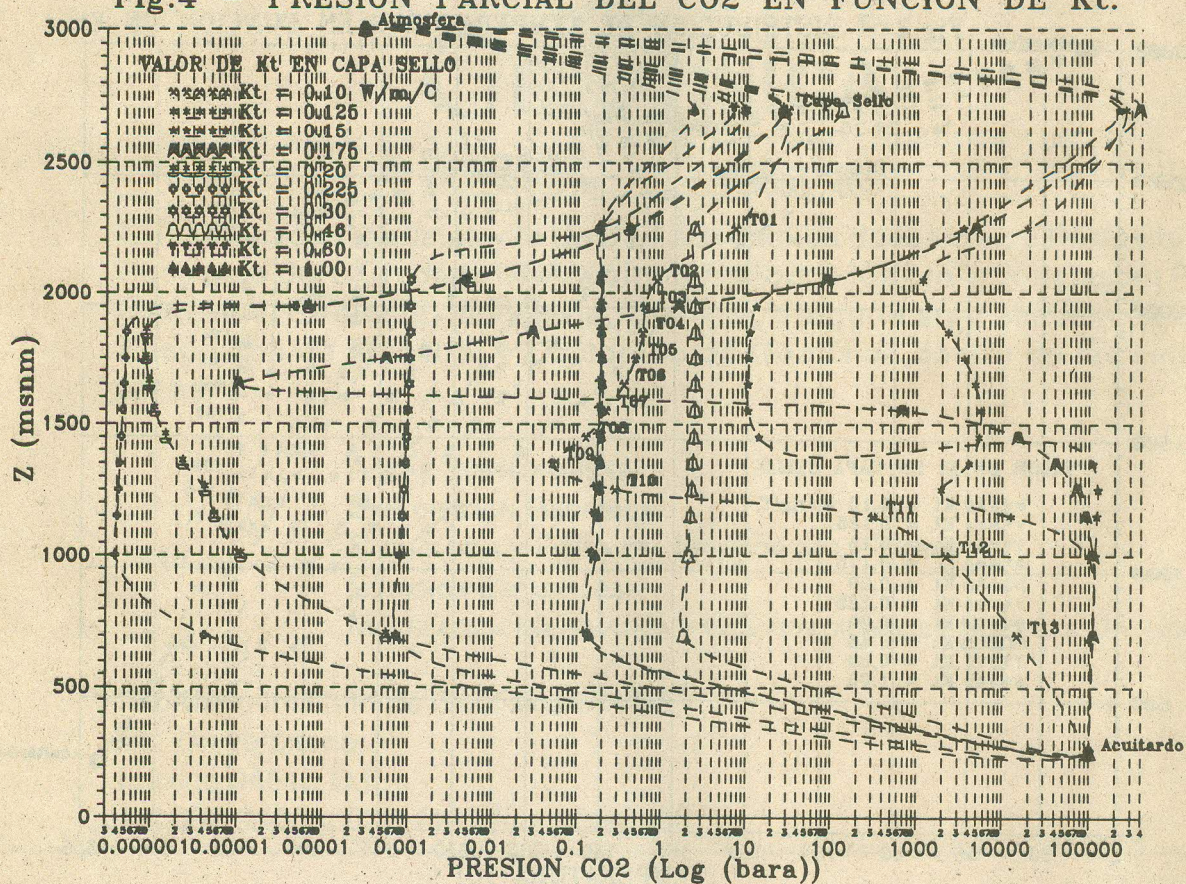


Fig.4 - PRESION PARCIAL DEL CO2 EN FUNCION DE Kt.





REUNION 1993 UNION GEOFISICA MEXICANA

8-12 NOVIEMBRE
PUERTO VALLARTA, JALISCO

TEMAS A TRATAR

SISMOLOGIA
GEOQUIMICA
VOLCANOLOGIA
TECTONICA
GEOHIDROLOGIA
SISMOTECTONICA

EXPL. GEOFISICA
MATEMATICAS APLICADAS
A LA GEOFISICA
CONTAMINACION
ATMOSFERICA
CAMBIO GLOBAL

PETROLOGIA
GEOL. ESTRUCTURAL
GEOMAGNETISMO
FS. QUIM. INTERIOR
DE LA TIERRA

CIENCIAS ESPACIALES
AERONOMIA Y CIENCIAS
DE LA ATMOSFERA
CLIMATOLOGIA
OCEANOGRAFIA

RECEPCION DE RESUMENES HASTA SEPTIEMBRE 10

ADEMAS DE LAS SESIONES TRADICIONALES, EL COMITE ORGANIZADOR HACE UNA ATENTA INVITACION PARA SOMETER TRABAJOS PARA LAS SESIONES DE:

- CAMBIO GLOBAL
- GEOHIDROLOGIA
- CRATER CHICKXULUB
- SISMOTECTONICA
- TECTONICA DEL BLOQUE JALISCO
- TECTONICA DEL GRABEN ACAMBAY
- TECTONICA DE BAJA CALIFORNIA
- VOLCANISMO MONOGENETICO

EL HOTEL SEDE, CONTINENTAL PLAZA VALLARTA, OFRECE PRECIO ESPECIAL A LOS ASISTENTES AL EVENTO. LOS PAQUETES POR 3 O 4 NOCHES SON MAS ECONOMICOS Y PUEDEN COMPRARSE A TRAVES DE LAS AGENCIAS DE VIAJE. UNA DE ESTAS AGENCIAS ES MAGNITUR CON OFICINAS EN PASEO DE LA REFORMA 20 - 307, TELS 703 3817 Y 703 2563; EN TIJUANA CUAUHTemoc 1209 - 306, TEL 828 877; EN GUADALAJARA CIRCUNVALACION A. YAÑEZ 2567 - G, TELS 159 509 Y 150 844; EN MONTERREY LA BARCA 1128, TELS 337 057 Y 337 357 Y LEON GTO. BLVD. LOPEZ MATEOS 236 - 201, TELS 166 525 Y 130 333.

INFORMES

E. GOMEZ
CIENCIAS de la TIERRA
CICESE APDO. POSTAL 2732
ENSENADA 22800 B.C.
TEL 91 617 4-45-01 AL 06
FAX 91 617 4-49-33

F. MEDINA
IGF-UNAM
APDO. POSTAL 2681
ENSENADA 22800 B.C.
TEL 91 617 4-46-02
FAX 91 617 4-46-03

C. GAY
UNAM
C. DE LA ATMOSFERA
CD. UNIVERSITARIA
MEXICO 04510 D.F.
FAX 91 5 548-97-81



Maestría y Doctorado en Ingeniería Hidráulica



La División de estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM ofrece cursos de maestría y doctorado en Ingeniería Hidráulica en sus instalaciones de Progreso, Morelos.

Las asignaturas que se imparten son, entre otras:

Hidraulica general
Métodos Matemáticos
Mecánica de Fluidos
Hidrología de Superficie

Irrigación y drenaje
Geohidrología
Métodos Numéricos
Obras Hidráulicas

La maestría y el doctorado están dirigidos a egresados de ingeniería civil, ciencias agropecuarias y carreras afines. Estos cursos están apoyados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua a través de becas, biblioteca, computadoras y laboratorios.

Informes al (73) 19-40-49 o 19-40-00 ext. 532 con el Dr. Alvaro Muñoz en Paseo Cuauhnáhuac #8532, Progreso, Mor. C.P. 62550

POSGRADO EN Geofísica



Unidad Académica de los Ciclos
Profesionales y de Posgrado del
Colegio de Ciencias y Humanidades

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

El instituto de Geofísica y la Unidad Académica de los ciclos Profesional y de Posgrado del CCH de la UNAM ofrecen a todos los profesionales en Física, Geofísica, Geología, Ingeniería, Química, o alguna area academica afín, los Posgrados de Maestría y Doctorado de Geofísica dentro de las siguientes areas:

AGUAS SUBTERRANEAS
EXPLORACIÓN GEOFÍSICA
SISIMOLOGÍA Y FÍSICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA
ESTUDIOS ESPACIALES
MODELACIÓN MATEMÁTICA Y COMPUTACIONAL DE SISTEMAS GEOFÍSICOS

Informes: Instituto de Geofísica UNAM
Cd. Universitaria
México 04510 D.F.
Tel 662-4130 y 622-4137 Fax 550-2486