

Evolución del sector CP-I del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC, y alternativas de explotación

Marco Helio Rodríguez Rodríguez

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, BC, México. Correo: marco.rodriguez01@cfe.gob.mx

Resumen

Después de 35 años de explotación del yacimiento en el sector de CP-I (Cerro Prieto I) del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC, sus condiciones térmicas han declinado considerablemente, por lo que el número de pozos productores ha disminuido, dejando algunas zonas abandonadas a la explotación. Sin embargo, aun es posible aprovechar la energía que contiene este sector del yacimiento para la generación de electricidad mediante ciclo binario. Para ello primeramente se debe conocer en detalle cuál ha sido la evolución del yacimiento en este sector, identificando los estratos de mejor potencial para evaluarlos posteriormente. En este estudio se presenta la evolución del yacimiento de CP-I como respuesta a su explotación, identificando las principales características del yacimiento que determinan su comportamiento. Así mismo, se identifican las zonas del yacimiento de CP-I que conservan las mejores condiciones que pueden permitir su explotación utilizando ciclo binario. El aprovechamiento de sectores del yacimiento que han sido parcialmente abandonados puede jugar un papel crucial en el futuro del campo, si se logran reincorporar a la explotación, lo cual ayudaría a contrarrestar la constante declinación de la producción de vapor que desde el principio de la explotación se había observado en este sector. Esta declinación se había logrado mitigar al disponer de una enorme área para localizar pozos productores de reposición, pero por el creciente número de pozos en operación actualmente el área disponible para localizar pozos productores nuevos resulta insuficiente.

Palabras clave: Cerro Prieto I, declinación de producción, ciclo binario, evaluación de yacimientos.

Evolution of the CP-I sector of the Cerro Prieto geothermal reservoir, BC, and exploitation alternatives

Abstract

After 35 years of exploitation of the CP-I (Cerro Prieto I) sector of the Cerro Prieto geothermal field, its thermal conditions have been declined substantially; the number of production wells is reduced and exploitation has been abandoned in some zones. However with a binary cycle, it is still possible to generate electricity from the remaining reservoir energy. To do so, one needs to know a detailed reservoir history of the sector, identifying the best potential strata to be assessed. In this paper, the CP-I reservoir evolution is presented and its exploitation and main reservoir characteristics –which play important roles-- are identified. The CP-I zones offering the best conditions for binary cycle exploitation are identified. Exploiting partially abandoned reservoir sections is crucial for the future of the field. If such sections can be made to produce, this will help reduce the progressive steam-production decline in the occurring since production began. The production decline had been mitigated by a large area available for drilling replacement production wells, but such an area is limited now, due to the vast number of operating wells.

Keywords: Cerro Prieto-I, production decline, binary cycle, reservoir assessment.

1. Introducción

La explotación del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto empezó en el sector oeste del campo en 1973, en el sector denominado Cerro Prieto Uno (CP-I), alcanzando una capacidad de 75 MW con dos unidades de 37.5 MW cada una. En 1979 se duplicó la capacidad con otras dos unidades similares a las anteriores, alcanzando 150 MW. En 1981 entró en operación una quinta unidad de 30 MW alimentada con vapor de menor presión, producida con el agua residual de la primera separación de pozos que alimentan las primeras cuatro unidades mencionadas. El sector CP-I llegó así a una capacidad total de 180 MW.

Desde el inicio de la explotación del yacimiento se identificó que la respuesta dominante fue una invasión de agua de menor temperatura, tanto lateral por el margen oeste del campo como vertical en algunos pozos (Truesdell, 1978), con evolución a dos fases en delimitadas zonas de CP-I (Grant, 1981). Estas zonas fueron retornando a comportarse como zonas de líquido dominante debido a la enorme recarga de aguas de menor temperatura, provocando gradualmente la muerte de algunos pozos productores, por lo que algunas zonas de explotación se han ido abandonando. Para mediados del 2008, la producción de vapor de CP-I fue tan solo un 20% de lo que se produjo en 1995.

El objetivo de este trabajo es identificar y evaluar los estratos que se pudieran seguir explotando utilizando unidades de ciclo binario. Para lograrlo, primeramente se muestran las características generales del yacimiento, detallando las del sector CP-I. Se presentan las cinco zonas en las que se subdividió este sector mostrando para cada una lo siguiente: a) su evolución productiva; b) su evolución geoquímica; c) registros de temperatura y d) la evolución de la presión. Se presentan posteriormente los resultados del análisis, evaluando esas cinco zonas para su posible explotación con unidades de ciclo binario. Posteriormente se discuten las ventajas y desventajas de la zona que se considera de mayor interés.

2. Características generales del yacimiento

Para mostrar las características generales del yacimiento que permitan comprender mejor el comportamiento del sector CP-I, se muestra en la Figura 1 la configuración de la cima de la Unidad de Lutita Gris (ULG) y la Cima de los minerales de sílice y epidota (CSE). Esta última se ha relacionado con la cima del llamado yacimiento beta (Gutiérrez y Rodríguez *et al.*, 2000). En la ULG se encuentran los estratos productores del yacimiento, que consisten en intercalaciones lenticulares de areniscas en lutitas.

La cima de la ULG es más somera hacia el oeste del campo, en donde se encuentra a profundidades de 750 m. Hacia el sur, sureste y al este, esta unidad se profundiza; por ejemplo, hacia el margen sureste su cima se halla a 1750 m de profundidad.

En relación a la distribución de la CSE, se puede observar un comportamiento similar al de la cima de la ULG, pero con marcadas diferencias en algunas zonas, como son una abrupta profundización hacia el margen norte del campo, donde las líneas de los contornos se hacen perpendiculares con respecto a los de la cima de la ULG. Tampoco en la zona denominada del domo, al este del sector de CP-III, se observa correspondencia entre los contornos mencionados.

Por otra parte, del centro al norte del sector CP-I se perforaron varios pozos productores relativamente someros, que no presentaron la ocurrencia de minerales de sílice y epidota. Estos pozos explotan al denominado yacimiento alfa. Sin embargo, en pozos profundos en el sector norte de CP-I sí se encontraron minerales hidrotermales de sílice y epidota de manera esporádica; cuando la ocurrencia fue en forma continua, ésta desaparece a mayores profundidades.

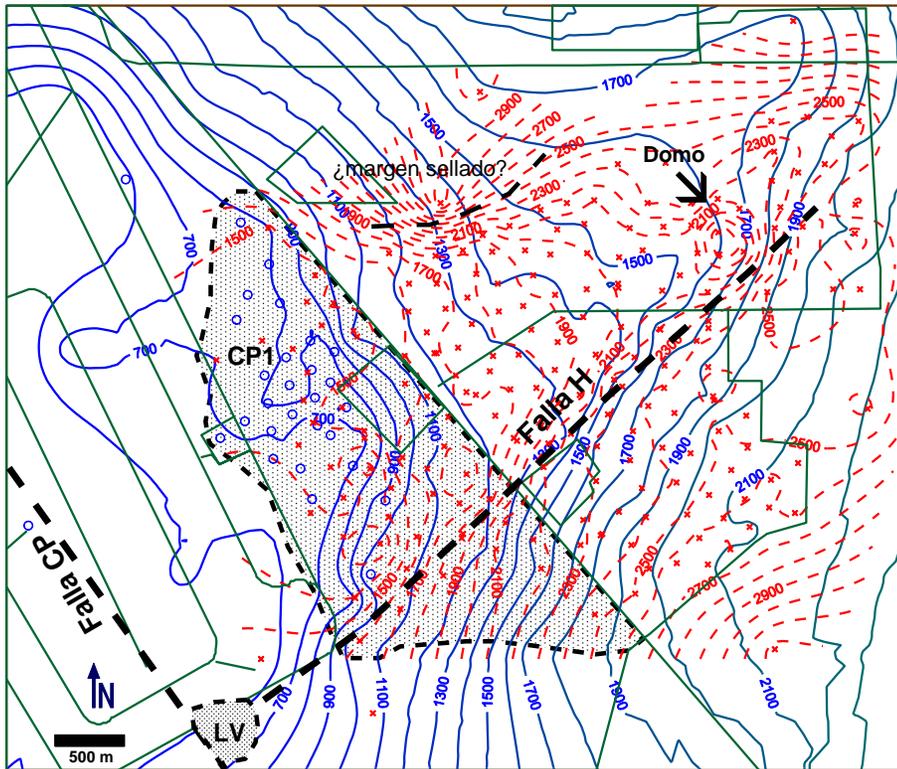


Fig. 1. Contornos de las cimas de la Unidad de Lutita Gris (líneas azules) y la zona con cementante de Sílice y Epidota (líneas rojas).

3. Evolución productiva

El vapor total producido por todo el campo y el aportado por los pozos del sector CP-I, así como el porcentaje del total que este último representa se puede ver en la Figura 2. Aquí se observa que hasta finales de los años setenta el vapor total provenía sólo de los pozos de CP-I. A partir de 1985, sin embargo, el aporte de CP-I empezó a disminuir considerablemente hasta representar apenas el 6% del total en 2008.

Para el análisis productivo de CP-I, se consideran las cinco zonas definidas en un trabajo anterior (Rodríguez *et al.*, 2000), ampliando la zona B1SE para incluir a los pozos que posteriormente se han ido incorporando hacia el sur de esta zona. Esas cinco zonas de CP-I se denominan: 1) alfa norte (AN); 2) alfa sur (AS); 3) beta uno norte (B1N); 4) beta uno sur (B1S) y 5) beta uno sureste (B1SE). Su ubicación en el campo de Cerro Prieto se presenta en la Figura 3.

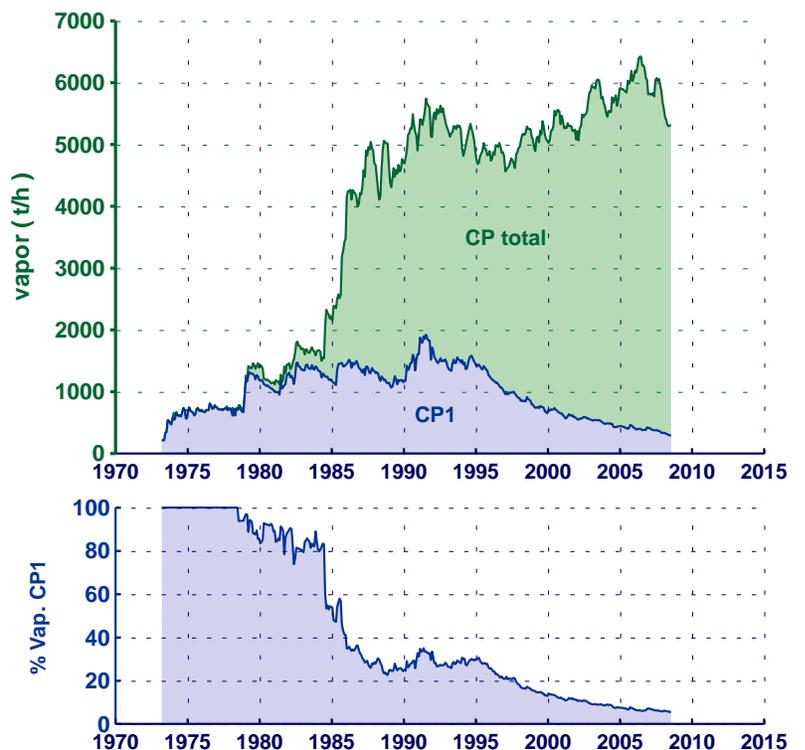


Figura 2. Producción de vapor total en Cerro Prieto y en el sector CP-I (arriba), y porcentaje aportado por CP-I con respecto a la producción total (abajo).

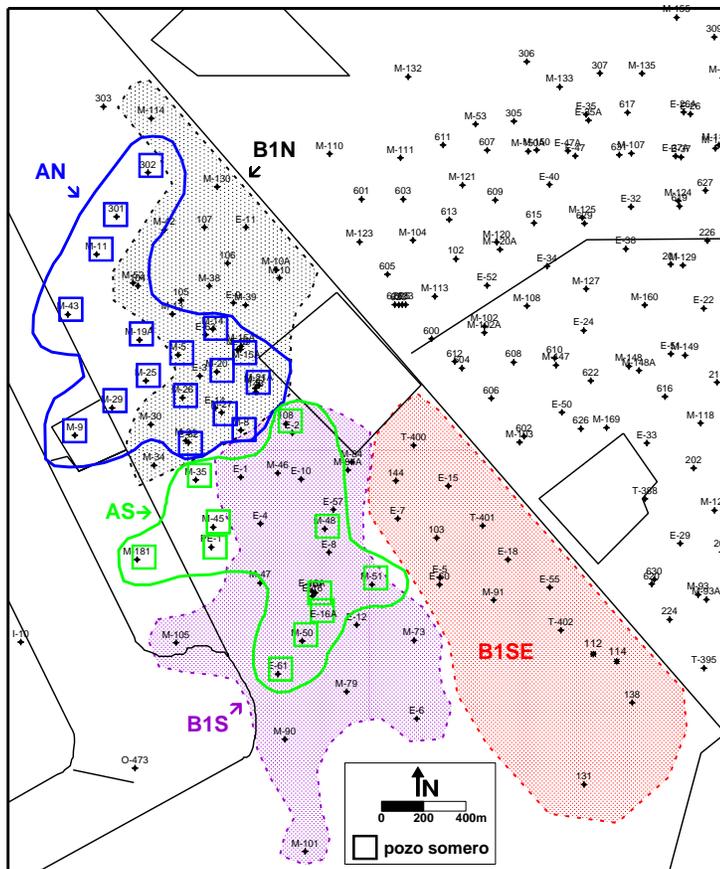


Fig. 3. Zonas en las que se dividió el sector CP-I.

Para la zona norte los pozos terminados a menos de 1450 m de profundidad pertenecen a la zona AN y los que son más profundos quedan en la B1N. Hay pozos que quedaron terminados en ambos acuíferos, pero conforme al criterio seguido, estos se agruparán en el más profundo. Para la zona sur se tomó la profundidad de 1650 m para separar a los pozos someros de los profundos, y así pozos terminados a menos de 1650 m de profundidad quedaron en la zona AS y el resto en la B1S. Los pozos de CP-I que quedaron al SE del área se agruparon todos en la zona B1SE, ya que todos son profundos.

La historia productiva del vapor aportado por cada una de esas cinco zonas del sector de CP-I, se muestra en la Figura 4. Puede notarse que tanto en esta figura, como en la 3 y en las sucesivas figuras donde se presenta el comportamiento de cada una de las cinco zonas mencionadas, se utilizan invariablemente los mismos colores para cada zona a fin de identificarlas más fácilmente. Tales colores son: azul para la zona AN, verde para la AS, negro para la B1N, morado para la B1S y rojo para la B1SE.

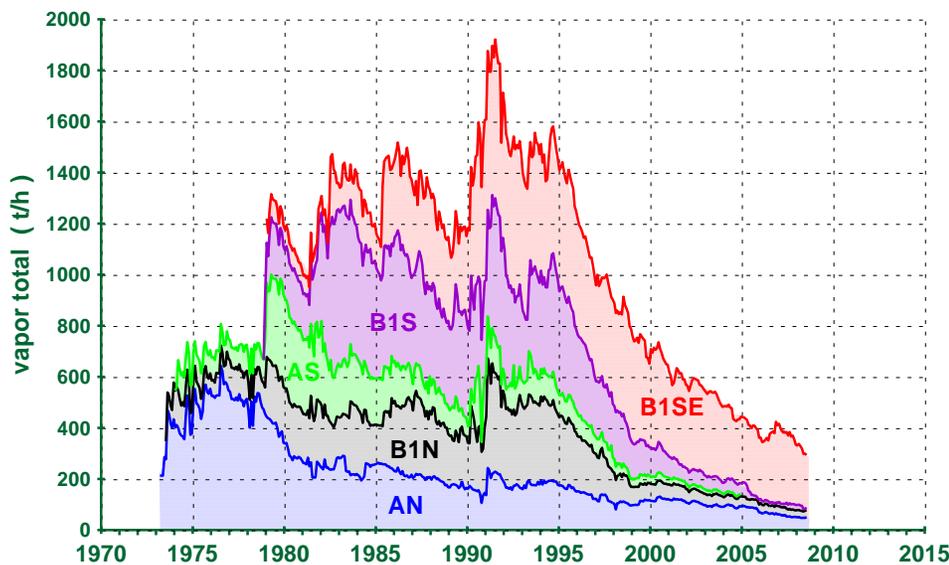


Figura 4. Vapor producido en cada una de las cinco zonas y su relación con el vapor total del sector CP-I.

En la Figura 4 las áreas en color significan la proporción de vapor aportado por cada una de las zonas con respecto al vapor total producido en el sector, expresado en toneladas por hora (t/h). Se puede observar que cada zona ha aportado diferentes proporciones en diferentes periodos. Al empezar la explotación de CP-I en 1973 gran parte del vapor era producido por los pozos de la zona AN y en menor proporción por los de las zonas AS y B1N. En 1979 se intensificó la explotación de la zona AS y se incorporó la zona B1S. En 1985 se incrementó lo aportado por los pozos de la zona B1SE. Es interesante observar cómo gradualmente se fueron

incorporando las cinco zonas de CP-I a la producción, pero también cómo se fue abatiendo la producción en cada una. Por ejemplo, en 2005 la zona AS (color verde) dejó de aportar vapor, aunque a finales de los 70s los pozos ubicados en ella producían más de 350 t/h. La zona B1S (en morado) llegó a aportar más de 400 t/h durante los años 80s y principios de los 90s, pero para fines de 2008 su aportación era de escasas 15 t/h. También se puede observar que de 1990 a 1995 la zona profunda del norte de CP-I (B1N) producía más que la somera (AN, en azul), pero que desde 1997 esta zona somera produce más que la profunda. Finalmente, se puede notar que más del 60% del vapor producido en CP-I durante los últimos años (de 2005 a 2008) ha sido producido por la zona B1SE (en color rojo).

La relación de la producción total de vapor con el número de pozos en operación de CP-I se muestra en la Figura 5, donde se ve que el resultado de un incremento en el número de pozos en operación es un aumento en la producción de vapor. En esta figura se indican las zonas que aumentaron su aportación en los incrementos de producción de vapor del sector. También se puede observar que después de un incremento en la producción ocurrió una fuerte declinación, como se indica en los ajustes lineales, en los cuales se tomaron periodos de al menos tres años que representan 36 datos mensuales. Por ejemplo, en el ajuste de 1979 a 1981 la declinación fue 133 t/h por año, de 1982 a 1985 fue de 123 t/h por año, de 1986 a 1989 de 113 t/h por año y de 1995 a 1999 de 155 t/h anuales.

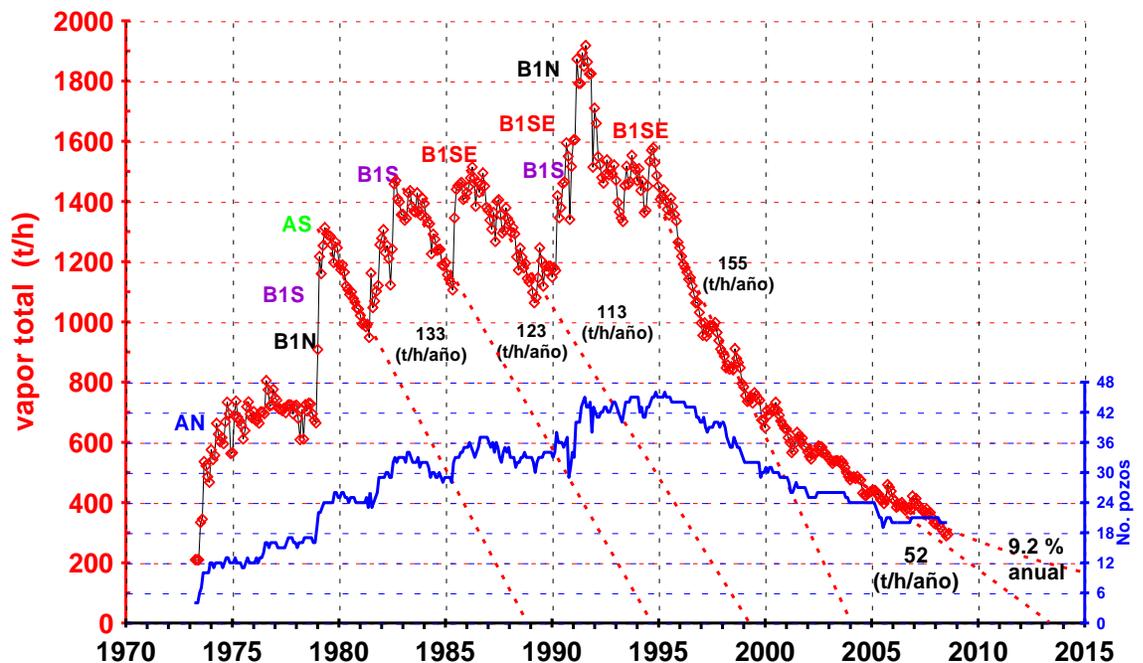


Fig. 5. Historia de la producción de vapor (rojo) y número de pozos en operación (azul) en CP-I.

Entre 1973 y 1995 el número de pozos en operación en CP-I se fue incrementando, aunque con algunos altibajos, llegando a un máximo de 45 pozos en ese año (Fig. 5). Sin embargo, conforme se fueron perforando más pozos en CP-I las áreas disponibles para localizar nuevos pozos productores se fueron agotando. Esto, aunado a la pérdida del potencial del yacimiento en este sector de CP-I, llevó a que el número de pozos se fuera reduciendo a partir de 1995, lo cual a su vez llevó a la fuerte declinación en la producción de vapor durante el segundo lustro de los años 90, que cayó de 1500 t/h a 750 t/h (Fig. 5). Por supuesto, con una menor producción total de vapor el abatimiento también fue menor, llegando a ser durante el primer lustro de este siglo de 52 t/h por año, equivalente en el último periodo ajustado a una declinación anual del 9.2%. La producción reportada en julio de 2008 fue de sólo 300 t/h, que representa una quinta parte de la producción reportada a fines de 1994 (Fig. 5).

La evolución del vapor promedio producido por pozo (VPP) para las zonas AN, B1N y B1SE se muestra en la Figura 6. Se omiten las zonas AS, por no tener actualmente ningún pozo en producción, y B1S, por tener

uno solo. La producción promedio de vapor de los pozos en la zona B1N era mayor a la de los pozos de la zona AN hasta antes de 1995. La situación se invirtió en los años posteriores, básicamente debido a que la declinación del VPP en la zona B1N llegó al 13.6% anual, mientras que en los pozos de la zona AN sólo fue del 2.5% anual (Fig. 6).

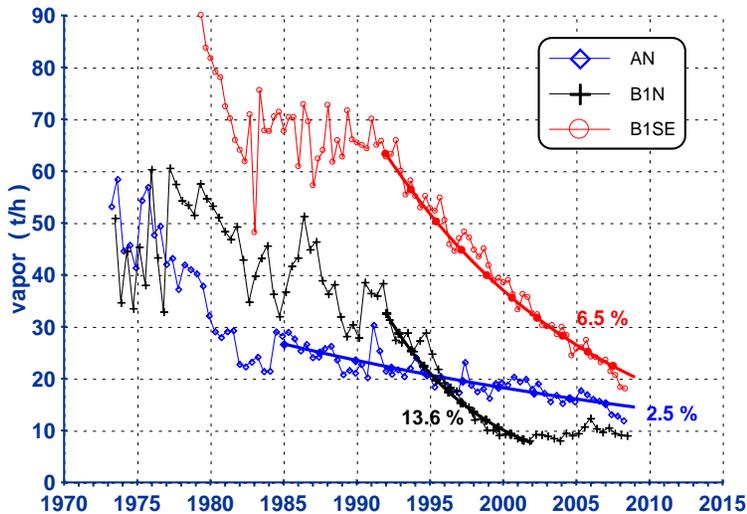


Fig. 6. Evolución del vapor promedio por pozo (VPP) en t/h en las zonas AN, B1N y B1SE de CP-I.

B1N fue en general mayor que en los pozos de la zona AN hasta antes de 1997. Pero la EMPP de los pozos de la zona B1N empezó a declinar más rápida y constantemente a partir de ese año, llegando a una tasa anual del 1.81%. Como esta tasa es mayor a la que presentan los pozos de la zona AN (del 0.52% anual), desde el año 2000 la EMPP de los pozos de esta zona ha sido más alta que la de los pozos de la zona B1N. La EMPP en la zona B1SE ha evolucionado con diversas tendencias; por ejemplo de 1980 a 1988 se incrementó de 1400 kJ/kg a 1800 kJ/kg, pero en los años siguientes ha presentado una declinación bien definida de 1.86% anual, por lo que entre 1992 y 2008 la EMPP de los pozos en esta zona bajó de 1700 kJ/kg a 1250 kJ/kg, lo cual equivale a una reducción del 50% en la fracción de vapor de la mezcla producida.

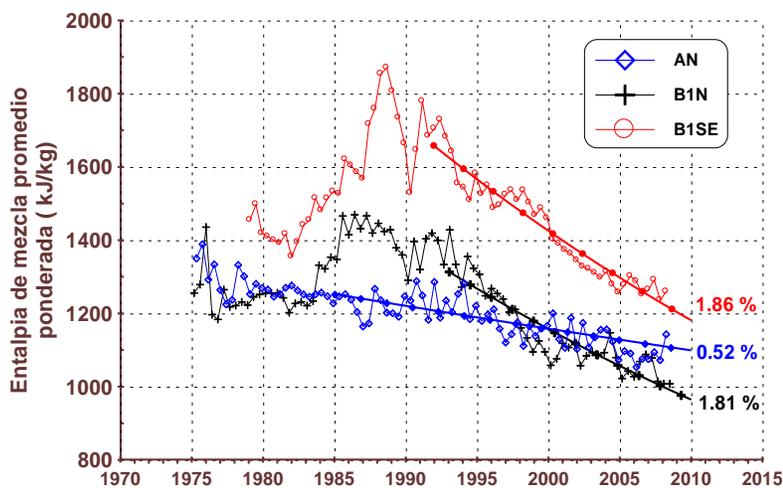


Fig. 7. Evolución de la entalpía de mezcla promedio ponderada (EMPP) para las zonas AN, B1N y B1SE de CP-I.

de cloruros a condiciones del yacimiento y la temperatura de fondo obtenida con la aplicación del geotermómetro de sodio, potasio y calcio (NaKCa).

Por su parte, el VPP de la zona B1SE tuvo un fuerte descenso entre 1979 y 1984 pero se mantuvo más o menos constante (60-70 t/h) de 1985 a 1993. A partir de este año se define una clara tendencia a bajar con un promedio anual del 6.5%, llegando en 2008 a una producción promedio de apenas 20 t/h por pozo (Fig. 6).

En la Figura 7 se presenta otro parámetro importante, que es la evolución de la entalpía de la mezcla promedio ponderada (EMPP) de las tres últimas zonas comentadas (AN, B1N y B1SE). Aquí se puede observar un comportamiento similar al del VPP presentado en la Figura 6, aunque con algunas variantes. La EMPP de los pozos de la zona

4. Evolución química e isotópica de los fluidos geotérmicos

La declinación en la producción de vapor del sector CP-I presentada en la sección anterior puede explicarse principalmente por el abatimiento de la entalpía del fluido en este sector del yacimiento de Cerro Prieto. Para comprender el abatimiento de la entalpía es necesario comprender las características del fluido de recarga, y la mejor herramienta para esto es el análisis de la composición química e isotópica de los fluidos producidos. En esta sección se presenta la evolución histórica de la composición isotópica del Oxígeno-18, la concentración

Para mostrar la evolución del contenido isotópico del Oxígeno-18 a descarga total de los pozos del sector CP-I, en la Figura 8 se muestran los contornos de su distribución para los años 1982, 1985 y 1989. A partir de esos valores se puede observar una progresiva presencia de aguas isotópicamente ligeras por el margen suroeste, con valores menores a -9.5‰ , tomando en cuenta que la composición original del agua geotérmica para el yacimiento de Cerro Prieto está en el rango de -9.5 a -7.5‰ (color morado). Estos datos fueron obtenidos por Truesdell (1998) y entregados en una visita suya al campo de Cerro Prieto.

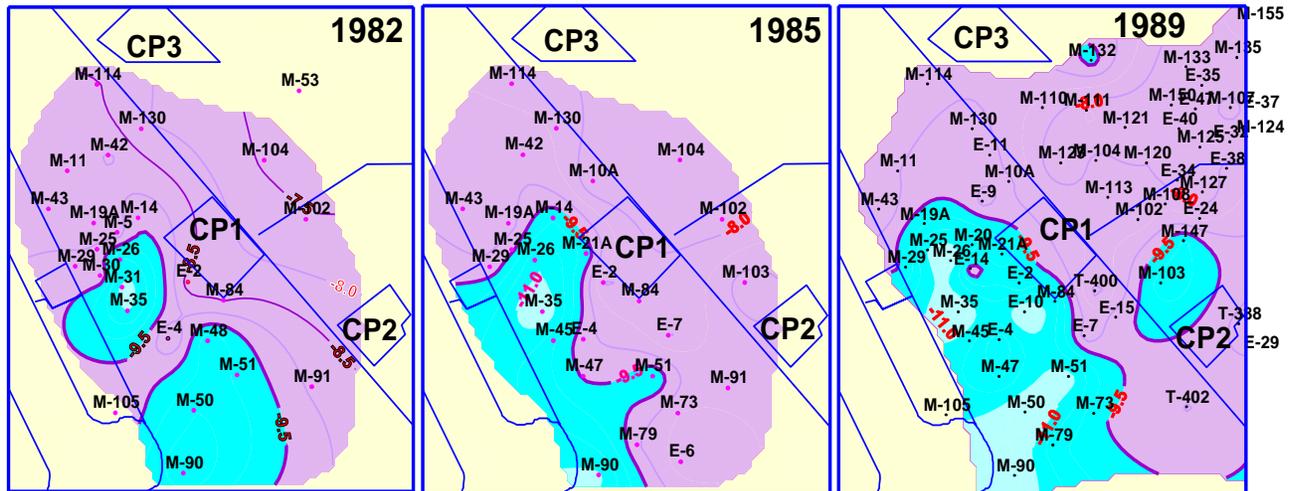


Fig. 8. Distribución del oxígeno-18 (‰_{SMOW}) en fluidos del sector CP-I para los años indicados.

La concentración de cloruros del agua producida para los mismos años, es presentada en la Figura 9. En ella se ve que hacia 1982 las altas concentraciones ($>10,000$ ppm) se presentaban en los pozos del centro-sur de CP-I. Sin embargo, para 1985 y 1989 se presentó una mayor dilución en esta zona y por el margen suroeste, con valores de $6,000$ ppm, mientras que en los pozos del norte la concentración de cloruros fue más estable, manteniéndose en todo ese tiempo con valores cercanos a las $8,000$ ppm.

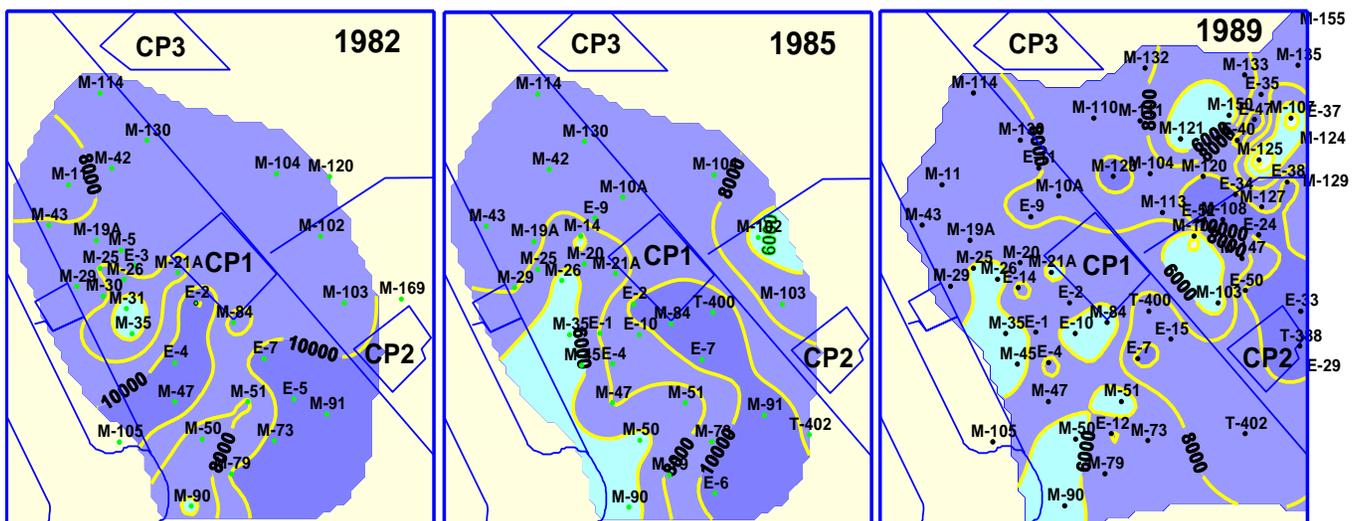


Fig. 9. Distribución de cloruros en fluidos del sector CP-I (ppm), para los años indicados.

Tanto la evolución isotópica del Oxígeno-18 (Fig. 8) como la de los cloruros (Fig. 9) indican que en la parte norte de CP-I los valores no presentaron variaciones significativas, mientras que por la parte sur, en particular por el margen suroeste del campo, se presenta una progresiva presencia de aguas diluidas e isotópicamente ligeras, resultado de la recarga.

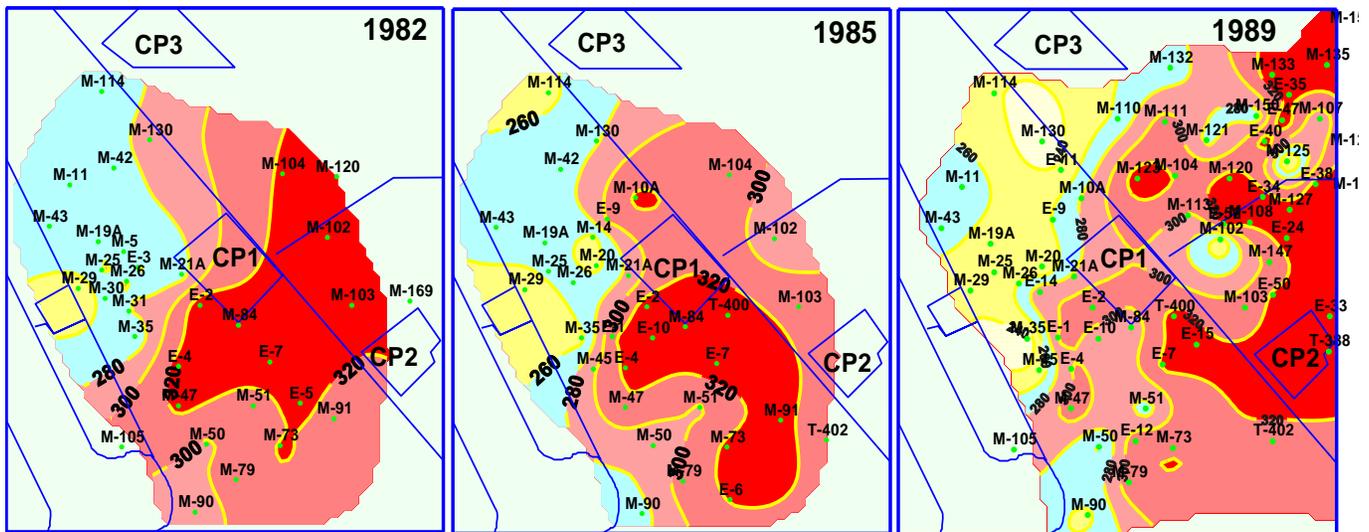


Fig. 10. Distribución de la temperatura geotermométrica NaKCa (°C) en fluidos de CP-I para los años indicados.

Por su parte, en la Figura 10 se muestra la evolución de la temperatura de fondo obtenida con el geotermómetro de NaKCa para los mismos años analizados. En ella es evidente que los fluidos de menor temperatura son producidos por los pozos ubicados hacia el norte de CP-I. Por ejemplo, en 1982 la mayoría de los pozos en la zona norte presentaron temperaturas entre 260 y 280° C, mientras que hacia el sur las temperaturas predominantes variaron entre 300 y 320° C. Para 1985 y 1989 se observa una gradual disminución de la temperatura por el margen oeste del campo, pero las menores temperaturas se mantienen en la zona norte.

5. Variación de la temperatura con registros de fondo

Con objeto de conocer la evolución de la temperatura en los estratos del yacimiento de las diferentes zonas del sector CP-I se presentan las temperaturas obtenidas con registros de fondo de 8 pozos. Tres de ellos (E-9, E-63 y 143) se ubican en la zona centro-norte del sector y cinco (pozos M-84, M-84A, E-57, M-48 y 144) se localizan en la zona centro-sur, como se ilustra en la Figura 11.

En la Figura 12 se muestran registros de temperatura de los pozos de la zona centro-norte (E-9, E-63 y 143), así como el intervalo productor. El pozo E-9 se perforó en 1984; registros de temperatura tomados en 1984 con el pozo estático (sin fluir) presentaron 310°C en el intervalo de 1300 a 1700 m de profundidad (registros 1A y 2A de la Figura 12). Cuando el pozo fluyó en 1985 se corrió el registro 3A, el cual confirma que el pozo es alimentado con fluidos de 310°C. El pozo fue reparado en 1994, dejando un intervalo productor más profundo; sin embargo, la temperatura alcanzada a profundidades mayores de 1600 m fue de sólo 260°C, según el registro 4A, mientras que entre los 1200 y 1500 m de profundidad la temperatura fue más alta (300°C). La baja temperatura a profundidades mayores de 1600 m se confirma con el registro 5A, tomado con el pozo fluyendo.

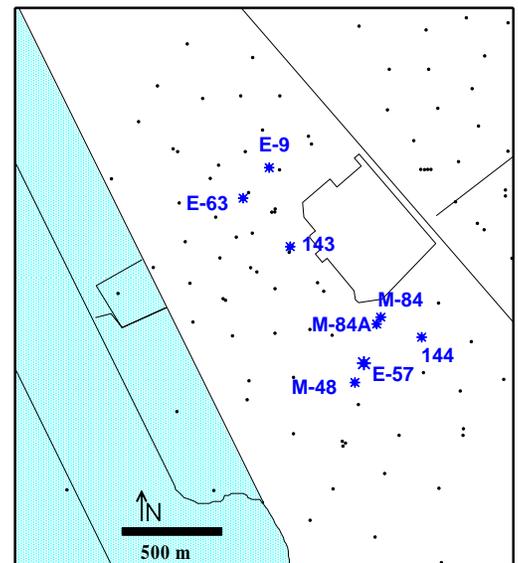


Fig. 11. Localización de los pozos cuyos registros de temperatura se comentan.

El pozo E-63 se perforó en 1989 alcanzando 300°C en el intervalo de 1300 a 1600 m según el registro estático 1B; esta temperatura fue confirmada por el registro 2B, tomado con el pozo fluyendo. En 1997 el pozo fue reparado y profundizado, alcanzando los mismos 300°C en el intervalo mencionado. Sin embargo, a la profundidad de 1650 m se registraron apenas 250°C como lo muestra el registro 3B y lo confirma el registro 4B, con el pozo fluyendo (Fig. 12).

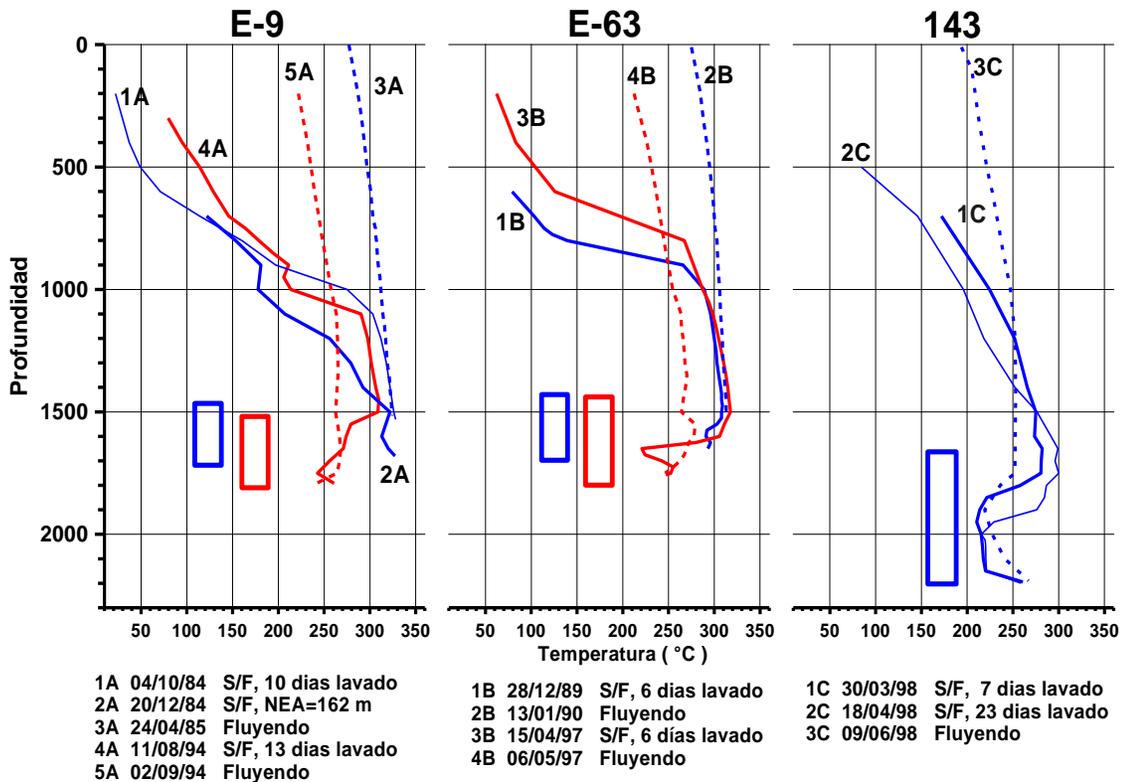


Fig. 12. Perfiles de temperatura de los pozos E-9, E-63 y 143.

Finalmente, el pozo 143 fue perforado en 1998 hasta la profundidad de 2196 m, lo cual lo convierte en el pozo más profundo de la zona productora centro-norte del sector CP-I. Los registros estáticos 1C y 2C reportan temperaturas entre 280 y 300°C en el intervalo de 1550 a 1750 m, pero por debajo de los 1800 m y hasta los 2150 m la temperatura disminuye a 220°C y luego asciende a más de 250°C al fondo del pozo. Cuando el pozo fluye, sin embargo, no hay aportación de fluido del fondo, como se interpreta con el registro 3C (Fig. 12).

En esos tres pozos analizados, ubicados en la zona B1N, se puede afirmar que se ha presentado un mayor enfriamiento en los estratos profundos (B1N) que en los estratos someros (AN), debido a la recarga de agua fría (menos caliente) inducida por la explotación.

Por lo que se refiere a los cinco pozos ubicados hacia el centro-sur de CP-I (Fig. 11), en la Figura 13 se muestran varios de sus registros de temperatura. El pozo M-48 quedó terminado en 1978 en la zona AS; en los registros 1A (pozo estático) y 2A (pozo fluyendo) se observa que a profundidades de 1100 a 1200 m las temperaturas sobrepasaban los 300°C, hacia finales de los años 70. El pozo E-57, por su parte, fue perforado en 1989 a escasos 100 m del M-48 pero a 2000 m de profundidad y dentro de la zona B1S; este pozo registró temperaturas de 200°C en el intervalo de 1200 a 1300 m y de 260°C en el intervalo de 1600 a 1900 m (Figura 13).

El pozo M-84 se perforó también en 1978, presentándose dos de sus registros de temperatura en la Figura 13: el 1B con el pozo estático, y el 2B con el pozo fluyendo; en ambos se registraron 340°C a profundidades mayores de 1500 m de profundidad. Este pozo se considera terminado en la zona B1S, pero también es

posible que haya quedado en la zona AS. Su pozo gemelo, M-84A, se perforó 20 años después a escasos 40 metros de él, pero a 2195 m de profundidad. Como se ve en la Figura 13, el pozo M-84A sólo alcanzó una temperatura de 220°C en el intervalo de 1600 a 2100 m de profundidad, como se puede observar en los registros 3B (pozo estático) y 4B (pozo fluyendo), aunque después ascendió a unos 260°C a mayor profundidad. El pozo no produjo de esos estratos profundos, como se puede interpretar por el registro 4B, y debido a que no alcanzó una presión de cabezal mayor a la del separador primario nunca se integró a producción.

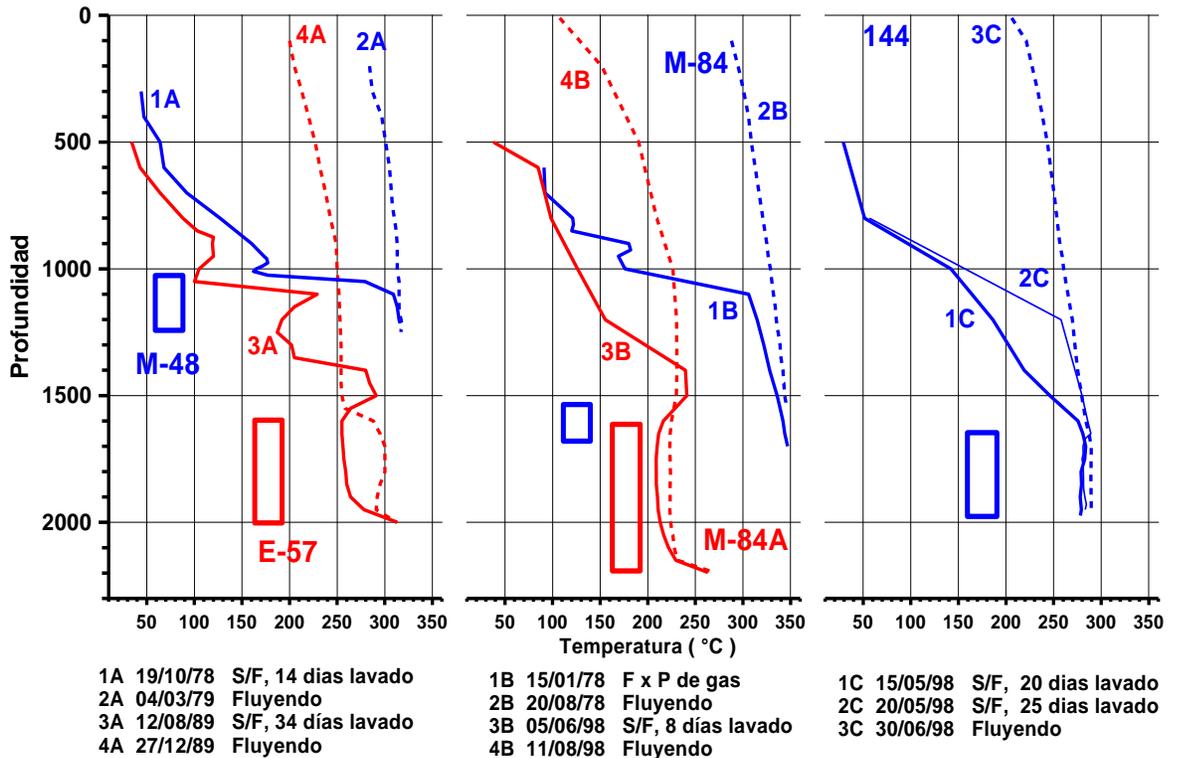


Fig. 13. Perfiles de temperatura de los pozos M-48, E-57, M-84, M-84A y 144.

Finalmente también se presentan en la Figura 13 registros de temperatura del pozo 144, perforado en 1998 a 230 m del pozo M-84A (Fig. 11). Los registros 1C y 2C fueron corridos con el pozo estático, registrándose más de 280°C a profundidades mayores de 1600 m. El registro 3C, con el pozo fluyendo, registró cerca de 290°C, en el intervalo productor de 1630 a 1970 m. Por su localización y terminación, este pozo quedó en la zona B1SE.

A partir de la evolución de la temperatura en estos cinco pozos del centro-sur del sector CP-I, se puede afirmar que en la porción inferior de la zona somera AS ha ocurrido un mayor enfriamiento provocado por la explotación, mismo que también se ha presentado, aunque no de manera tan notoria, en la porción profunda (zona B1S). También puede afirmarse que la zona B1SE es la que presenta un menor enfriamiento con respecto a las otras dos zonas comentadas (AS y B1S).

6. Evolución de la presión

Para ilustrar cómo ha evolucionado la presión a lo largo del tiempo en las diferentes zonas de CP-I, se muestra la evolución de los niveles espejo de agua (NEA) en pozos de observación. Se incluye un total de 12 pozos ubicados en las cinco zonas de CP-I, como se puede observar en la Figura 14: los pozos M-43, M-5 y M-27 son pozos terminados en la zona AN; el pozo E-14 está en en la zona B1N; los pozos 101 y M-48

quedan terminados en la zona AS; los pozos E-8 y M-84A en la zona B1S; finalmente, los pozos M-91, 131, 138, 112 y 114 quedan dentro de la zona B1SE.

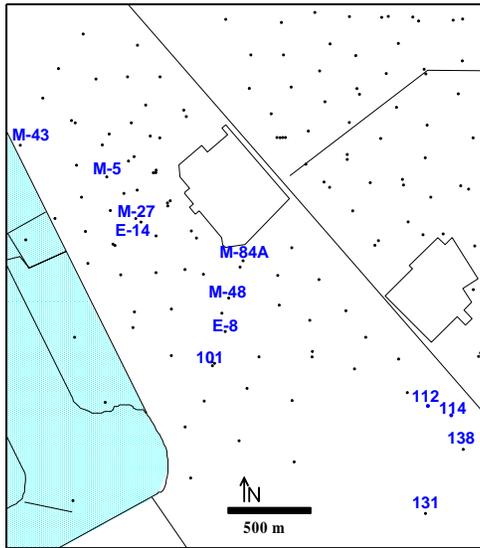


Fig. 14. Localización de los pozos cuya evolución del NEA se comenta.

En la Figura 15 se presenta la evolución del NEA en cada uno de esos pozos. En ella se observa que el pozo M-43, localizado más al norte, tiene el NEA más somero, a 170 m de profundidad, según se midió en 2008. Los pozos M-5 y M-27, también ubicados al norte, en la zona AN, cuentan con más datos históricos de su NEA. En 1984, el NEA en estos pozos era de unos 100 m de profundidad, pero se fue profundizando hasta llegar a 250 m en 1998, para después estabilizarse a esta profundidad como lo muestra la medición de 2008. El pozo profundo E-14, ubicado en la zona BIN y vecino del pozo somero M-27, presenta un NEA más profundo que varió de 200 m de profundidad en 1992 a 400 m en 2008 (Fig. 15).

Los pozos someros del centro-sur de CP-I (Fig. 14) M-48 y 101 muestran una declinación de su NEA menor que la presentada en las zonas AN y BIN del norte (Fig. 15). Sin embargo, el pozo profundo E-8, ubicado en la zona B1S entre los pozos someros M-48 y 101, ha presentado una mayor declinación de su NEA, ya que de 150 m de profundidad en 1985 bajó a 550 m en 2008. Para confirmar que el NEA en la zona B1S es profundo, se incluye el historial del pozo M-84A que, aunque algo errático, confirma que el NEA en esta zona se encuentra actualmente (2008) por debajo de los 600 m de profundidad.

Otro pozo con un largo historial es el M-91, localizado en la zona B1SE, cuyo NEA se midió a 50 m de profundidad en 1978 y descendió hasta 595 m de profundidad en 2008 (Fig. 15).

Para confirmar que el NEA en la zona B1SE es el más profundo de CP-I, se incluyen datos de los pozos 131, 138, 112 y 114, localizados en la misma zona pero al sureste, como se puede observar en la Figura 14. En 1999, después de perforarse los pozos 131 y 138, el NEA se midió a 925 m de profundidad. Entre finales de 2005 y principios de 2006, el NEA medido en los pozos 112 y 114, estuvo a más de 1100 m (Fig. 15).

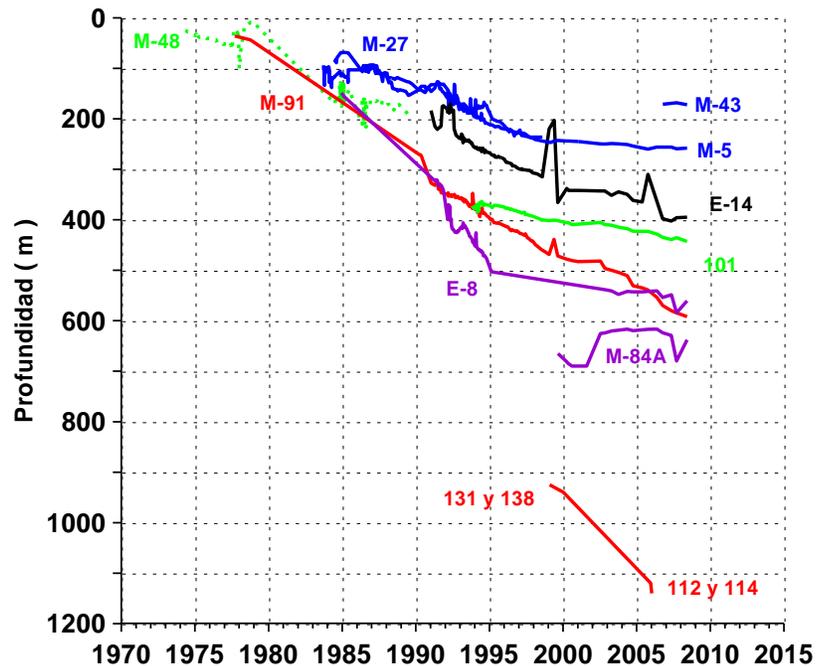


Fig. 15. Evolución del NEA en pozos seleccionados de CP-I.

7. Resultados

A partir de lo comentado hasta aquí, se presenta a continuación un resumen de las características de cada una de las cinco zonas definidas, para evaluar cuál podría resultar de mayor interés para desarrollar en ella un proyecto de ciclo binario.

Zona AN

Es una zona relativamente estable y según los datos químicos e isotópicos cuenta con abundante recarga hidráulica lateral desde el oeste. Esta recarga puede provenir del denominado acuífero sigma (Rodríguez *et al.*, 2000), presentando una temperatura relativamente buena lo que propicia que la declinación de la entalpía y de la producción de vapor sean las menores del sector CP-I. En esta zona se ubican los pozos productores más longevos, como el M-19A (Rodríguez y Romero, 2007), y no está tan influenciada hidráulicamente por la explotación de las zonas productoras de CP-III al este o de la zona profunda B1N, que pudieran inducir una mayor recarga de aguas frías como sí ocurre en otras zonas del sector CP-I.

Zona AS

Es una zona que presentó una fuerte declinación. Actualmente no hay ningún pozo productor en ella pues su temperatura ha decrecido hasta en 100°C en algunas partes, y su presión ha disminuido mucho, lo que no garantiza producciones rentables. Esta zona presenta actualmente infiltraciones de aguas someras de temperatura relativamente baja. Está conectada hidráulicamente con zonas productoras profundas, como la B1S y otras de de extensa explotación por el este como la zona B1SE y la del sector CP-II, lo cual ha inducido una mayor recarga de baja temperatura que a su vez provoca los fuertes enfriamientos mencionados. Así, aunque cuenta con un enorme recarga, presenta fuerte caída de presión y el fluido se mantiene en fase líquida.

Zona B1N

Es una zona que originalmente presentó buenas condiciones de temperatura y producción. Sin embargo por estar conectada hidráulicamente con zonas de gran explotación, como la zona del sector CP-III, en ella se ha inducido una recarga de agua de menor temperatura proveniente del oeste. Al pasar esta recarga por la zona B1N ha provocado un enfriamiento significativo, lo que resultó en una fuerte declinación de la entalpía y de la producción de vapor. Por ello, a pesar de la enorme recarga que recibe, su caída de presión es mayor que en la zona somera AN.

Zona B1S

Esta zona es recargada con agua de temperatura sustancialmente menor. Por estar conectada hidráulicamente con zonas de mayor explotación, como la B1SE y la de CP-II, se ha inducido una mayor recarga de agua fría, lo que ha provocado una fuerte declinación de la entalpía y de la producción de vapor. De tal manera, pese a su enorme recarga presenta una fuerte caída de presión. Desde 2000 sólo se ha mantenido en ella un pozo en producción, pues el resto de los pozos han ido muriendo sin haber sido costeable repararlos o reemplazarlos.

Zona B1SE

Originalmente fue una zona de gran potencial. Sin embargo, gradualmente ha sido invadida por agua de menor temperatura, inducida por la explotación in situ y por la enorme explotación del sector CP-II, vecino oriental de esta zona. Esto ha provocado un enorme abatimiento de la entalpía, la producción de vapor y la presión del yacimiento. A pesar de todo ello, esta zona es la que ha venido aportando en los últimos años más del 60% del vapor producido en CP-I. Para mediados de 2008, aún se había 12 pozos en producción en esta zona.

8. Discusión

La zona de mayor interés para ser aprovechada con unidades de ciclo binario es la zona AN. Aunque esta es la zona con mayor tiempo en explotación y la que inicialmente presentó las condiciones de presión y temperaturas más bajas, es la que actualmente presenta más temperatura que algunas otras zonas del sector CP-I. Esto se debe a que ha presentado una menor declinación de entalpía, presión y producción de vapor. A continuación se indican las ventajas y desventajas para su aprovechamiento.

Ventajas de la zona AN

- Es la zona más somera respecto a las otras cuatro zonas de CP-I --y de todo el campo--, por lo que los pozos necesarios para su explotación futura deberán ser más económicos.
- Es la zona que ha presentado la menor declinación de entalpía, presión y producción de vapor en todo el sector de CP-I.
- Es la zona que actualmente manifiesta las más altas presiones y temperaturas del sector, comparada con las zonas AS, B1N y B1S.
- La temperatura promedio actual de la zona es de 200°C. Considerando que la temperatura mínima requerida para unidades de ciclo binario es de 130°C, se dispone de un margen suficiente para asegurar la disponibilidad del recurso energético por los 30 años de vida útil del proyecto.

Desventajas de la zona AN

- Es posible que al reiniciar una explotación mayor en esta zona se induzca una recarga de agua fría sustancialmente mayor a lo observado en los últimos años, provocando un enfriamiento prematuro.
- Es posible que los pozos y las unidades a instalar presenten problemas de incrustación.
- Es posible que si la presión y la temperatura disminuyen más, los pozos no logren fluir en forma artesiana, requiriéndose de bombas para extracción lo que reduciría la eficiencia del sistema.

9. Conclusiones

Después de 35 años de explotación del sector CP-I, el yacimiento geotérmico ha venido experimentando una invasión de aguas de menor temperatura por el oeste, la cual se había identificado prácticamente desde el inicio de la explotación. En consecuencia, la temperatura y presión del yacimiento han disminuido provocando una fuerte declinación de la entalpía y de la producción de vapor. Consiguientemente, el número de pozos productores se ha reducido considerablemente en este sector, debiendo haber dejado de explotar algunas de sus zonas originalmente productoras.

Por las características del yacimiento de CP-I ha sido posible identificar cinco zonas diferentes, denominadas AN, AS, B1N, B1S y B1SE, que tienen diferentes condiciones: profundidad del intervalo productor, presión, temperatura y ritmos de declinación. Las diferencias provienen principalmente por las características de la recarga que cada una recibe.

La zona de mayor interés para un posible aprovechamiento mediante unidades de ciclo binario es la zona AN. Aunque al inicio de la explotación no fue la zona de mayor presión y temperatura, debido a su mayor estabilidad productiva con respecto a las otras cuatro zonas, ésta aún conserva condiciones favorables para su aprovechamiento.

Referencias

- Grant, M.A., A.H. Truesdell, and A. Mañón, 1981. Production induced boiling and cold water entry in the Cerro Prieto geothermal reservoir indicated by chemical and physical measurements. *Proc. Third symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field*. Berkeley, California, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-11967, pp. 221-237.
- Gutiérrez-Puente, H., and M.H. Rodríguez-R., 2000. Development history of Cerro Prieto (1973-2000). *Transactions fo the Geothermal Resource Council*, Vol. 24, pp. 427-431.
- Rodríguez, M.H., H. Gutiérrez, and J.S. de León, 2000. Update fluid flow model for the CP1 area of the Cerro Prieto field. *Proceedings of the 25th Geothermal Reservoir Workshop*, Stanford, California, pp. 388-397.
- Rodríguez Rodríguez, M.H., y F. Romero Ríos, 2007. Análisis de la evolución productiva del pozo M-19A del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 20. No. 2, pp. 66-75.
- Truesdell, A.H., A. Mañón, M.E. Jiménez, A. Sánchez, and J.J. Fausto, 1978. Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto geothermal field. *Proceedings of the 1st Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México*, pp. 130- 138.
- Truesdell, A.H, 1998. Comunicación personal.