

Nuevo enfoque e interpretación geológica de la roca sello del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Víctor Ilitch Gallardo Federico

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto. Correo: victor.gallardo01@cfe.gob.mx

RESUMEN

En un sistema geotérmico, la presencia y coexistencia de cuatro componentes básicos son esenciales para la ocurrencia de un yacimiento geotérmico en el subsuelo: la fuente de calor, los fluidos provenientes de la recarga, la roca almacenadora y la roca o capa sello. En el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), estos cuatro componentes han sido bien estudiados. La fuente de calor está asociada a un cuerpo magmático cuya profundidad aún se discute, el cual se ubica dentro de un depocentro en una cuenca sedimentaria transtensional. La recarga es una mezcla entre aguas termales, connatas y meteóricas provenientes del Río Colorado. La roca almacenadora está constituida por areniscas deltaicas intercaladas con lutitas limolíticas grises que subyacen a una unidad litológica compuesta por lutitas color café, siendo esta última la denominada roca sello. Esta, a su vez, se encuentra a su vez cubierta por una unidad fluvio-deltaica compuesta por arenas, gravas y arcillas plásticas provenientes del Río Colorado, denominada informalmente como unidad de Sedimentos Clásticos no Consolidados (SCNC). Con la interpretación de la información litológica existente de más de 450 pozos geotérmicos y mediante la elaboración de dos mapas de isopacas de las unidades de lutita café y lutita gris, se determinó que 91 pozos carecen de la denominada capa sello y ponen en contacto discordantemente a la unidad fluvio-deltaica no consolidada (SCNC) con la roca almacenadora. Este contacto en algunos sitios se encuentra erosionado por paleocanales y está relacionado con cauces fluviales (paleo-drenajes), que geológicamente marcan un cambio de régimen tectónico. La erosión afectó parcialmente a la capa sello y en parte a la roca almacenadora en diversos sitios. Para complementar esta interpretación, se revisaron las condiciones actuales de los 91 pozos mencionados, de los cuales 25 son actualmente productores, 45 se encuentran cerrados, 9 son inyectores y 10 se encuentran disponibles para reparar o utilizarse para monitoreo. Con los resultados obtenidos se concluye que la unidad de lutita café no se comporta por completo como roca sello del yacimiento y, por tanto, en gran medida no forma parte de los cuatro componentes básicos del sistema geotérmico de Cerro Prieto. Se concluye también que hay probablemente otro factor que impide el ascenso de los fluidos geotérmicos del subsuelo en las zonas de erosión, y que el sello puede estar asociado más bien con condiciones mineralógicas específicas resultado de la alteración hidrotermal.

Palabras clave: Sistema geotérmico, roca sello, isopacas, régimen tectónico, límite discordante, geología del subsuelo.

1. OBJETIVO Y ANTECEDENTES

El objetivo de este trabajo es ampliar el conocimiento de la geología del subsuelo que permita entender mejor los principales componentes básicos del sistema geotérmico del CGCP, contribuyendo así a la mejora continua del proceso de aprovechamiento del recurso geotérmico.

La exploración y perforación de pozos geotérmicos ha sido la herramienta más importante para entender las condiciones geológicas del subsuelo en el CGCP. Entre 1959 y 1961 se perforaron tres pozos exploratorios, que proporcionaron los primeros conocimientos e información sobre las condiciones

geológicas y físicas del subsuelo y sobre el tipo de fluido geotérmico. Los pozos tuvieron temperaturas de alrededor de 140°C a una profundidad de 475 m. Entre 1964 y 1968 se perforaron cuatro pozos profundos que confirmaron la existencia de un yacimiento geotérmico dentro de una secuencia sedimentaria, cuyas temperaturas se estimaron adecuadas para la generación de energía eléctrica. Posteriormente, en 1968 se perforaron 15 pozos adicionales más, los cuales tuvieron buena producción de vapor. Por lo tanto, se decidió la construcción de la primera planta geotermoeléctrica.

Entre 1968 y 1973 se perforaron 20 pozos más y no fue hasta el año de 1976 cuando la información geológica del subsuelo resultó suficiente para elaborar las primeras interpretaciones geológicas y el primer modelo geológico del campo, el cual se caracterizó por contener sedimentos deltaicos y no deltaicos (Paredes, 1976). La producción y perforación de nuevos pozos continuó, y en 1978 se perfeccionó la descripción litológica del campo, al subdividir las formaciones sedimentarias en dos unidades principales: la unidad A compuesta por limos, arenas y gravas no consolidadas, y la unidad B constituida por lutitas y areniscas consolidadas (Puente y de la Peña, 1978).

Una año después se describe la secuencia sedimentaria en tres unidades litológicas, que constituyen la columna estratigráfica generalizada del CGCP: la unidad A, compuesta por sedimentos continentales no consolidados (arcillas, limos, arenas y gravas); la unidad B, compuesta de sedimentos deltaicos consolidados de tipo continental, con estratificación lenticular (alternancia de lutitas y limolitas que varían en color con areniscas grises claras, variando entre grauvacas y arcosas); y finalmente la unidad C, compuesta por un basamento granítico similar a las rocas que afloran en la Sierra Cucapah (Puente y de la Peña 1979). Posteriormente, otros autores (Vonder Haar et al., 1979; Vonder Haar y Howard, 1980; Lyons y Van de Kamp, 1980), subdividieron las tres unidades mencionadas en varios miembros y en 1981 el personal técnico de la CFE identificó cinco unidades litológicas: granito de biotita, Lutita Gris, Lutita Café, Lodolita y Sedimentos Clásticos no Consolidados (Cobo, 1981). Cabe destacar que son estas cinco unidades las que hasta la fecha se utilizan para la descripción litológica de los pozos del CGCP.

Para que un sistema geotérmico se desarrolle, debe de contener cuatro componentes básicos: 1) Una fuente de calor, que en caso del CGCP ha sido ubicada dentro de un depocentro de una cuenca sedimentaria transtensional, cuya profundidad aún se discute; 2) Una roca almacenadora, que en el CGCP está constituida por areniscas deltaicas intercaladas con lutitas limolíticas grises, las cuales se encuentran subyaciendo a una unidad litológica compuesta por lutitas de color café; 3) Una roca o capa sello, que es la unidad de Lutita Café que sobreyace a las rocas almacenadoras y que es sobreyacida por una unidad fluvio deltaica proveniente del Río Colorado, denominada informalmente como Unidad de Sedimentos Clásticos no Consolidados; y 4) Una recarga, que en Cerro Prieto es una mezcla entre aguas marinas fósiles (connatas) y meteóricas provenientes del Río Colorado.

La roca sello del CGCP se mencionó por primera vez en un estudio sobre la evaluación de las características geológicas del campo realizado por Howard et al. (1981) quienes mencionan que la roca sello puede ser considerada como una superficie o zonas que por diversas razones actúan como una capa aislante y como una barrera al flujo de fluidos, y que puede ser consecuencia de mineralización y densificación o de una depositación primaria (Faca, 1973, en Howard et al. 1981). Para el caso del sistema geotérmico de Cerro Prieto, ellos consideraban como roca o capa sello un contacto litológico determinado por el perforador del pozo, quien lo relacionaba con una disminución en la velocidad de penetración de la barrena, al pasar de los sedimentos no consolidados a las unidades consolidadas lo cual era corroborado por el cambio de color de los recortes de perforación de marrón a gris (Puente y de la Peña, 1978; Seamount y Elders, 1981). Una característica de la capa sello del CGCP es que su porción superior tenía una porosidad primaria químicamente alterada, y que encima de la misma se encontraba una zona de sedimentos compactados con porosidad primaria (Howard et al., 1981). Por lo tanto, su

cima y su base estaban definidas por cambios mineralógicos en la alteración hidrotermal, más que en cambios estrictamente litológicos.

Posteriormente, por razones prácticas se consideró la cima de la roca sello se encontraba asociada a la disminución de la velocidad de perforación y desde el punto de vista fenomenológico se le atribuían las características siguientes: 1) Estaba relacionada con acuitardos metamorizados constituidos por lutitas de extensión apreciable, distribuidas hacia el este del CGCP y a profundidad. 2) En la porción oeste, y directamente encima de la parte productora del área de Cerro Prieto I, debía estar constituida por una combinación de los acuitardos mencionados con unidades compuestas principalmente por areniscas, lo cual obligaba a los fluidos hidrotermales a fluir hacia el oeste, hasta llegar a la superficie como manifestaciones superficiales (Howard et al., 1981).

Cada una de las cinco unidades litológicas mencionadas se diferenciaron por su origen, contenido mineralógico, grado de clasificación, color, compacidad y otros parámetros físicos. Al realizar las primeras configuraciones estructurales, se identificó que la Unidad de Lutita Café no se encontraba bien distribuida arealmente y concluyó que no se presentaba en todos los pozos del campo (Cobo, 1981). Posteriormente y a partir de la década de los 80, todos los trabajos técnicos de la CFE consideraron por razones prácticas a la Unidad de Lutita Café como la roca o capa sello. Elders et al. (1984) señalan que la capa sello es discontinua y que existen procesos de autosellamiento así como de remplazamiento metasomático de minerales de arcilla por clorita, illita y calcita, lo que provoca un aumento en la densidad y una disminución de la permeabilidad.

Actualmente se ha determinado que 91 de los 450 pozos perforados en el CGCP (el 20%) no presentan roca sello y ponen en contacto discordante a la unidad fluvio deltaica no consolidada con la roca almacenadora. Este contacto está relacionado geológicamente con un periodo de erosión ocurrido durante un cambio de régimen tectónico de extensional a transtensional (Gallardo, 2016). La erosión mencionada afectó parcialmente a la roca sello y a la roca almacén en diversos sitios a través de paleocanales.

2. HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

La Unidad de Lutita Café en el CGCP se encuentra erosionada por medio de paleocanales, lo que permite poner en contacto la roca almacenadora con una unidad permeable. Por lo tanto, la Lutita Café no funciona como roca sello en todo el campo. La capa sello del sistema geotérmico parece estar más relacionada con procesos de autosellamiento, por el depósito de minerales hidrotermales y por remplazamiento de minerales primarios, que reducen la porosidad y permeabilidad.

La metodología seguida para probar la hipótesis anterior, incluye los siguientes puntos:

- Se revisó la información litológica existente de más de 450 pozos geotérmicos ubicados dentro y en la periferia inmediata del CGCP.
- Se realizaron dos mapas de isopacas correspondientes a las unidades de Lutita Café y Lutita Gris.
- Se llevó a cabo la interpretación de esos mapas de isopacas, lo que revela la presencia de una discordancia probablemente de tipo erosional.
- Se armaron cuatro secciones geológicas para complementar el presente trabajo.
- Y por último, se comparó la situación actual de los 91 pozos que carecen de roca sello.

El CGCP se localiza en el Valle de Mexicali, BC, aproximadamente 26 km al sur-sureste de la Ciudad de Mexicali. El volcán Cerro Prieto es la estructura más sobresaliente de la zona (ver Figura 1; todas las figuras

al final del texto).

3. DISTRIBUCIÓN DE LAS UNIDADES SEDIMENTARIAS DEL CGCP

La cuenca transtensional donde se ubica el CGCP se encuentra geológicamente activa. Es considerada una cuenca sedimentaria con una forma asimétrica tipo 'S' delimitada por dos grandes fallas regionales de movimiento lateral izquierdo, la falla de Cerro Prieto y la falla Imperial. La cuenca sedimentaria está constituida por un basamento granítico-metamórfico sobreyacido por una secuencia deltaica compuesta por las unidades de Lutita Gris y Lutita Café, que a su vez son sobreyacidas por una unidad fluviodeltaica denominada informalmente como Sedimentos Clásticos no Consolidados (SCNC).

3.1 Unidad de Lutita Gris

Esta unidad está constituida por lutitas limolíticas intercaladas con areniscas cuarzo-feldespáticas, cuya alternancia forma parte de una unidad de depósito de ambiente típicamente deltaico, la cual sobreyace discordantemente al basamento granítico-metamórfico en el subsuelo del CGCP. Se construyó un mapa de isopacas de esta unidad, en el cual se observa un espesor máximo de 3400 m y un espesor promedio de 2875 m (Figura 2). De acuerdo a la interpretación, esta unidad fue afectada por la erosión provocada por un cauce fluvial (tributarios) de orientación NW-SE, proveniente del alto estructural conocido como horst Cerro Prieto.

3.2 Unidad de Lutita Café

La ausencia de la unidad de Lutita Café ya se había reportado por técnicos de CFE mediante un mapa de su distribución donde se demostró por primera vez que no se presentaba en todos los pozos (Cobo, 1981; Figura 3). La lutita café por sus características litológicas es considerada en el CGCP como una importante secuencia sedimentaria, debido que se encuentra sobreyaciendo a la roca almacenadora y subyaciendo a la unidad fluvio-deltaica proveniente del Río Colorado. La lutita café se encuentra muy bien distribuida en el CGCP, presentando un espesor promedio de 76.75 m. Sin embargo existen zonas donde esta secuencia fue erosionada por paleocanales, en algunos casos por completo (Figura 4).

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Con la interpretación de la información litológica existente y con la elaboración de los mapas de isopacas mencionados, se determinó que 91 pozos no presentan la denominada roca sello (Unidad de Lutita Café) y ponen en contacto discordantemente a la unidad fluvio deltaica no consolidada sobre la roca almacenadora. Este contacto discordante es el resultado de la erosión causada por paleocanales asociados a cauces fluviales (paleodrenajes), que geológicamente marcan un cambio de régimen tectónico de extensional a transtensional a través de un hiatus (Gallardo, 2016), como se muestra en la Figura 5.

La erosión mencionada afectó parcialmente a la roca sello y en parte a la roca almacenadora en diversos sitios. Para complementar esta interpretación se revisaron las condiciones actuales de los 91 pozos que carecen de la Unidad de Lutita Café, de los cuales 26 son productores actualmente, 45 se encuentran cerrados, 9 son inyectores y 10 se encuentran disponibles para reparar o para usarse como pozos de monitoreo.

Para efectos de este trabajo, se tomaron como ejemplo cinco pozos de los 26 que actualmente se

encuentran clasificados como productores, los cuales tienen una producción entre 24 hasta 89 t/h de vapor. Ninguno de ellos presenta un sello litológico.

Pozo 505

Actualmente el pozo 505 está en producción con 25 t/h de vapor. Litológicamente presentó una potente unidad sedimentaria no consolidada de 2217 m de espesor, la cual sobreyace discordantemente a la unidad productora del yacimiento geotérmico. No se cortaron las lutitas café, consideradas como roca sello, pero a partir de los 2217 m de profundidad nota un incremento en el gradiente de temperatura de 100°C hasta 306°C a 2795 m de profundidad. Así mismo se puede apreciar una fuerte argilización en ese intervalo por la presencia de illita (Figura 6).

Pozo 514

El pozo 514 presentó una temperatura máxima de 308°C a la profundidad de 2895 m. Su gradiente de temperatura aumentó a partir de los 2000 m, donde la temperatura era de apenas 105°C. El aumento en el gradiente inició prácticamente en el contacto entre la unidad no consolidada y la roca productora, pero se puede observar que a partir del contacto discordante existe una moderada argilización y un aumento de calcita (Figura 7).

Pozo 523

Este pozo presentó 2247 m de la unidad no consolidada la cual sobreyace discordantemente a la unidad productora. A partir de los 2100 m se observó un aumento en el gradiente de temperatura desde 100°C hasta 330°C a 3090 m de profundidad. Actualmente el pozo tiene una producción de 73 t/h de vapor y presenta una moderada argilización que puede estar relacionada con un sello mineralógico (Figura 8).

Pozo 529D

El pozo 529D produce actualmente 18.33 t/h de vapor. Litológicamente presentó una secuencia no consolidada de 2244 m, la cual sobreyace discordantemente a la unidad productora. A partir de los 2200 m se observa un cambio en el gradiente de 80°C hasta 295°C a 3485 m de profundidad. La mineralogía hidrotermal indica una fuerte presencia de argilización en el intervalo de 2650 hasta 3400 m de profundidad (Figura 9).

Pozo 541D

El pozo 541D presentó una temperatura máxima de 300°C a una profundidad de 3275 m. El gradiente aumentó significativamente a partir de los 2400 m de profundidad, donde la temperatura fue de 100°C, prácticamente a partir del contacto discordante entre la secuencia terrígena nombrada informalmente como unidad no consolidada y la roca productora. Se encontró abundante calcita como producto de alteración hidrotermal (Figura 10).

5. SECCIONES GEOLÓGICO-ESTRUCTURALES

Se realizaron cuatro secciones geológicas en dirección NW-SE y NE-SW para representar las características sedimentológicas y estructurales de las zonas afectadas por la erosión que ponen en contacto discordante a la unidad no consolidada con la unidad productora.

Secciones geológico-estructurales A-A' y B-B'

En la sección A-A' se observa la presencia de la Unidad de Lutita Café, la cual fue erosionada en la zona donde se encuentra el pozo productor 523 (destacado en color azul). En la sección B-B' ocurre lo mismo para el caso del pozo productor 505, además del mencionado 523, ambos destacados en color azul (Figura 11).

Sección geológico-estructural C-C'

En la sección C-C' se muestran pozos que contienen un remanente erosivo de la lutita café, mientras que en zona SE de la sección se muestran los pozos productores 531D y 533D (en azul) que no cortaron a las lutitas café (Figura 12).

Sección geológico-estructural D-D'

Algo similar ocurre en la sección D-D', donde el pozo 528D cuenta con un remanente erosivo de la Unidad de Lutita Café mientras que los pozos productores 513 y 531D (en color azul) no la cortaron, pasando directamente de la unidad de sedimentos clásticos no consolidados y lodolitas (en color amarillo) a la unidad almacenadora, que es la Unidad de Lutita Gris (Figura 18).

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- ✓ De los 450 pozos analizados, se determinó que 91 no cortaron a la Unidad de Lutita Café, la cual es considerada como la roca sello del yacimiento geotérmico. De esos 91 pozos, 26 se hallan actualmente en producción, aportando un total de 574 t/h de vapor en conjunto. Todos los pozos productores presentan semejanzas en cuando a sus columnas geológicas, entre las cuales destaca un contacto discordante entre la unidad de sedimentos clásticos no consolidados y la unidad de Lutita Gris, que es la unidad productora. En todos los casos las rocas productoras presentan alteración hidrotermal de alta a moderada, con la presencia de argilización.
- ✓ Entre los 26 pozos productores sin lutitas café, se presentan en este trabajo cinco cuyas características geológicas indican que su producción de vapor no está relacionada con la presencia de una roca sello sino con un sello mineralógico producto de la alteración hidrotermal, en este caso de argilización, representada por la denominada zona mineralógica de sílice y epidota.
- ✓ Se construyeron mapas de isopacas de las unidades de Lutita Café y de Lutita Gris, que indican la existencia de paleocanales erosivos. También se construyeron cuatro secciones geológico-estructurales en direcciones NE-SW y NW-SE, que muestran zonas afectadas por la erosión que dejaron algunos remanentes de las lutitas café. Algunos pozos productores perforados en las zonas erosionadas presentan un sello de tipo mineralógico, producto de la alteración hidrotermal de la roca productora (Lutita Gris).
- ✓ Con los resultados obtenidos en este análisis se concluye que la Unidad de Lutita Café no funciona como roca sello en todos los pozos ni en todas las zonas del subsuelo del campo. En los casos en que no se encuentra presente debido a la erosión, ocurre un sello mineralógico causado por la alteración hidrotermal en las partes superiores de la Unidad de Lutita Gris.

REFERENCIAS

- Barnard, F.L., 1968. Structural Geology of the Sierra de los Cucapas, Northeastern, Baja California, México, and Imperial Country. Unpublished Doctoral dissertation. University of California, CA, USA.
- De la Peña, A., y Puente C., I., 1979. Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Memorias de la Primera Reunión de Intercambio Técnico sobre Geotermia*, San Felipe, B.C., México, Nov. 1977.
- Cobo, J.M., 1981. Configuración de los cuerpos litológicos de lodolita, lutita café, lutita gris, zonas de sílice y epidota y sus relaciones con la tectónica del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. *Memorias del tercer simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto*, pp. 29-42.
- Elders, W.A., Bird, D.K., Williams, A.E. and Schiffman, P., 1984, Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto geothermal system, Baja California, México. *Geothermics*, 13, pp. 27-47.
- Faca, G., 1973. The structure and behavior of the geothermal fields. In Armstead, H.C.H. (ed.), *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, France (LC No. 72-97138).
- Gallardo Federico, V.I., 2016. Análisis de la evolución tectono-sedimentaria de la cuenca transtensional del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Memorias del XXIII Congreso Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana*, Morelia, Mich., 10-11 de marzo de 2016.
- Gastil, G.R., Phillips, R.P., and Allison, E.C., 1975. Reconnaissance Geology of the State of Baja California. *Geological Society of America*, Publication 150.
- Howard. J.H., Halfman, S.E., and Vonder Haar, S.P., 1981. Evaluation of geologic characteristics at Cerro Prieto. *Memorias del Tercer simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto*, pp. 71-76.
- Lyons, D.J., and Van de Kamp, P.C., 1980. Subsurface Geological and Geophysical Study of the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México. *Lawrence Berkeley Laboratory*, Report LBL- 10540.
- Paredes, E.A., 1976. Preliminary Report on the Structural Geology of the Cerro Prieto Geothermal Field. *Second UN Symposium on the Development and use of Geothermal Resources*, Vol. I, pp. 518-519.
- Seamont, D.T., and Elders, W.A., 1981. Use of wireline logs at Cerro Prieto in identification of the distribution of hydrothermally altered zones and dike locations, and their correlation with reservoir temperatures. *Memorias del Tercer simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto*.
- Vonder Haar, S.P., Noble, J., O'Brien, M., and Howard, J., 1979. Subsurface Geology of the Cerro Prieto Geothermal Field. *1979 Annual Report LBL-10686*, Lawrence Berkeley Laboratory, Earth Science Division, pp. 39-43.
- Vonder Haar, S.P., and Howard, J.H., 1980. Intersecting Faults and a Sandstone Stratigraphy at the Cerro Prieto Geothermal Field. *Lawrence Berkeley Laboratory*, Report LBL-9546.

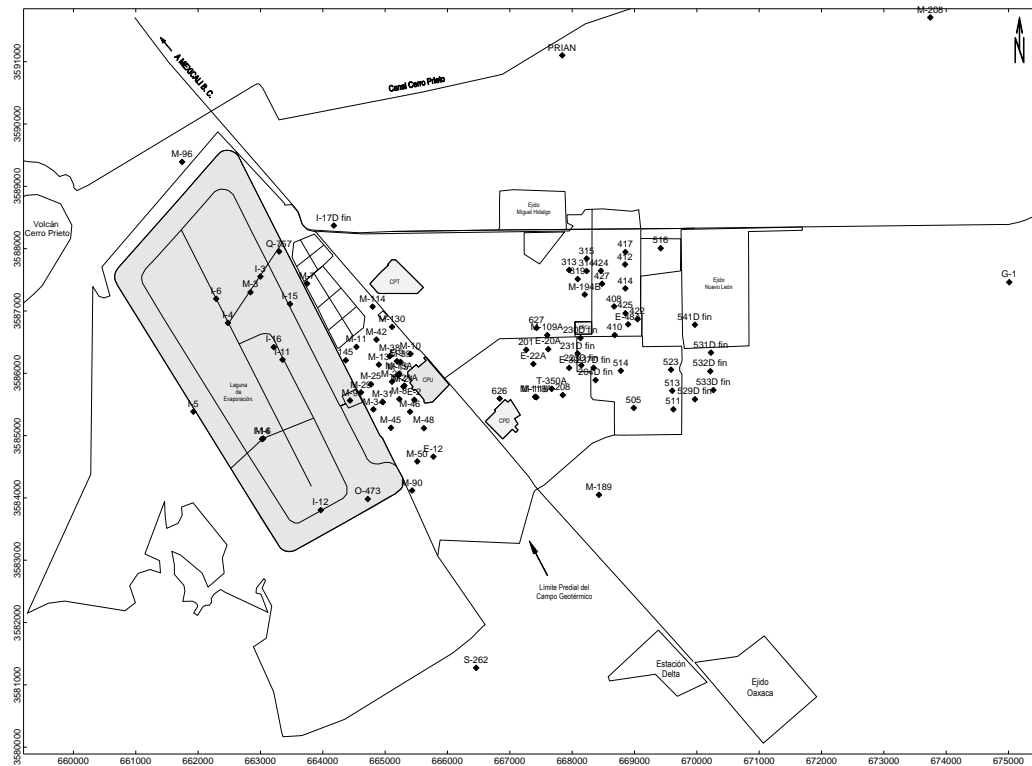


Figura 1. Ubicación del CGCP y localización de pozos geotérmicos con ausencia de la unidad de lutita café

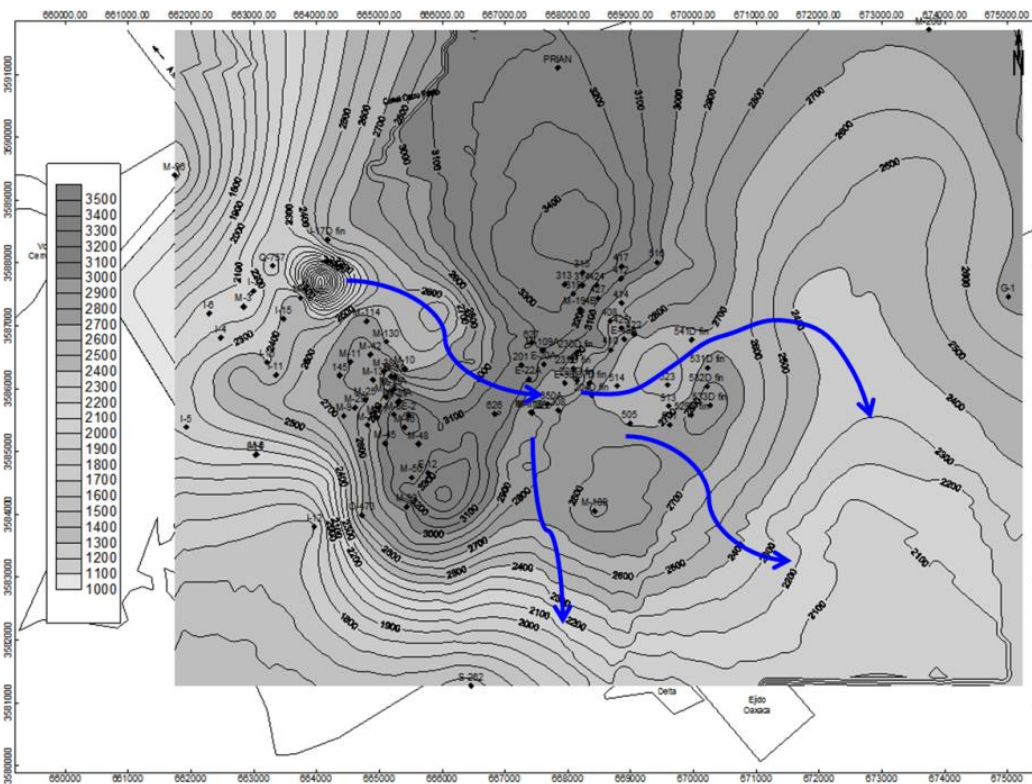


Figura 2. Mapa de isopacas de la Unidad de Lutita Gris y zonas afectadas por paleo-erosión.

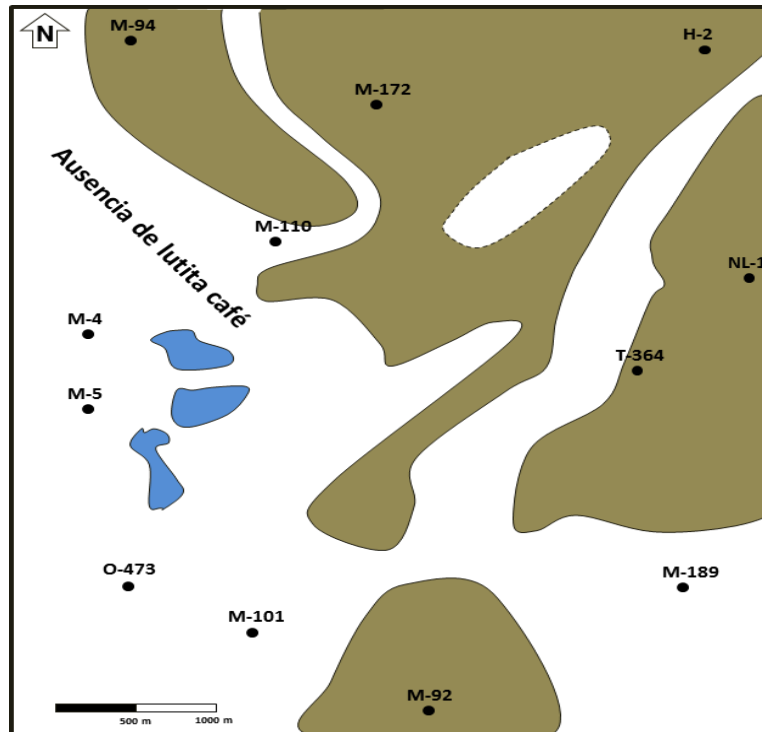


Figura 3. Mapa de distribución de la Unidad de Lutita Café, interpretada por Cobo (1981).

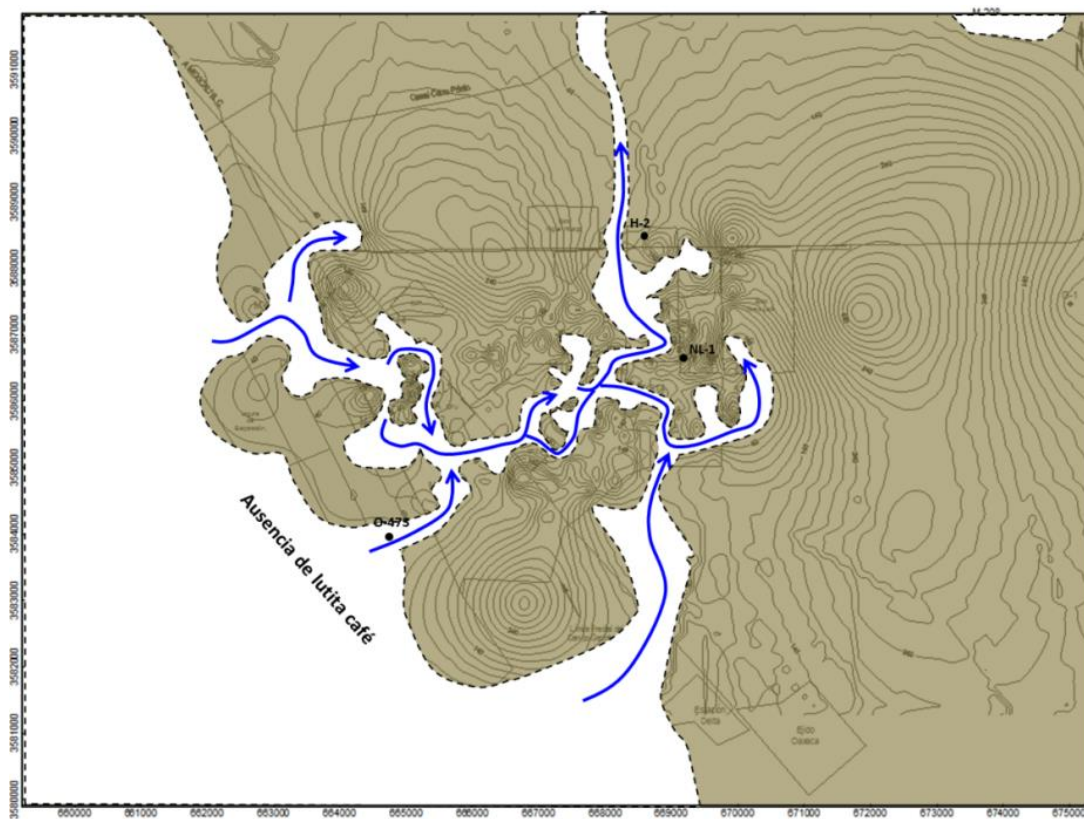


Figura 4. Mapa de isopacas actualizado de la Unidad de Lutita Café y distribución de paleocanales.

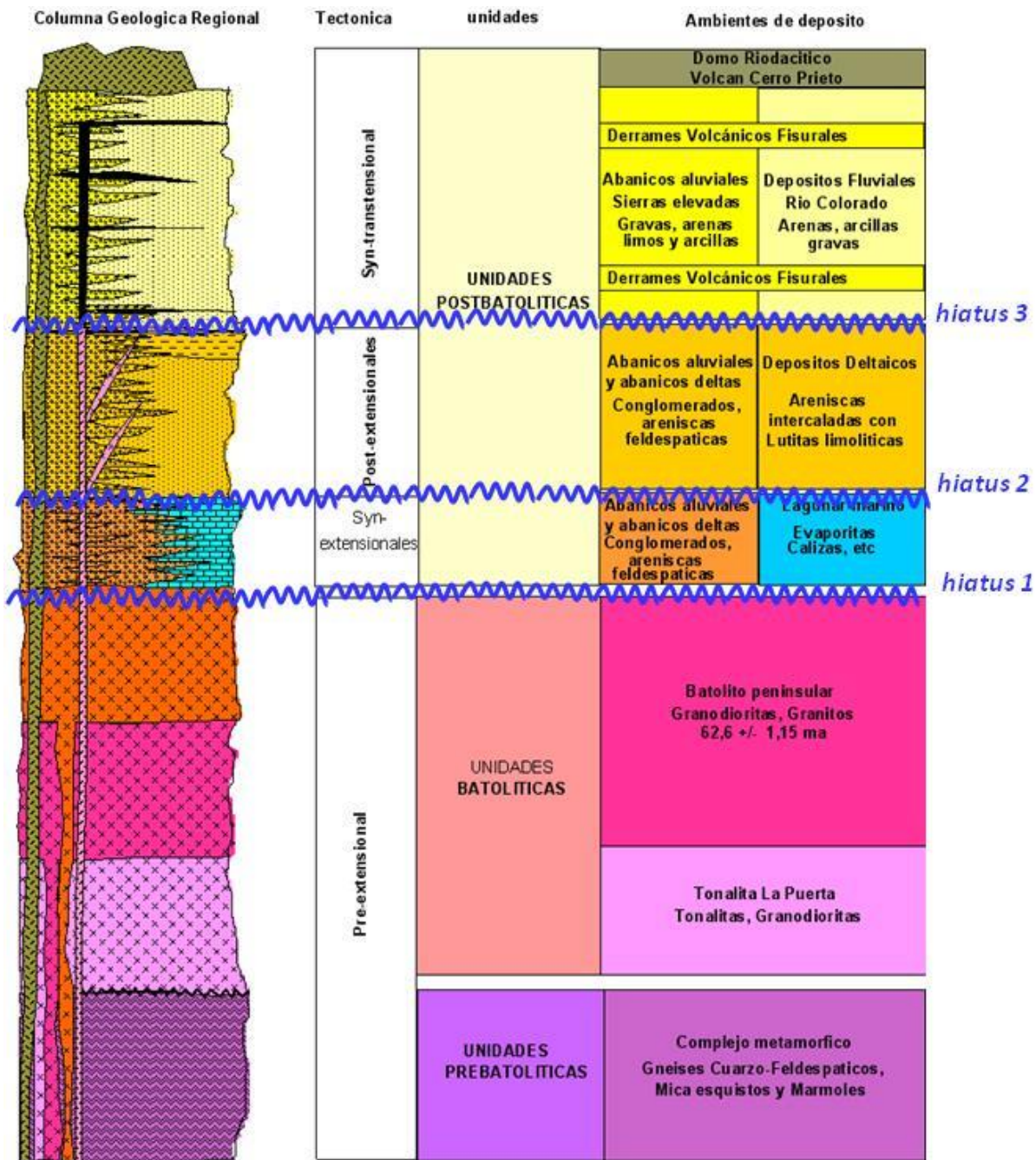
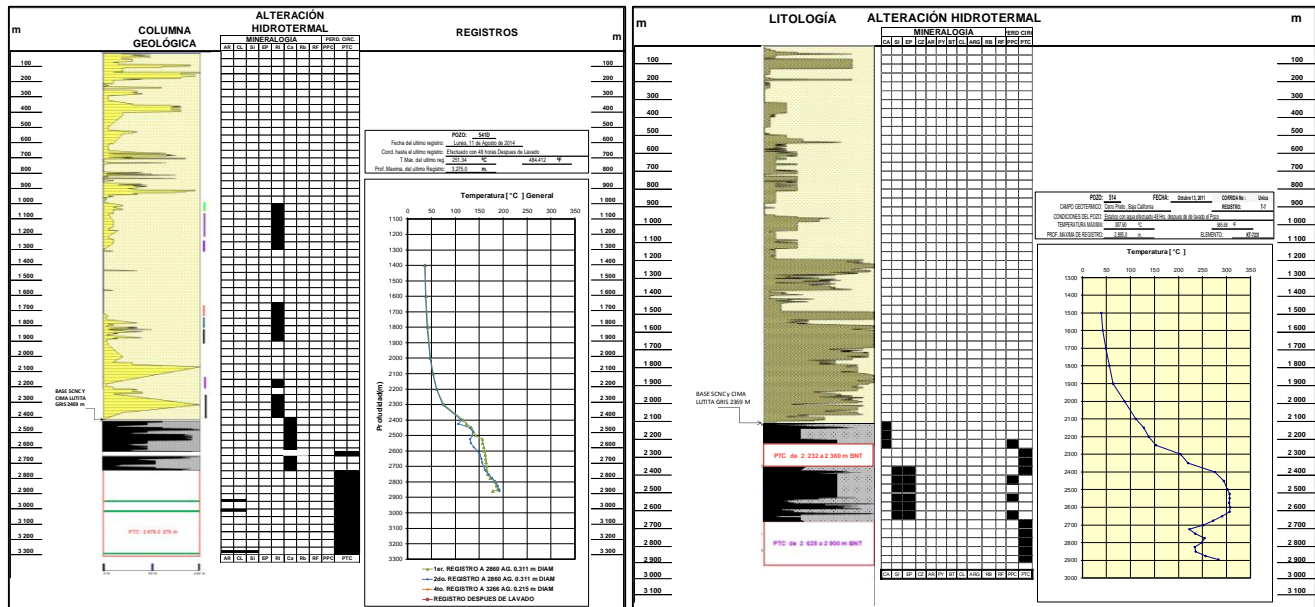
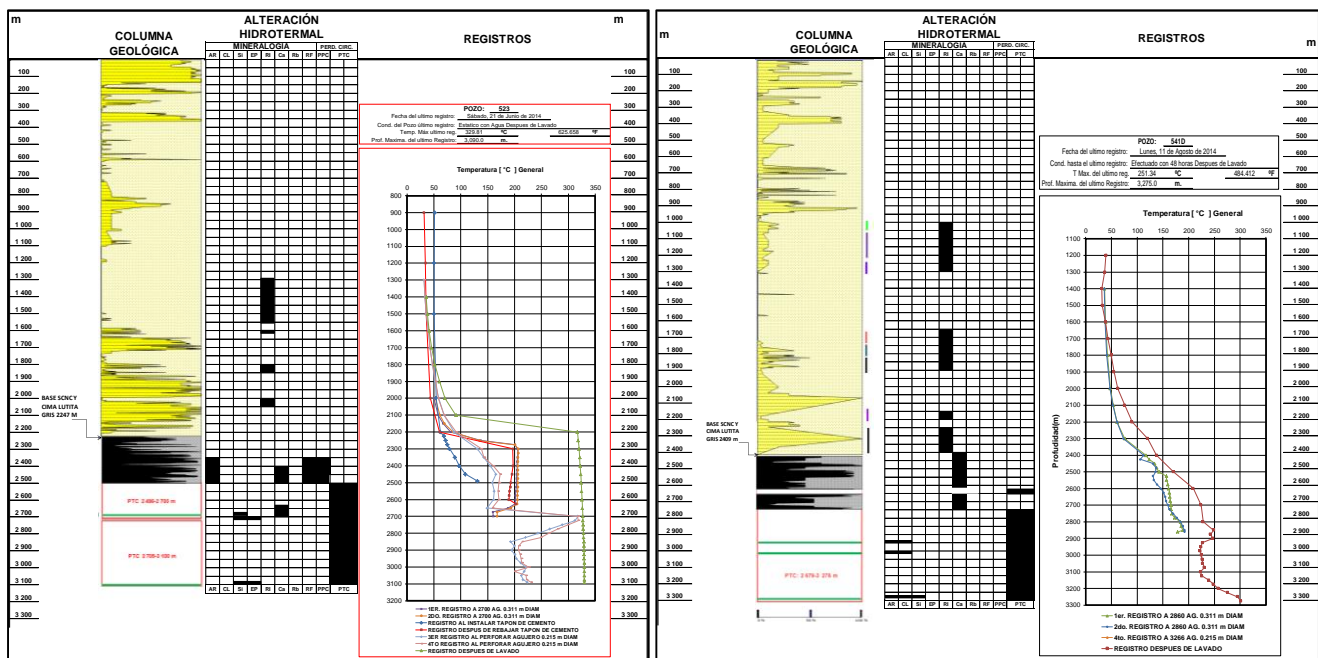


Figura 5. Columna geológica del CGCP, indicando las unidades litológicas, los ambientes de depósito y los contactos con discordancia erosional o hiatus.



Figuras 6 y 7. Litología, mineralogía y registros de temperatura de los pozos 505 (izquierda) y 514 (derecha).



Figuras 8 y 9. Litología, mineralogía y registros de temperatura de los pozos 523 (izquierda) y 529D (derecha).

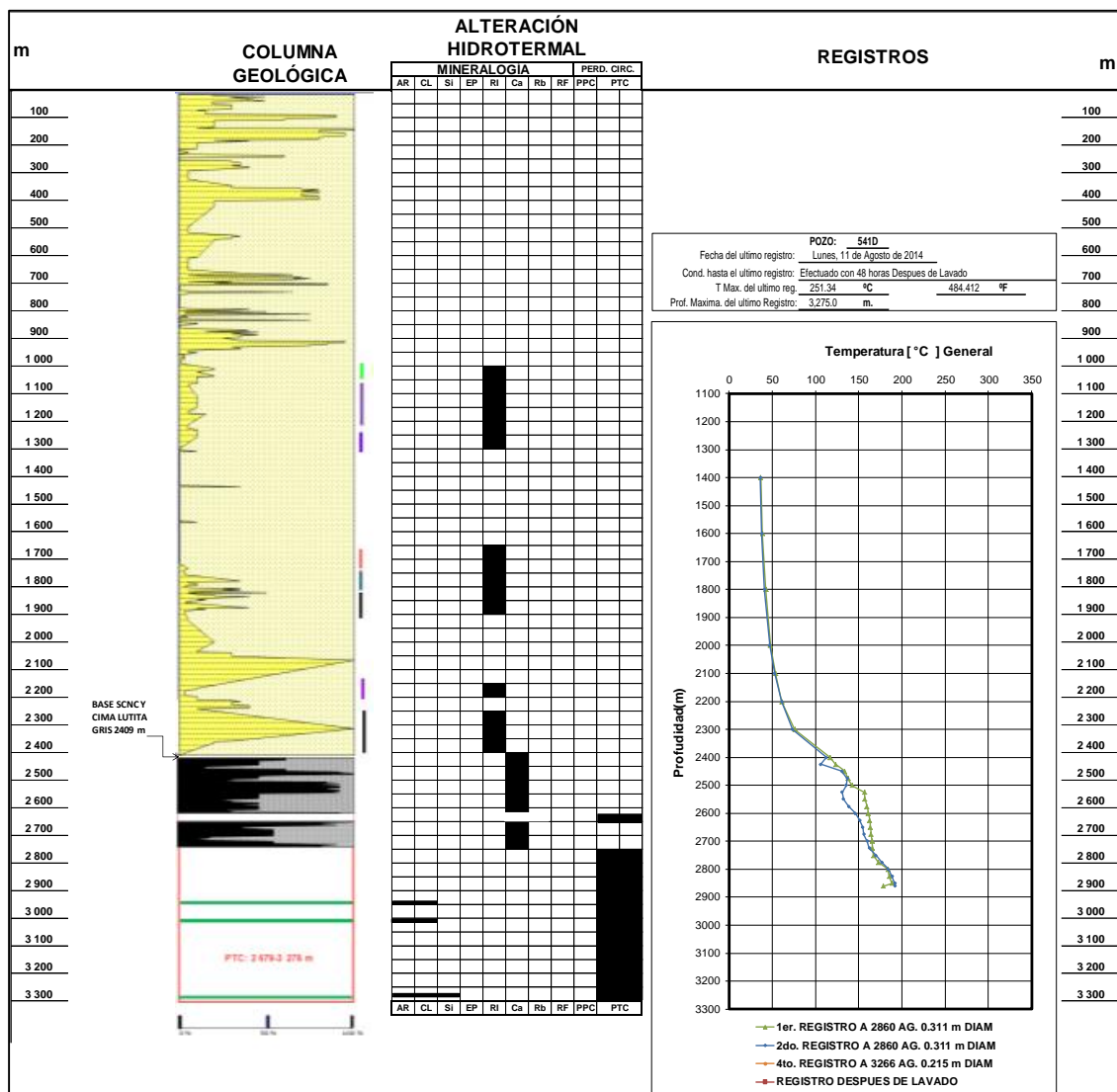


Figura 10. Litología, mineralogía y registros de temperatura del pozo 541D.

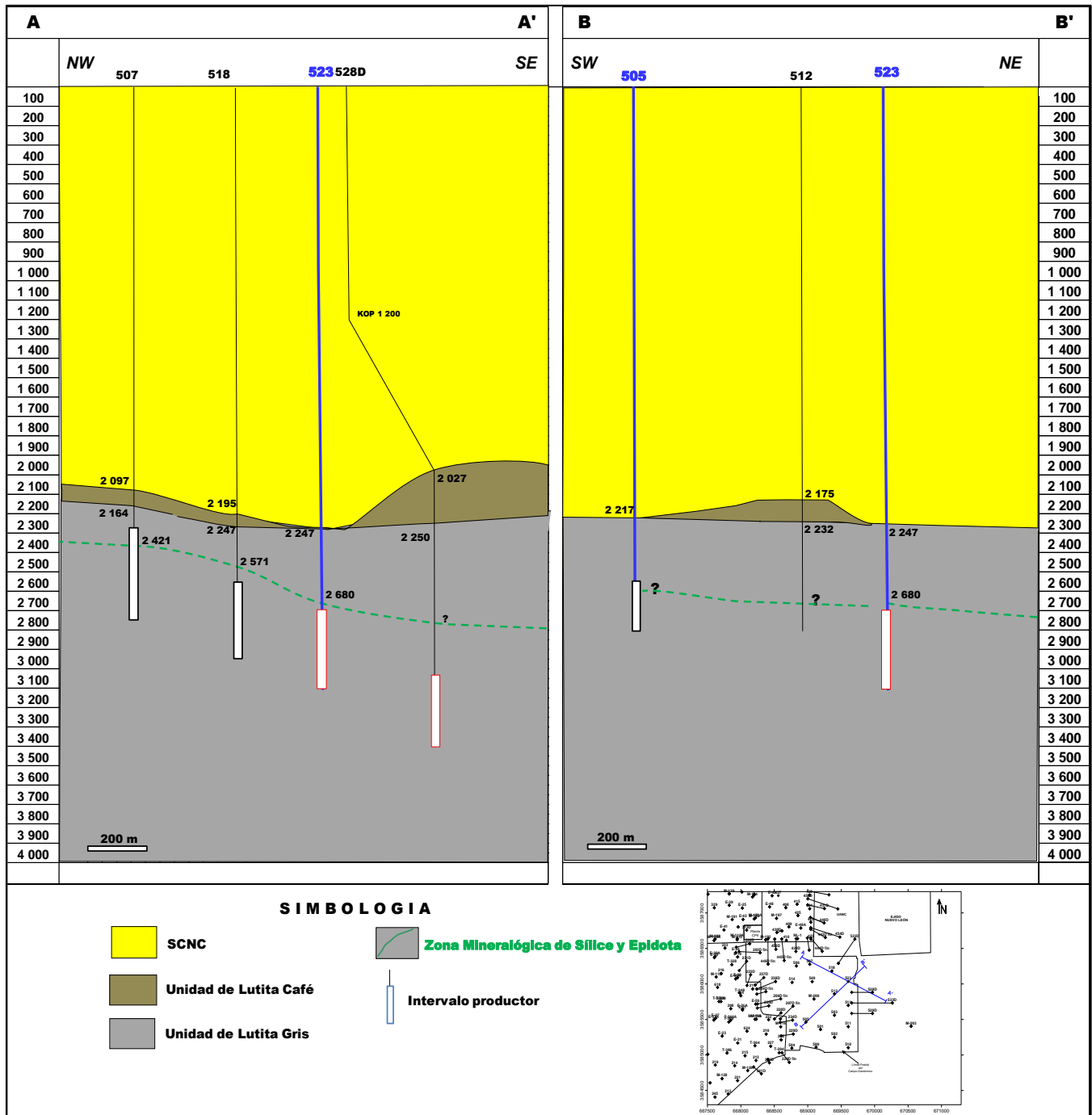


Figura 11. Secciones geológico-estructurales A-A' (izquierda) y B-B' (derecha).

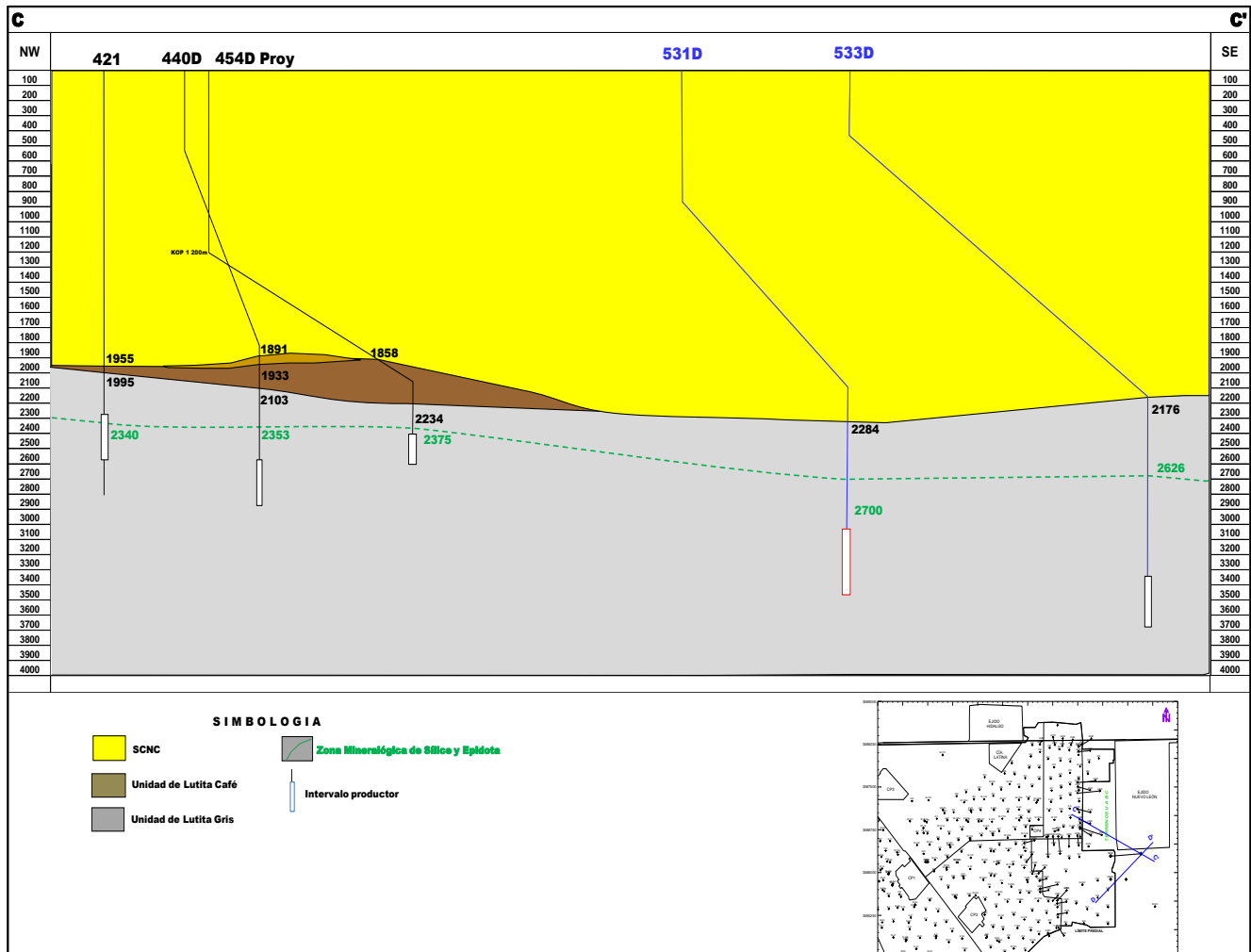


Figura 12. Sección geológico-estructural C-C'.

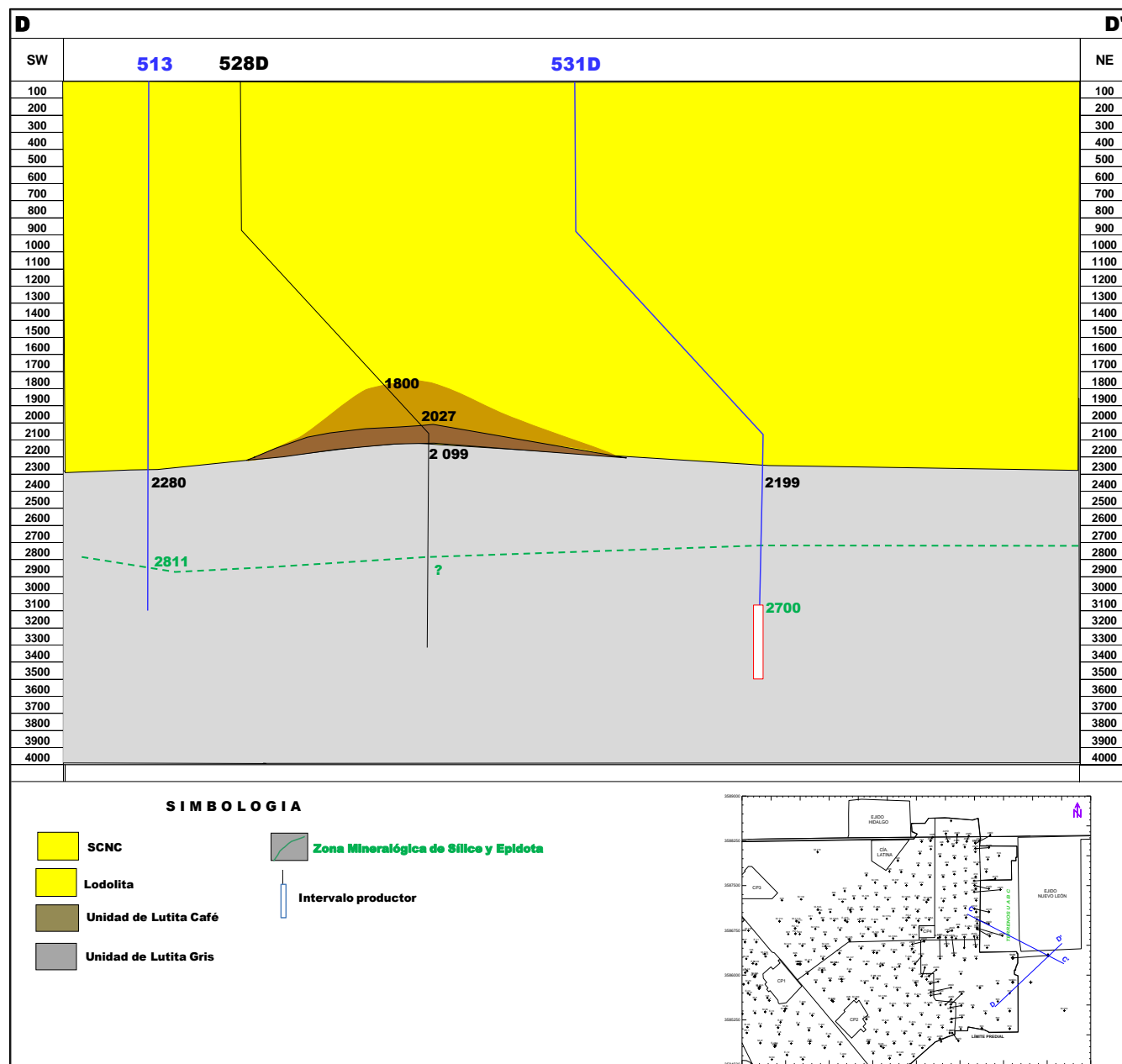


Figura 13. Sección geológico-estructural D-D'.