

Importancia de la topografía regional en la simulación del régimen térmico en 3-D del campo geotérmico de Cerritos Colorados, Jalisco, México

E. Gómez-Arias^{1,2} y S.P. Verma³

¹Cátedras Conacyt, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, DF, correo:

egomezar@conacyt.mx. ²Departamento de Geología, División de Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Carretera Tijuana-Ensenada No. 3919, Zona Playitas, 22860, Ensenada BC., México. Correo: gomezar@cicese.mx. ³Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco s/n, Centro, Temixco, Morelos 62580, México, correo: spv@ier.unam.mx.

Resumen

El campo geotérmico de Cerritos Colorados (mejor conocido como La Primavera), Jalisco, se localiza en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Actualmente no se encuentra en explotación pero reportes en la literatura indican un potencial de 75 MW. El presente trabajo se centra en la propuesta de mejorar el modelado térmico en 3-D del yacimiento geotérmico, acoplado a una cámara magmática como fuente de calor primaria, considerando la topografía del campo en forma más realista. Para el modelado térmico se utiliza el TCHEMSYS (*Thermal and CHEmical Modeling of a volcanic-geothermal SYStem*) con una nueva subrutina que genera y almacena la topografía regional y la integra en la solución de transferencia de calor (el cual se resuelve por el método de volumen finito), tomando en cuenta la geología del subsuelo de acuerdo con la litología cortada por los pozos reportada en la literatura. El desarrollo de esta subrutina permitirá simular de manera más realista el régimen térmico del yacimiento geotérmico. Considerando que actualmente la tecnología de cómputo ha avanzado, se considera un dominio de 30 km en dirección este-oeste, 30 km en dirección norte-sur y 20 km de profundidad (1800 km³ de volumen a simular) con una malla de volúmenes de control de 50 m de arista, lo que resulta en 144 millones de volúmenes de control. La necesidad de refinar la malla obedece a la cercanía entre los pozos y a los cambios de temperaturas medidas y reportadas en la literatura a diferentes profundidades de los pozos. Con la subrutina de la topografía integrada al TCHEMSYS, se pretende mejorar los resultados publicados por Verma y Gómez-Arias (2014) al estimar temperaturas más cercanas a las medidas y reportadas en la literatura de los pozos del campo geotérmico. Una vez logrado este objetivo, la nueva metodología será de gran utilidad para aplicaciones en otros campos geotérmicos, así como para estudios térmicos en nuevas zonas geotérmicas.

Palabras clave: Modelado térmico en 3-D, cámara magmática, yacimiento geotérmico, TCHEMSYS, volumen finito, subrutina de topografía integrada.

Importance of regional topography for simulating the 3-D thermal regime of the Cerritos Colorados geothermal field, Jalisco, Mexico

Abstract

The Cerritos Colorados geothermal field (known as La Primavera), Jalisco, is located in the Mexican Volcanic Belt (MVB). Currently, this field is not in operation, but literature reports indicate a potential of 75 MW. The interest of this work focuses on the proposal to improve the thermal modeling in 3-D of the geothermal reservoir (coupled to a magma chamber as primary heat source), considering more

realistically the topography of the field. TCHEMSYS (Thermal and CHEmical Modeling of a volcanic-geothermal SYStem) was used along with a new subroutine that generates and stores the regional topography and integrates the information into the heat transfer solution (which is solved by the finite volume method). The required information is obtained from the lithology cut by the wells as reported in the literature. The development of this subroutine will allow more realistic simulation of the thermal regime of the geothermal reservoir. Because the current computer technology has now significantly improved, we considered a domain of 30 km east-west, 30 km north-south and 20 km deep (1800 km^3 of volume) with a mesh of 50 m control volumes, which resulted in 144 million control volumes. The need to refine the mesh originated from the proximity of the wells and the differences between the measured and reported temperatures. With the new subroutine integrated to the TCHEMSYS, we intend to improve the results reported by Verma and Gómez-Arias (2014). The new methodology will be useful for applications in other geothermal fields as well as in thermal studies for new geothermal areas.

Keywords: 3-D thermal modeling, magma chamber, geothermal reservoir, TCHEMSYS, finite volume, integrated topography subroutine.

1. Introducción

La simulación del campo de temperaturas en yacimientos geotérmicos a partir del emplazamiento de cámaras magmáticas constituye un área de estudio importante en cuanto al origen y evolución de calderas, así como la estimación del potencial geotérmico en estos sistemas naturales (Spera et al., 1982; Giberti et al., 1984; Verma, 1985a, 1985b; Tait, 1988; Giberti y Sartoris, 1989; Valentine, 1992; Stimac et al., 2001).

El campo geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC; antes conocido como La Primavera) se ubica en la parte oeste del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), en el estado de Jalisco (Figura 1), cerca de la triple unión de tres rifts o sistemas de graben, conocidos como Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala. Los pozos perforados en el campo geotérmico, con profundidades de hasta 2986 m, indican la presencia de altas temperaturas según reportes de Mahood (1977), Mahood et al. (1983), Villa Merlo et al. (1987), Yokoyama y Mena (1991), y Maciel-Flores y Rosas-Elguera (1992). El campo actualmente no se encuentra en explotación, pero reportes en la literatura indican un potencial de 75 MW (p.ej. Gutiérrez-Negrín y Quijano-León, 2004).

Escasos estudios de modelado y simulación térmica del campo geotérmico han sido reportados en la literatura. Verma y Rodríguez-González (1997) desarrollaron un modelo en 2-D, considerando el diámetro de la caldera entre 10 – 12 km y una cámara magmática a diferentes profundidades (5 – 7 km). Ellos compararon los resultados de las isotermas con las temperaturas medidas y reportadas de los pozos geotérmicos. Verma et al. (2012) realizaron un modelado térmico en 3-D, en el cual consideraron el diámetro de la caldera de 12 km, el volumen de la cámara magmática de 400 a 700 km^3 (en intervalos de 100 km^3) a profundidades entre 4 a 7 km (en intervalos de 1 km) y tres tiempos de emplazamiento de la cámara de 0.240 Ma, 0.120 Ma y 0.095 Ma, además de tomar en cuenta la reinyección de magma. Los resultados de las simulaciones se compararon con los datos de temperatura de cinco pozos del campo. El trabajo más reciente fue reportado por Verma y Gómez-Arias (2014). En este trabajo, los autores realizaron un estudio de independencia en cuanto al tiempo de discretización de

la ecuación de trasferencia de calor conductivo en estado transitorio en 3-D y el tamaño de la malla utilizada para resolver la ecuación, considerando un esquema de solución numérica mediante el método de volumen de control. El estudio fue aplicado a dos campos geotérmicos en México: Los Humeros, Puebla, y La Primavera, Jalisco (el CGCC). Para el caso del CGCC, los autores compararon las temperaturas simuladas con las de los pozos reportados en la literatura.

Del contexto anterior, el objetivo del presente trabajo se centra en mejorar el campo de temperaturas en 3-D del CGCC, considerando de gran interés la topografía regional, que en los trabajos previos no ha sido tomado en cuenta. El único trabajo que simula en campo de temperaturas en 3-D, considerando la topografía es el reportado por Guerrero-Martínez y Verma, 2013, para el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes. También se utiliza una malla fina de 50 m de arista, deltas de tiempo de simulación de 50 años (para la parte temporal de la ecuación) y reinyección de magma durante el emplazamiento y evolución térmica de la cámara magmática, lo que sugiere un modelo más realista y que podría acercarse más a las temperaturas estabilizadas de los pozos del campo reportados en la literatura, con respecto al los trabajos antes citados.

2. Geología del campo geotérmico

La geología de la caldera del CGCC, que tiene alrededor de 12 km de diámetro, ha sido estudiada y reportada por varios autores (Mahood, 1977, 1980, 1981a, 1981b; Mahood y Drake, 1982; Mahood et al., 1983; Villa Merlo et al., 1987; Mahood y Halliday, 1988; Michael, 1988; Alatorre-Zamora y Campos-Enríquez, 1991; Yokoyama y Mena, 1991; Maciel-Flores y Rosas-Elguera, 1992; Verma y Rodríguez-González, 1997; Campos-Enríquez et al., 2005). Diferentes eventos eruptivos fueron datados por Mahood y Drake (1982) utilizando el método de K–Ar, con edades que varían entre 0.145 y 0.025 Ma).

La caldera del CGCC es un complejo volcánico muy joven de edad Pleistoceno Tardío, en el que las lavas pre-caldera más antiguas son riolitas alcalinas de alrededor de 65 m de espesor, a unos 400 m de profundidad. Las primeras erupciones de lavas pre-caldera tuvieron lugar entre 0.145 y 0.100 Ma aproximadamente. La erupción que dio origen a la formación de la caldera tuvo un volumen de 40 km³ dando lugar a las ignimbritas de la Toba Tala, y ocurrió alrededor de hace 0.095 Ma. La Toba Tala y sedimentos recubren las rocas alcalinas. Poco después, se emplazaron unos 5 km³ de domos centrales y domos anulares. La erupción de domos anulares más jóvenes (alrededor de 3 km³) tuvo lugar hace aproximadamente 0.075 Ma, lo que fue seguido por el levantamiento y la erupción final de lavas en la parte sur de la caldera (alrededor de 7 km³) entre hace 0.060 y 0.025 Ma.

En la Figura 2 se muestra un mapa de la geología superficial simplificada de la caldera del campo geotérmico de Cerritos Colorados, así como la localización de los pozos geotérmicos. En la Figura 3 se muestra la geología del subsuelo con base en los núcleos perforados por los pozos PR-1, PR-2, PR-5, PR-8, PR-9 y PR-12 (en esta figura sólo se muestran dos de ellos, el PR-1 y el PR-9). Se observa la existencia de rocas intrusivas (granitos y granodioritas) por debajo de los 3000 m de profundidad.

3. Modelo conceptual y metodología

Se llevó a cabo la simulación térmica en 3-D del CGCC sobre un área de 30 km en dirección X (este – oeste), 30 km en dirección Y (norte – sur) y 20 km de profundidad, lo que corresponde a 18,000 km³ de volumen simulado. El modelado numérico toma en cuenta la topografía regional en coordenadas UTM (Figura 4) como una subrutina acoplada al TCHEMSYS. La fuente de calor primaria corresponde a una cámara magmática de 600 km³ (Verma et al., 2012 y Verma y Gómez-Arias, 2014). La cima de la cámara se ubica a 4 km de profundidad (ver Tabla 1) y se consideró la reinyección de magma. El modelo geológico del subsuelo considera cinco estratos (Verma et al., 2012; Verma y Gómez-Arias, 2014; ver Figura 3): el primero con un espesor de 17.00 km de rocas ígneas intrusivas; le sobreyan 1.15 km de andesitas, una capa de 0.100 km de riolitas, otra capa de 0.75 km de andesitas y finalmente una capa de 1.00 km de espesor de riolitas.

Tabla 1. Condiciones iniciales y de frontera utilizados para el modelado térmico del campo geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC).

Información para la construcción de la malla	
Longitud en dirección x (este – oeste) (km)	30
Longitud en dirección y (norte – sur) (km)	30
Longitud en dirección z (profundidad) (km)	20
Volúmenes de control	
$\Delta x = 0.05$ km	600
$\Delta y = 0.05$ km	600
$\Delta z = 0.05$ km	400
Condiciones de emplazamiento	
Volumen de la cámara magmática (V_{CM}) (km ³)	600
Radio de la cámara magmática (R_{CM}) (km)	6
Cima de la cámara magmática (d_{CM}) (km)	4
Temperatura de emplazamiento (°C)	1350
Condiciones de frontera	
Temperatura de la superficie (T_s) (°C)	25
Gradiente térmico (ΔT_g) (°C/km)	30
Tiempo de simulación	
Tiempo de discretización (Δt) (años)	50
Tiempo total de simulación (t) (años)	150,000

Las propiedades termofísicas de las rocas fueron tomadas de la literatura (Yokoyama y Mena, 1991; Verma y Rodríguez-González, 1997; Verma et al., 2012). La información y datos considerados para el modelo conceptual se encuentran resumidos en la Tabla 2. Se asumió que el yacimiento geotérmico del CGCC tiene un espesor de 1 km y se localizado entre 1.5 y 2.5 km de profundidad.

Tabla 2. Condiciones geológicas para el modelado térmico del campo geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC).

Estratos geológicos	
1: Granito-granodiorita (km)	17.00
Conductividad térmica (W/mK)	2.60
Calor específico (J/kg K)	1073

Densidad (kg/m ³)	2460
2: Andesita (km)	1.15
Conductividad térmica (W/mK)	1.28
Calor específico (J/kg K)	1151
Densidad (kg/m ³)	2180
3: Riolita (km)	0.10
Conductividad térmica (W/mK)	2.68
Calor específico (J/kg K)	1074
Densidad (kg/m ³)	2460
4: Andesitas menores (km)	0.75
Conductividad térmica (W/mK)	1.28
Calor específico (J/kg K)	1073
Densidad (kg/m ³)	2460
5: Riolita (km)	1.00
Conductividad térmica (W/mK)	2.08
Calor específico (J/kg K)	900
Densidad (kg/m ³)	2200

Para realizar el modelado térmico en 3-D se utilizó el simulador TCHEMSYS (Thermal and CHEmical Modeling of a volcanic-geothermal SYStem) desarrollado por Verma y Andaverde (2007). En cuanto a la topografía regional, se desarrolló una subrutina en lenguaje Fortran que ha sido acoplada al TCHEMSYS con el objetivo de estimar en forma más realista campos de temperatura en calderas geotérmicas y en futuro aplicable a volcanes activos. En la Figura 4 se muestra la topografía del CGCC. La ecuación de conservación de energía (Ec. 1) se resuelve numéricamente en coordenadas cartesianas por el método de volumen de control (Patankar, 1990; Versteeg y Malalasekera, 1995):

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + S \quad \text{Ec. 1}$$

donde T es la temperatura; ρ es la densidad; ∂_t es la derivada parcial del tiempo (corresponde al tiempo de discretización Δt); $u-v-w$ corresponden al campo de velocidades en las direcciones x-y-z respectivamente; ∂_x , ∂_y , y ∂_z son las derivadas parciales (de acuerdo al tamaño de malla e x-y-z); K_x , K_y y K_z son las conductividades térmicas; y S corresponde a la fuente o sumidero en el sistema. La solución del sistema de ecuaciones no lineales de la discretización de la Ec. 1 se resuelve utilizando el algoritmo TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm; Patankar, 1980, y Versteeg y Malalasekera, 1995).

4. Resultados y discusión

Como se comentó, el módulo de topografía acoplado al TCHEMSYS se desarrolló en lenguaje Fortran a partir de un archivo que contiene los datos topográficos de un área de estudio cada 50 m. El archivo contiene datos geo-referenciados de latitud y longitud en coordenadas UTM y la altitud de cada posición. A partir de la información la subrutina genera una malla en 3-D de la superficie, rutina importante, pues a partir de ello se estructura la geología del subsuelo como se muestra en la Figura 3.

De acuerdo al estudio de independencia entre el tiempo de discretización y el tamaño de la malla en la solución de la ecuación de transferencia de calor por conducción propuesto por Verma y Gómez-Arias (2014; ver Figura 5), los autores sugieren que modelos más realistas para estimar campos de temperaturas deben considerar Δt igual o menor a 50 años, una malla de 50 m de arista y la topografía regional del área de estudio. Por lo tanto, para el presente estudio preliminar en los modelos propuestos se consideró: (i) Δt de 50 años; (ii) una malla regular de 50 m de arista (en las direcciones x–y–z), con lo cual se tienen 600 volúmenes de control (VC's) en dirección x, 600 VC's en dirección y, y 400 VC's en dirección z. Esto da por resultado un total de 144 millones de VC's, en los cuales se resuelve la transferencia de calor por conducción en cada paso de tiempo. La parte convectiva en el yacimiento no se tomó en cuenta en este estudio preliminar.

Se simularon dos modelos, MA y MB, para el estudio del campo de temperaturas del CGCC, el primero con la topografía y el segundo sin la topografía. Para ambos modelos el tiempo total de simulación fue de 0.150 Ma, el volumen y cima de la cámara magmática corresponde a 600 km³ y 4 km de profundidad, respectivamente. En cuanto a los tiempos de discretización y reinyección de magma, para el MA el Δt corresponde a 50 años (3000 pasos de tiempo) y reinyección de magma del 10% a 0.095, 0.075, 0.060 y 0.025 Ma respectivamente, mientras que para el MB se tienen las mismas características del MA, pero sin considerar la topografía.

El valor del gradiente geotérmico fue de 30°C/km, el cual resulta perturbado por el emplazamiento del magma a 1350°C. La cámara magmática se localiza a 4 km de profundidad (ver Figuras 3 y 6). Para el modelo MA la cima de la cámara se localiza a -1725 m por debajo del nivel de mar. La profundidad se calculó a partir de 2300 msnm, que corresponde al punto más alto de los datos de topografía del CGCC. Para el modelo MB, la cima de la cámara se localiza a -4000 m por debajo del nivel de mar. Este modelo MB se puede considerar como la forma tradicional de modelar, y supone que la superficie se encuentra a cero metros sobre el nivel del mar. El espesor de la cámara es de 5.3 km considerando una caldera de 6 km de diámetro y con forma cilíndrica.

El perfil de temperaturas del modelo MA (Figura 6) indica que para un tiempo de simulación de 0.150 Ma aún no se ha alcanzado la temperatura de yacimiento reportada en la literatura, del orden de 250°C, ya que la temperatura promedio del yacimiento del modelo se encuentra en los 170°C. Además, en la cima de la cámara magmática existe suficiente temperatura de alrededor de 1100°C por disiparse al medio y por el proceso de reinyección de magma a 0.025 Ma. El modelo indica temperaturas de unos 1350°C en el centro de la cámara magmática. Los resultados sugieren considerar ecuaciones de conductividad en función de la temperatura en cada paso de tiempo de la solución de la transferencia de calor, y posiblemente evaluar diferentes escenarios de la ubicación de la cima de la cámara. En un primer juicio, parece ser que la topografía es un problema no trivial en la transferencia de calor por conducción.

Para el caso del perfil de temperaturas del modelo MB (Figura 6) y para un tiempo de simulación de 0.150 Ma, la temperatura promedio que se obtiene en el yacimiento es más cercana a la reportada en la literatura, pues esta se encuentra en los 210°C, que es un valor más cercano a los 250°C. En la cima de la cámara magmática existe temperatura de alrededor de 990°C por disiparse al medio y por el proceso de reinyección de magma a 0.025 Ma el modelo indica temperatura cerca de los 1240°C en el centro de la cámara magmática. En este modelo el proceso de transferencia de calor parece ser más rápido. Pero el hecho de no considerar la topografía, resulta en que a una misma profundidad se obtengan

temperaturas muy diferentes. Este es el caso de los pozos PR-4 y PR-5: en el primero se tienen 80°C a 670 m de profundidad, mientras que en el segundo la temperatura resulta de 178°C a una profundidad parecida, de 690 m. Ello implica que falta mejorar los modelos propuestos.

5. Conclusiones

Este trabajo muestra los resultados del campo de temperaturas en 3-D del CGCC como un estudio preliminar. Un primer acercamiento ha sido considerar deltas de tiempo de 50 años, que en trabajos previos no había sido considerado; también se utilizó una malla de 50 m de arista, en la que en cada volumen de control se resuelve la ecuación de transferencia de calor; y se mejoró el programa TCHEMSYS al acoplar una subrutina que toma en cuenta la topografía de cualquier área de estudio.

La mejora de los resultados deberá considerar ecuaciones de conductividad en función de la temperatura, realizar un estudio de sensibilidad de la ubicación de la cámara magmática a diferentes profundidades, considerar una cámara en forma semi-elíptica y un tiempo de simulación de 0.240 Ma, y tomar en cuenta el efecto de las fallas geológicas para simular convección en el yacimiento geotérmico.

Agradecimientos

El primer autor agradece al CeMIE-Geo y al Departamento de Geología de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE por el apoyo recibido para presentar este trabajo en el XXII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana. Un reconocimiento especial a Víctor Manuel Frías Camacho del departamento de geología del CICESE por el apoyo en la preparación de las Figuras 3 y 6.

Referencias

- Alatorre-Zamora, M.A., and Campos-Enríquez, J.O., 1991. La Primavera caldera (Mexico): structure inferred from gravity and hydrogeological considerations: *Geophysics*, 56, 992–1002.
- Campos-Enríquez, J.O., Domínguez-Méndez, F., Lozada-Zumaeta, M., Morales-Rodríguez, H.F., and Andaverde-Arredondo, J.A., 2005. Application of the Gauss theorem to the study of silicic calderas: the calderas of La Primavera, Los Azufres, and Los Humeros (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 147, 39–67.
- Giberti, G., and Sartoris, G., 1989. Evaluation of approximations in modeling the thermal history of a volcanic area: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 36, 233–240.
- Giberti, G., Moreno, S., and Sartoris, G., 1984. Thermal history of Phlegraean fields (Italy) in the last 50,000 years: A schematic numerical model: *Bulletin Volcanologique*, 47, p. 331–341.

- Guerrero-Martínez, F.J., and Verma, S.P., 2013. Three dimensional temperature simulation from cooling of two magma chambers in the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, Mexico: *Energy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.018>.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., and Quijano-León, J.L., 2004. Update of geothermics in Mexico: *Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía*, 17, 21–30.
- Maciel-Flores, R., y Rosas-Elguera, J., 1992. Modelo geológico y evaluación del campo geotérmico La Primavera, Jal. México: *Geofísica Internacional*, 31, 359–370.
- Mahood, G.A., 1977. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Revista del Instituto de Geología UNAM*, 1, 177–190.
- Mahood, G.A., 1980. Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center – sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 8, 199–230.
- Mahood, G.A., 1981a. Chemical evolution of a Pleistocene rhyolitic center: Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77, 129–149.
- Mahood, G.A., 1981b. A summary of the geology and petrology of the Sierra LaPrimavera, Jalisco, Mexico: *Journal of Geophysical Research*, 86, 10137–10152.
- Mahood, G.A., and Drake, R.E., 1982. K–Ar dating young rhyolitic rocks: a case study of the Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 93, 1232–1241.
- Mahood, G.A., and Halliday, A.N., 1988. Generation of high silica rhyolite: A Nd, Sr, and O isotopic study of Sierra La Primavera, Mexican Neovolcanic Belt: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, 183–191.
- Mahood, G.A., Truesdell, A.H., and Templos M., L.A., 1983. A reconnaissance geochemical study of La Primavera geothermal area, Jalisco, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 16, 247–261.
- Michael, P.J., 1988. Partition coefficients for rare earth elements in mafic minerals of high silica rhyolites: The importance of accessory mineral inclusions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 275–282.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Taylor and Francis, USA.
- Spera, F.J., Yuen, D.A., and Kirschvink, S.J., 1982. Thermal boundary layer convection in silicic magma chambers: Effects of temperature-dependent rheology and implications for thermogravitational chemical fractionation: *Journal of Geophysical Research*, 87, 8755–8767.
- Stimac, J.A., Goff, F., and Wohletz, K. 2001. Thermal modeling of the Clear Lake magmatic-hydrothermal system, California, USA: *Geothermics*, 30, 349–390.

- Tait, S.R., 1988. Samples from the crystallizing boundary layer of a zoned magma chamber: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100, 470–483.
- Valentine, G.A., 1992. Magma chamber dynamics, in Nierenberg, W.A. ed., *Encyclopedia of earth system science*, 3: New York, Academic Press, 1–17.
- Verma, S.P., 1985a. Heat source in Los Humeros geothermal area, Puebla, Mexico: *Geothermal Resources Council Transactions*, 9, 521–525.
- Verma, S.P., 1985b. On the magma chamber characteristics as inferred from surface geology and geochemistry: examples from Mexican geothermal areas: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 41, 207–214.
- Verma, S.P., and Gómez-Arias, E., 2014. Optimal discretization time and mesh size in three-dimensional temperature field simulation in two Mexican geothermal fields: *Geothermics*, 51, 91–102.
- Verma, S.P., and Rodríguez-González, U., 1997. Temperature field distribution from cooling of a magma chamber in La Primavera Caldera, Jalisco, Mexico: *Geothermics*, 26, 25–42.
- Verma, S.P., Arredondo-Parra, U.C., Andaverde, J., Gómez-Arias, E., and Guerrero-Martínez, F.J., 2012. Three-dimensional temperature field simulation of a cooling of a magma chamber, La Primavera caldera, Jalisco, Mexico: *International Geology Review*, 54, 833–843.
- Verma, S.P., and Andaverde, J., 2007. Coupling of thermal and chemical simulations in a 3-D integrated magma chamber-reservoir model: a new energy research frontier. In: Ueckermann, H.I. (Ed.), *Geothermal Energy Research Trends*. Nova Science Publishers Inc., pp. 149–188.
- Versteeg, H.K., and Malalasekera, W., 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, UK.
- Villa-Merlo, S.J., Chacón-Franco, M., y Medina-Orozco, G., 1987. Utilización de la relación atómica Na+/K+ para identificar zonas de mayor actividad hidrotermal en el campo geotérmico de la Primavera, Jalisco: *Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía*, 3, 241–254.
- Yokoyama, I., and Mena, M., 1991. Structure of La Primavera caldera, Jalisco, Mexico, deduced from gravity anomalies and drilling results: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 183–193.

(Figuras en páginas siguientes)

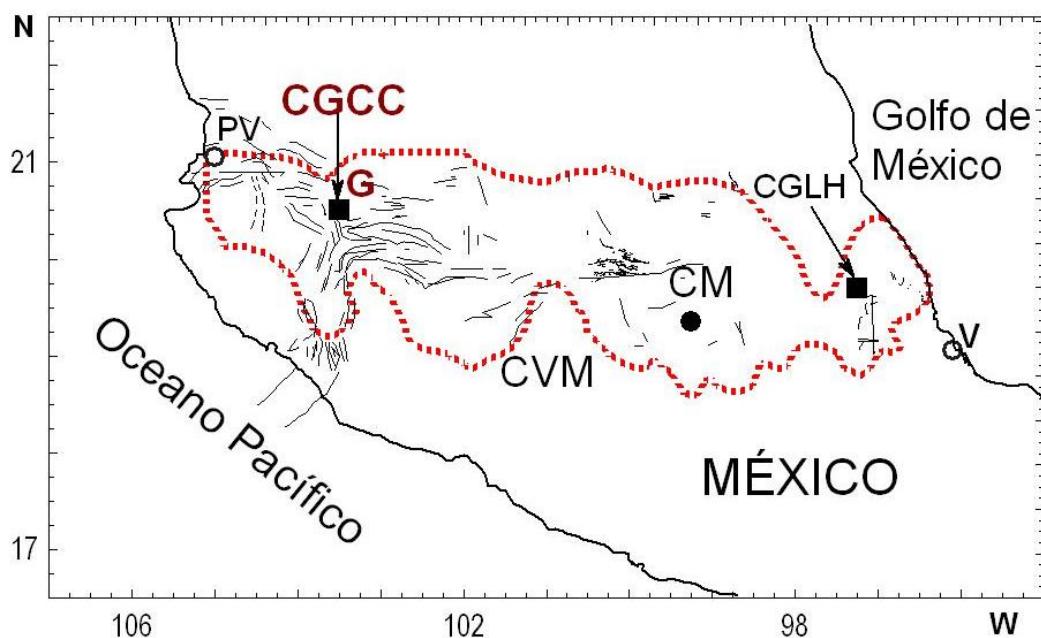


Figura 1.
Localización del campo geotérmico de Cerritos Colorados (CGCC), Jalisco, en la parte este del Cinturón Volcánico Mexicano ($20^{\circ}00' - 21^{\circ}00'$ latitud N, $103^{\circ}15' - 103^{\circ}45'$ longitud W). El mapa ha sido modificado de Verma et al. (2012). Las abreviaturas corresponden a: CVM – Cinturón Volcánico Mexicano;

PV – Puerto Vallarta; CGCC – Campo Geotérmico Cerritos Colorados; G – Guadalajara; CM – Ciudad de México; CGLH – Campo Geotérmico de Los Humeros; V – Veracruz.

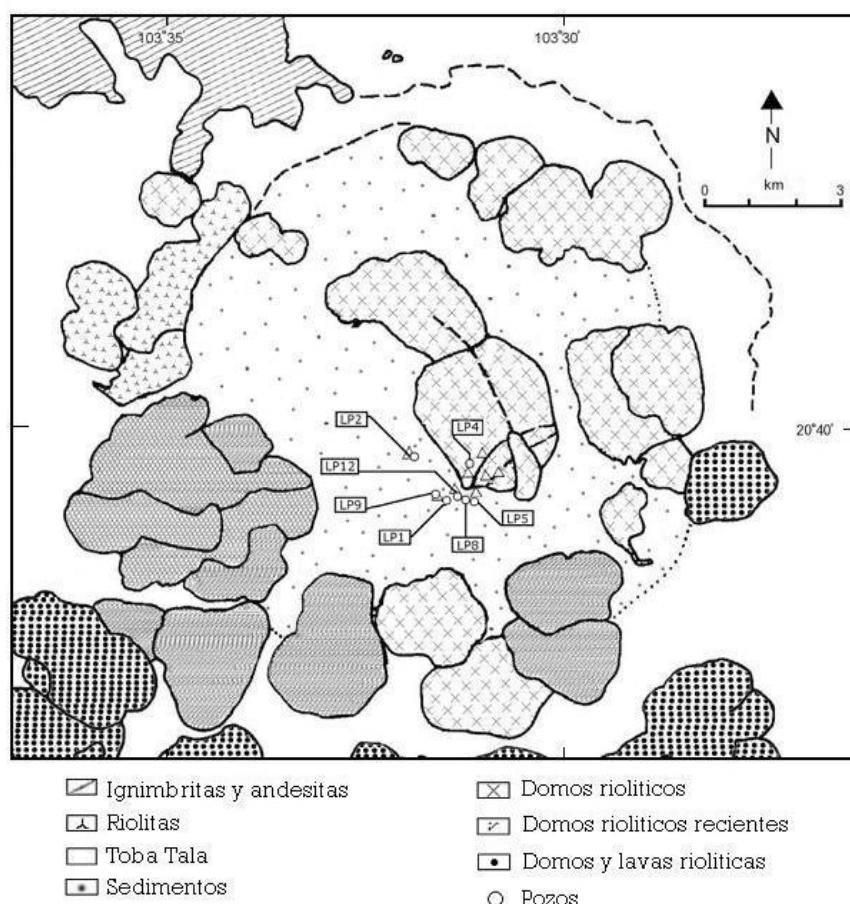


Figura 2. Geología superficial simplificada de la caldera de La Primavera. Modificada de Mahood (1977, 1980, 1981a, 1981b).

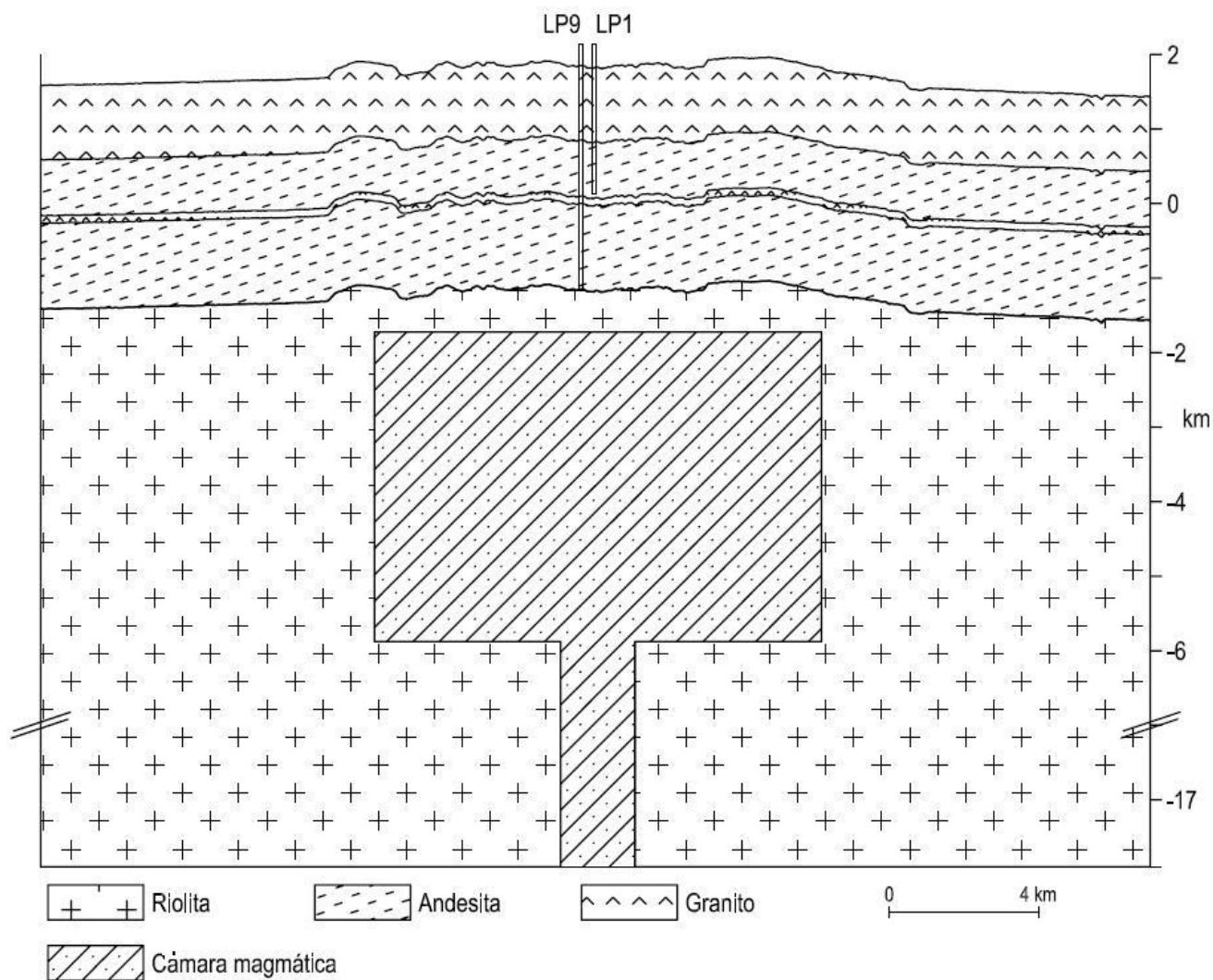


Figura 3. Modelo conceptual de la geología del subsuelo a partir de la información de los pozos del CGCC. Los pozos PR-1 (LP1) y PR-9 (LP9) tienen una profundidad de 1.822 km y 2.986 km respectivamente. Las condiciones iniciales y de frontera se encuentran en la Tabla 1 y los espesores de las rocas, así como las propiedades termofísicas se describen en la Tabla 2.

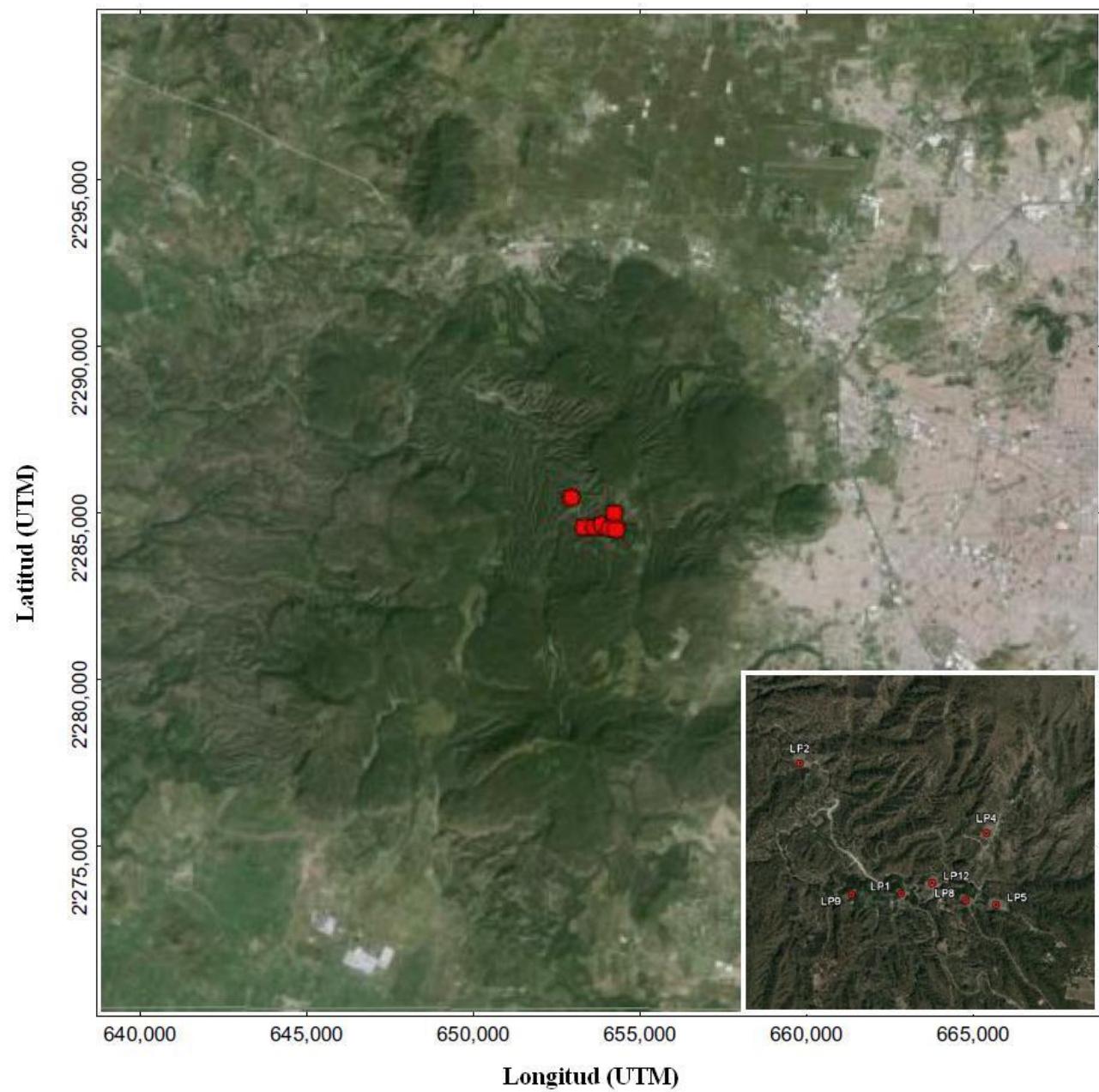


Figura 4. Área simulada del campo geotérmico de Cerritos Colorados y su topografía. El dominio corresponde a 30 km en dirección este – oeste y 30 km en dirección norte – sur (ambos en coordenadas UTM). Los puntos rojos corresponden a los pozos perforados en el campo.

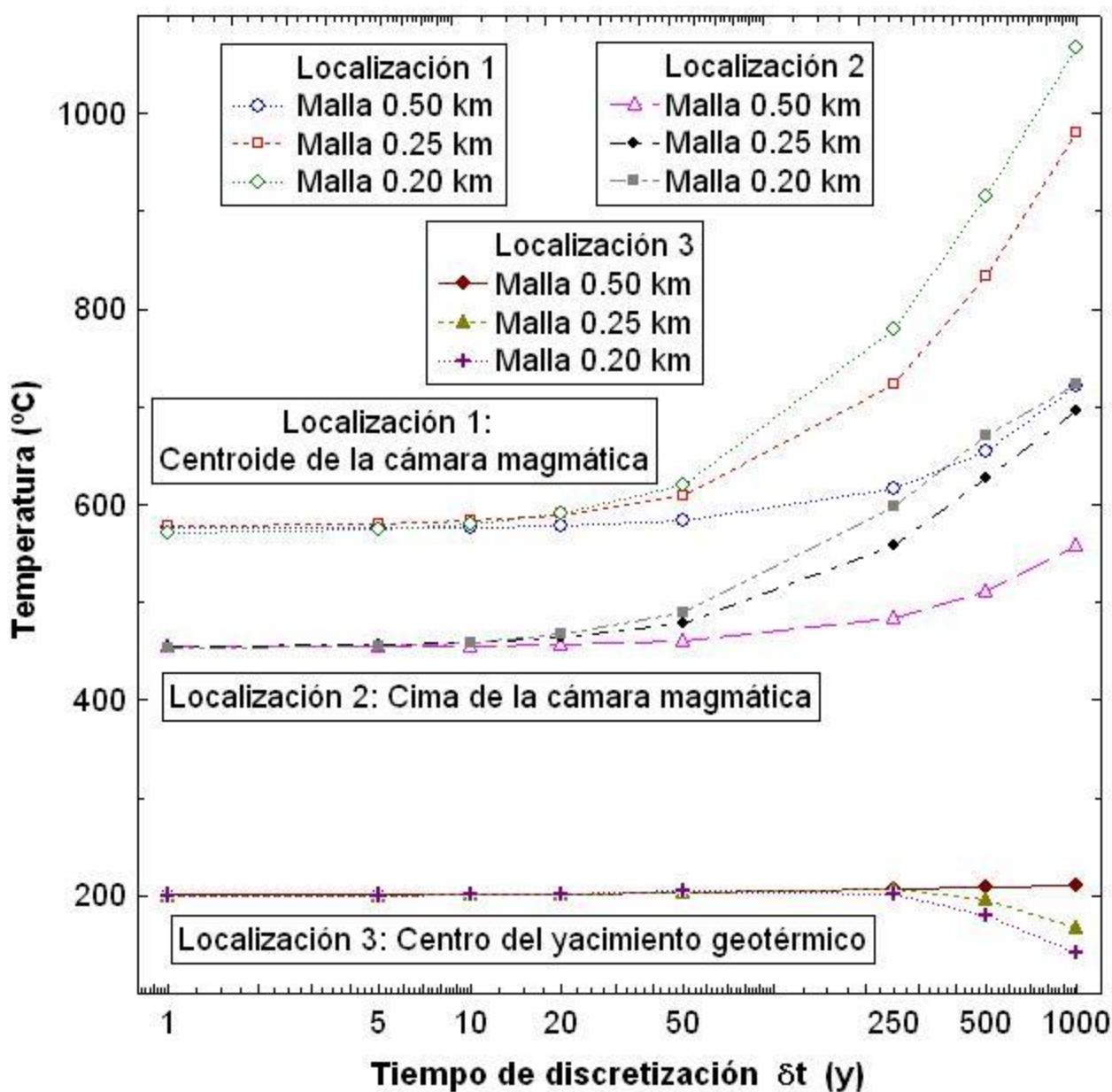


Figura 5. Temperaturas simuladas en tres zonas del suelo en el campo geotérmico de Cerritos Colorados en función del tiempo de discretización Δt en años (tomado y modificado de Verma y Gómez-Arias, 2014). Los símbolos corresponden a tamaño de malla de 0.50 km, 0.25 km y 0.20 km.

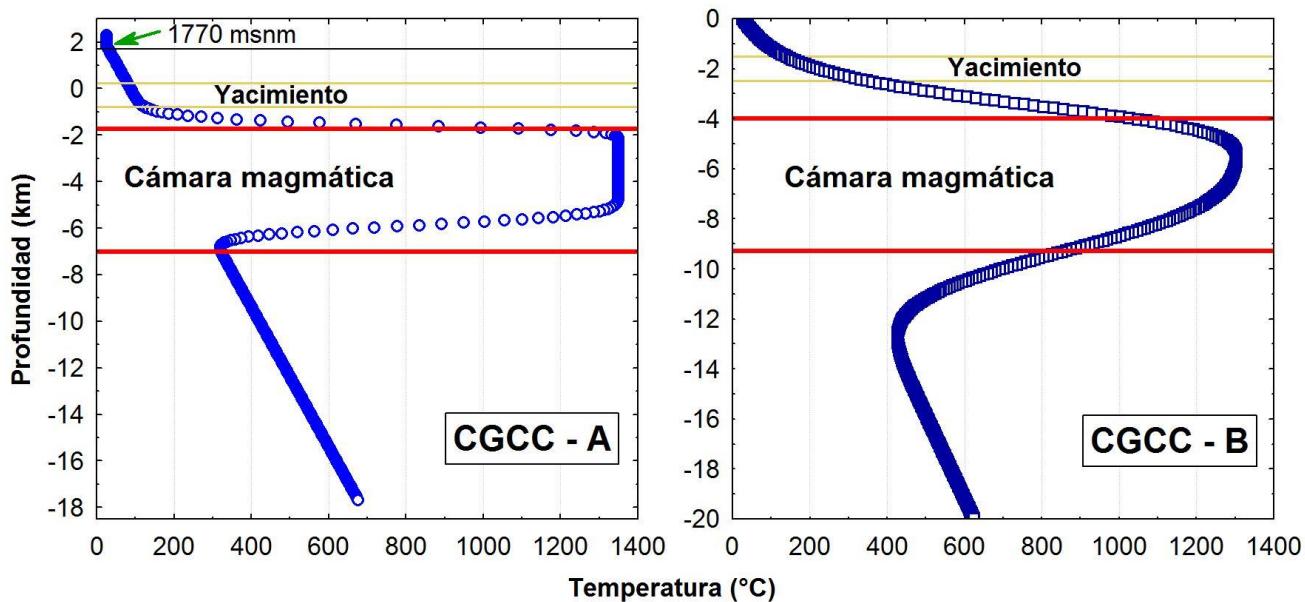


Figura 6. Comparación de los modelos térmicos en 3-D para el campo geotérmicos de Cerritos Colorados. En el modelo MA se considera la topografía y corresponde a un perfil central en dirección este-oeste y norte-sur y todo el eje vertical (este último corresponde a 20 km de profundidad). Para esta sección el valor topográfico corresponde a 1770 msnm, la cima de la cámara se localiza a -1725 metros por debajo del nivel del mar, el yacimiento se supone localizado entre 225 msnm y -775 metros por debajo del nivel del mar. En el modelo MB no se considera la topografía y corresponde a un perfil central en dirección este-oeste y norte-sur y todo el eje vertical (este último corresponde a 20 km de profundidad). La cima de la cámara magmática se localiza a -4000 metros por debajo del nivel del mar, el yacimiento se supone localizado entre -1500 y -2500 metros por debajo del nivel del mar.