

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

Marco Helio Rodríguez Rodríguez

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto. Correo:

marco.rodriguez01@cfec.gob.mx

Resumen

Después de 35 años de explotación del yacimiento de CP-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, utilizando ciclo binario. Para esto 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 CP-I sector of the Cerro Prieto geothermal reservoir, BC, and exploitation alternatives

Abstract

After 35 years of exploitation of the CP-I sector of the Cerro Prieto geothermal field, its thermal conditions has been declined substantially and the number of production wells reduced, consequently some zones has been abandoned to exploitation. However it is still possible to use the remaining reservoir energy to generate electricity, using binary cycle. To do that, firstly it is necessary to know what has been the detailed reservoir evolution in this sector, identifying the best potential strata to be assessed later. In this paper the CP-I reservoir evolution is presented as result to its exploitation and main reservoir characteristics are identified, which play an important role. Also, the CP-I zones presenting the best conditions to be exploited through binary cycle are identified. Exploiting reservoir sections which are partially abandoned is crucial for the future of the field, if they can be reincorporated to production, since this will help to reduce the progressive steam production decline identified in this sector since production began. This production decline had been mitigated because there was a large area to drill replacement production wells, but the available area for new wells 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 inició en el sector oeste del campo en el año de 1973, en el sector denominado Cerro Prieto Uno (CP-I), alcanzando una capacidad de 75 MW, con dos unidades de 37.5 MW. En 1979 se duplicó la capacidad, con otras dos unidades similares a las anteriores, alcanzando 150 MW. Finalmente en el año 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.

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), las cuales fueron retornando a 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 CP1 fue 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 lograr ese objetivo primeramente se muestran las características generales del yacimiento, detallando las del sector CP-I. Se presentan las cinco zonas en las que se subdividió el CP1 mostrando para cada una lo siguiente: a) evolución productiva; b) evolución geoquímica; c) registros de temperatura y d) evolución de la presión. Se presenta posteriormente los resultados del análisis, evaluando las 5 zonas para su posible explotación utilizando unidades de ciclo binario. Posteriormente se presenta una discusión sobre las ventajas y desventajas de la zona que se considera la de mayor interés y se termina con las conclusiones del estudio.

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 la Lutita Gris (ULG) y la Cima de los minerales de sílice y epidota (CSE), la cual se ha relacionado con la cima del yacimiento beta (Gutiérrez y Rodríguez et al., 2000). En la ULG se encuentran los estratos productores del yacimiento, que consiste en intercalaciones lenticulares de areniscas y 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 se encuentra 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, en donde las líneas de los contornos se hacen perpendiculares respecto a los de la cima de la ULG. Así mismo, en la zona denominada del domo, al este del sector de CP-III, no se observa correspondencia entre los contornos mencionados. Por otra parte, del centro al norte del sector CP-I, se perforaron varios pozos relativamente someros, que no presentaron la

ocurrencia de los minerales de sílice y epidota. Estos pozos explotan al denominado yacimiento alfa. Sin embargo, pozos profundos en el sector norte de CP-I encuentran los minerales hidrotermales de sílice y epidota de manera esporádica y cuando la ocurrencia fue en forma continua, ésta desaparece a mayores profundidades.

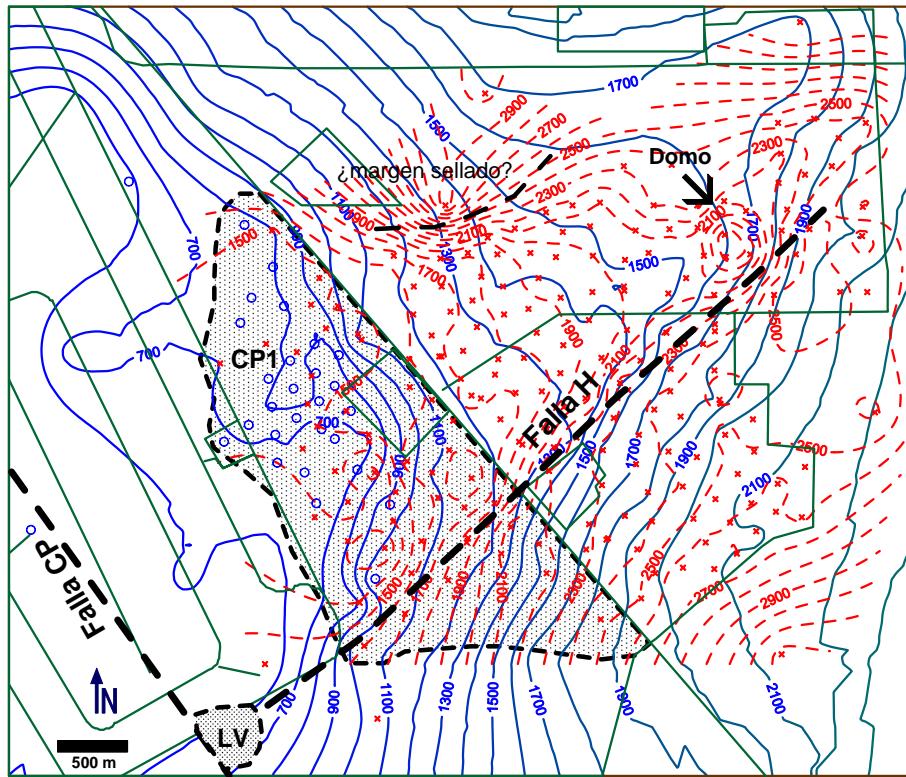


Figura 1. Contornos de la cimas de la ULG (líneas azules) y CSE (líneas rojas).

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 aportado por éste, es presentado en la figura 2, en la cual se puede observar que hasta finales de los setentas, el vapor total era aportado prácticamente por los pozos de CP-I, sin embargo esta proporción ha disminuido considerablemente hasta alcanzar 6% en 2008.

Para el análisis productivo de CP-I, se consideran las 5 zonas utilizadas en un trabajo anterior (Rodríguez *et al.*, 2000), ampliando la zona B1SE para incluir los pozos que posteriormente se han ido incorporando hacia el sur de esta zona. Las 5 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 (B!SE), localizándose como lo muestra la Figura 3.

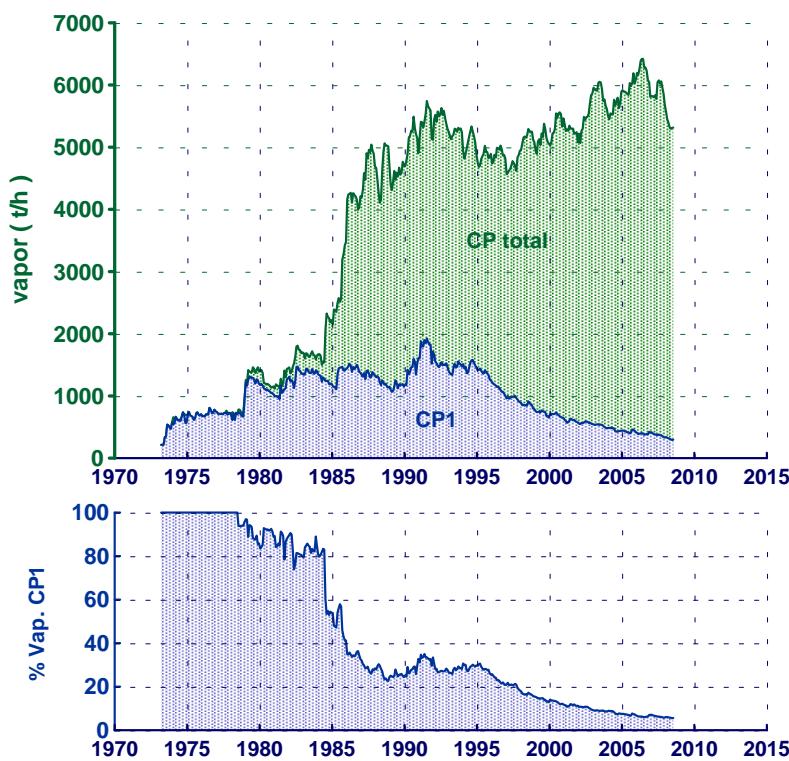


Figura 2. Producción de vapor total en Cerro Prieto y en el sector CP-I, así como el porcentaje aportado respecto a la producción total.

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

La historia productiva del vapor aportado por cada una de las 5 zonas del sector de CP-I, se muestra en la Figura 4. En las figuras donde se presenta el comportamiento de las 5 zonas definidas, se utilizan siempre los mismos colores para cada zona, para identificar y correlacionar más rápido los diferentes comportamientos. El color y zona correspondiente son: azul AN, verde AS, negro B1N, morado B1S y rojo B1SE. En la Figura 4, las áreas de colores, significan la proporción de vapor aportado por cada zona correspondiente. Se puede observar como cada zona ha aportado diferentes proporciones para diferentes tiempos. Al iniciar la explotación de CP-I en 1973, gran parte del vapor era producido por los pozos de la zona AN y en menor proporción 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 la zona B1SE. Es interesante observar como gradualmente se fueron incorporando las cinco zonas de CP-I a la producción, pero también se puede observar cómo se fue abatiendo su producción. Por ejemplo, en el año 2005, la zona AS dejó de aportar vapor, aunque a finales de los 70's, aportaba más de 350 t/h. La zona B1S llegó a aportar más de 400 t/h durante los 80's y principios de los 90's, sin embargo al año 2008 su aportación era de escasas 15 t/h. También se puede observar que de 1990 a 1995, al norte de CP-I, la zona profunda (B1N) producía más que la somera (AN), sin embargo, desde 1997 la zona somera produce más que la profunda. Finalmente se puede observar que más del 60% del vapor producido en CP-I, durante los últimos años, del 2005 al 2008, es producido por la zona B1SE.

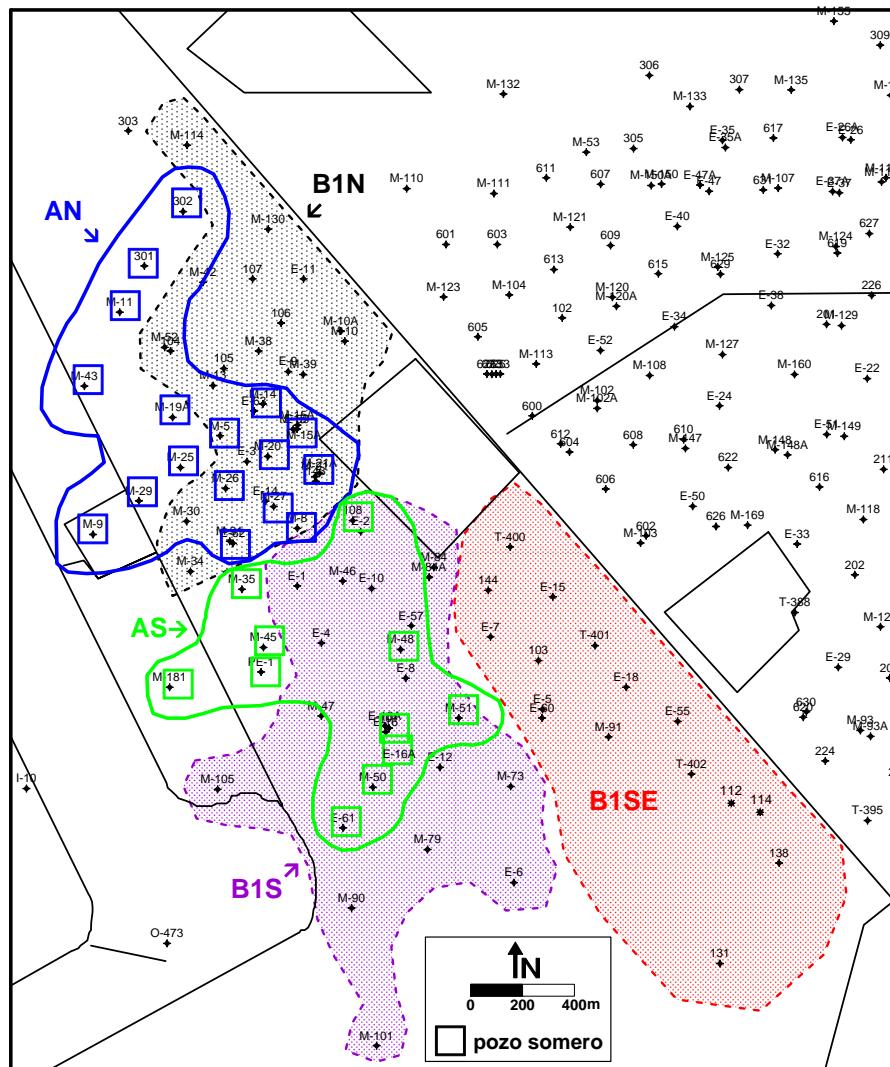


Figura 3. Zonas en las que se dividió el sector de CP1.

La relación de la producción total de vapor con el número de pozos en operación de CP-I, se muestra en la Figura 5, en donde se puede observar que el resultado de un incremento en el número de pozos en operación, es un incremento en la producción de vapor. En la figura se indican las zonas que incrementaron su aportación en los incrementos de la producción de vapor. También se puede observar que después de un incremento en la producción, se presentaron períodos de una fuerte declinación, como se indica en los ajustes lineales, en los cuales se tomaron períodos de al menos 3 años que representan 36 datos mensuales. Por ejemplo el ajuste de 1979 a 1981 la declinación fue 133 t/h/año, de 1982 a 1985 de 123 t/h/año, de 1986 a 1989 de 113 t/h/año y de 1995 a 1999 de 155 t/h/año.

Hasta antes de 1995, el número de pozos en operación se fue incrementando, aunque con algunos altibajos, alcanzando 45 pozos en ese año. Sin embargo, conforme se fueron perforando pozos en CP-I se fueron agotando las áreas disponibles para localizar pozos, lo cual, aunado a la pérdida del potencial del yacimiento de CP-I para producir vapor, el número de pozos se fue reduciendo, lo cual contribuyó para la fuerte declinación en el segundo lustro del 90, en donde la producción cayó de 1500 t/h a 750 t/h. Con una menor producción de vapor, el abatimiento productivo también disminuyó, alcanzando en

el primer lustro de este siglo 52 t/h/año, presentando en el último periodo ajustado una declinación del 9.2 % anual. La producción reportada en julio de 2008 fue de 300 t/h, que representa una quinta parte de lo reportado al final de 1994.

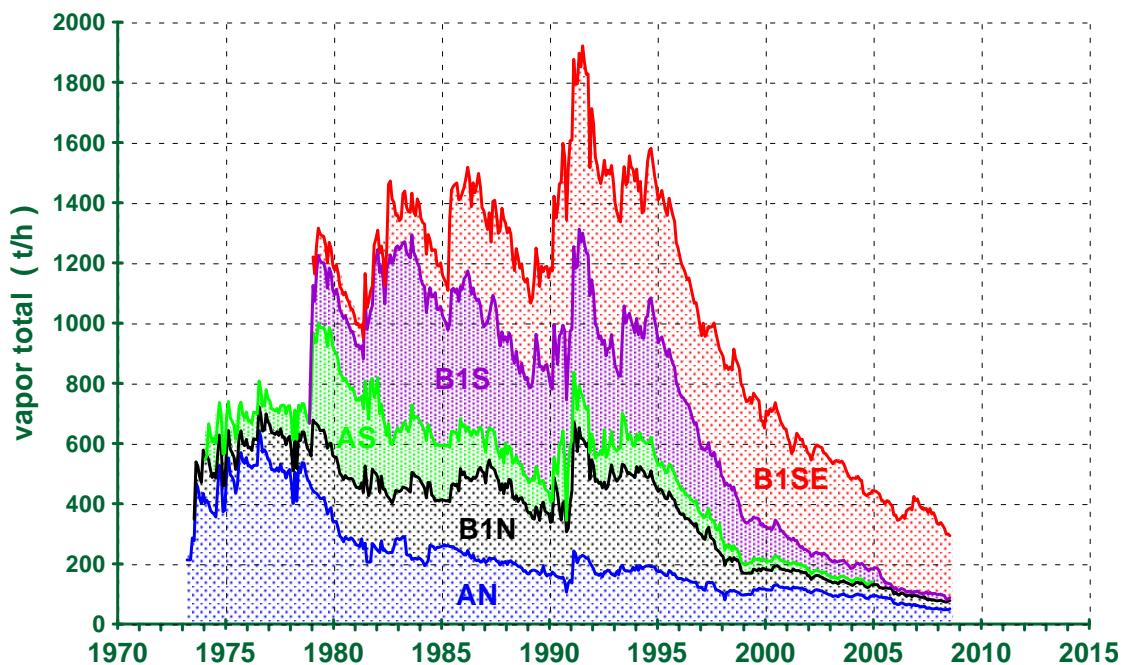


Figura 4. Proporción de vapor aportado por cada una de las 5 zonas del sector CP1.

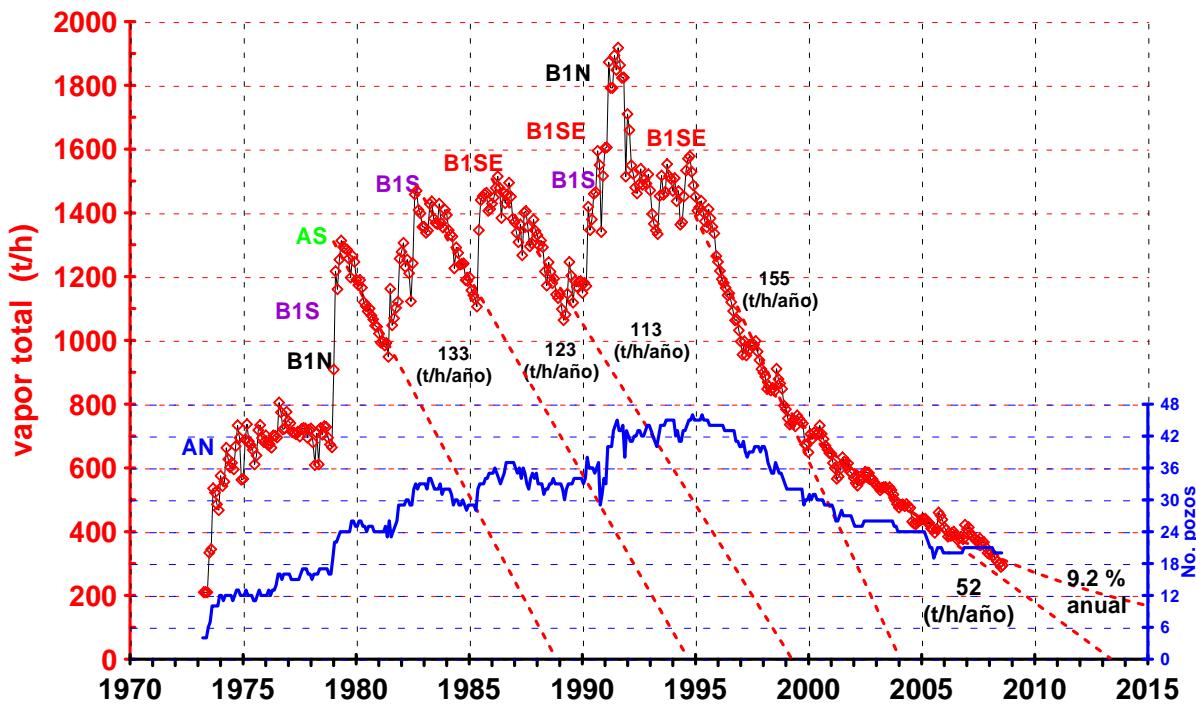


Figura 5. Historia de la producción de vapor (rojo) y pozos en operación (azul) en CP1

La historia del vapor promedio por pozo (VPP) para las zonas AN, B1N y B1SE se muestran en la Figura 6. Se omiten las zonas AS por no tener ningun pozo en producción y la B1S, por tener un solo pozo en producción. El VPP de la zona B1N era mayor al de la zona AN hasta antes de 1995, sin embargo, para los años posteriores y debido a una mayor declinación anual de la zona B1N de 13.6 % respecto al 2.5 % de la zona AN, el VPP de la zona AN fue mayor que el de la zona B1N. En relación al VPP de la zona B1SE, hasta antes de 1993 se observaron valores mayores 60 t/h, aunque con altibajos, no se lograva definir una declinación general, sin embargo, apartir de ese año, se definió un claro abatimiento de 6.5 %, el cual continua hasta el 2008, alcanzando valores del VPP por debajo de las 20 t/h.

La historia de la entalpía de la mezcla promedio ponderada (EMPP) de las 3 zonas analizadas, se muestran en la Figura 7, en donde se puede observar un comportamiento similar al del VPP de la Figura 6, con algunas variantes. La EMPP de la zona B1N era mayor que en AN hasta antes de 1997, sin embargo, por la mayor declinación de la entalpía en la zona B1N de 1.81 % anual respecto a la presentada en AN de 0.52 %, desde el 2000 la EMPP de la zona AN es mayor que en la B1N. La EMPP de la zona B1SE ha evolucionado con diversas tendencias, por ejemplo de 1980 a 1988, se incrementó de 1400 kJ/kg a 1800 kJ/kg, sin embargo en los años siguientes y hasta el año 2000, se ha presentado una declinación bien definida de 1.86 % anual, ya que de 1992 al 2008 la EMPP bajó de 1700 kJ/kg a 1250 kJ/kg, lo cual equivale a una reducción del 50 % en la fracción del vapor de la mezcla producida.

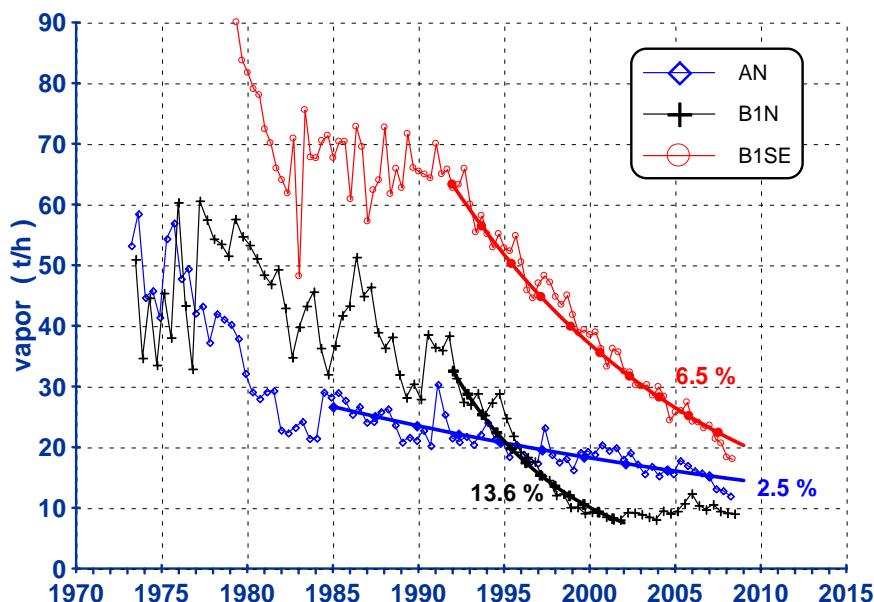


Figura 6. Historia del vapor promedio por pozo para las zonas AN, B1N y B1SE.

4. Evolución química e isotópica

La declinación de la producción de vapor presentada en la sección anterior, puede explicarse principalmente por el abatimiento de la entalpía del fluido en el yacimiento, y 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 de la composición isotópica del Oxígeno-18, la concentración de cloruros a condiciones del yacimiento y la temperatura de NaKCa.

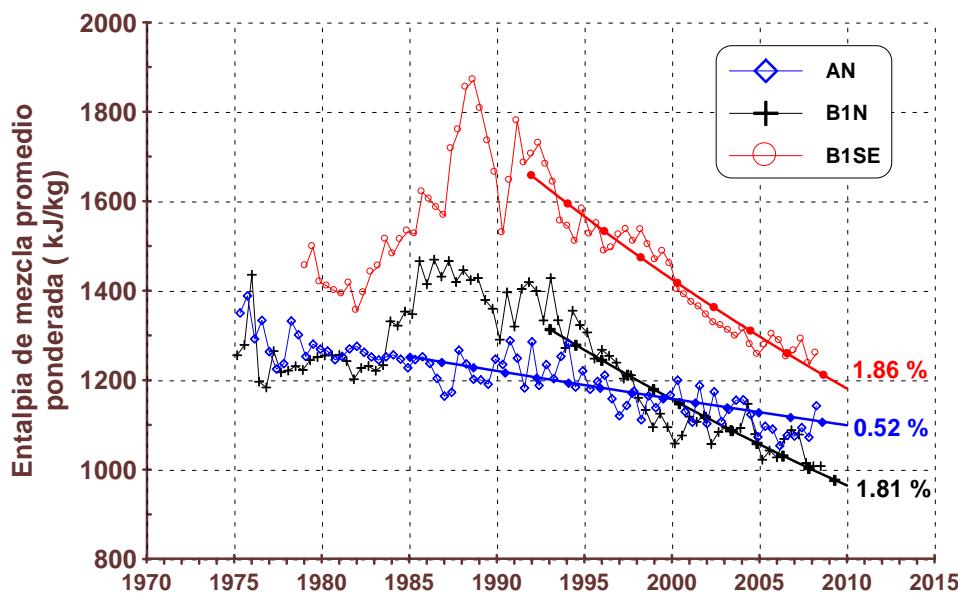


Figura 7. Historia de la entalpía de mezcla ponderada para las zonas AN, BIN y B1SE.

Para mostrar la evolución del contenido isotópico del Oxígeno-18 a descarga total del sector CP-I, se presenta en la Figura 8, contornos de su distribución para los años 1982, 1985 y 1989, en donde se puede observar una progresiva presencia de aguas ligeras isotópicamente 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 esta en el rango de -9.5 a -7.5 ‰ (color morado). Los datos mostrados fueron entregados personalmente por A. Truesdell, en una visita al Campo de Cerro Prieto, en el año de 1998.

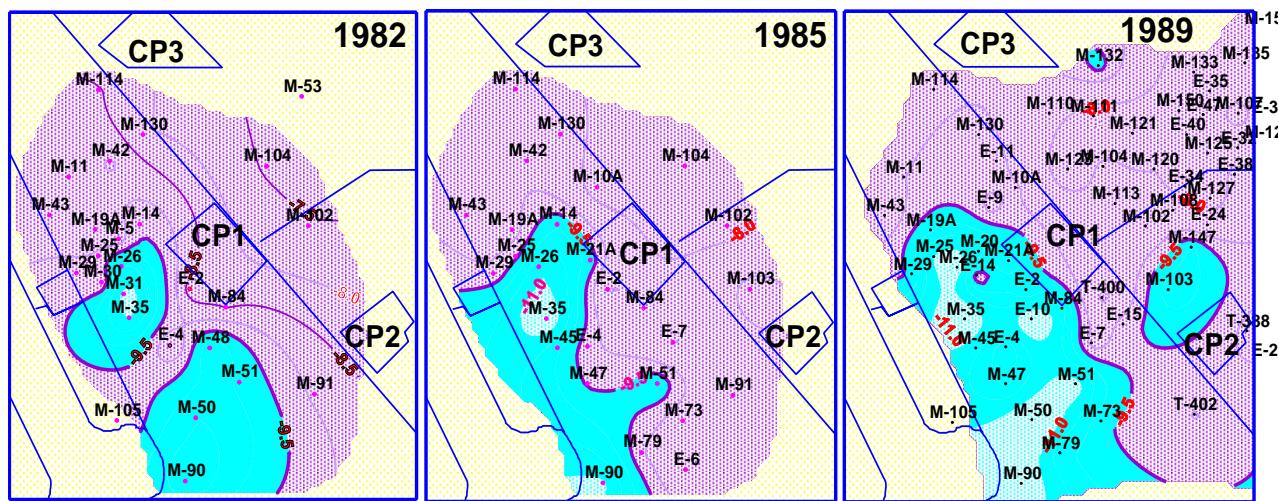


Figura 8. Distribución del oxígeno-18 ‰ SMOW, para los años 1982, 1985 y 1989.

La concentración de cloruros del agua producida para los mismos años, es presentada en la Figura 9, en donde se puede observar que en 1982, las altas concentraciones, mayores a 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 Cl fue más estable, manteniéndose en todo ese tiempo con valores cercanos a las 8,000 ppm.

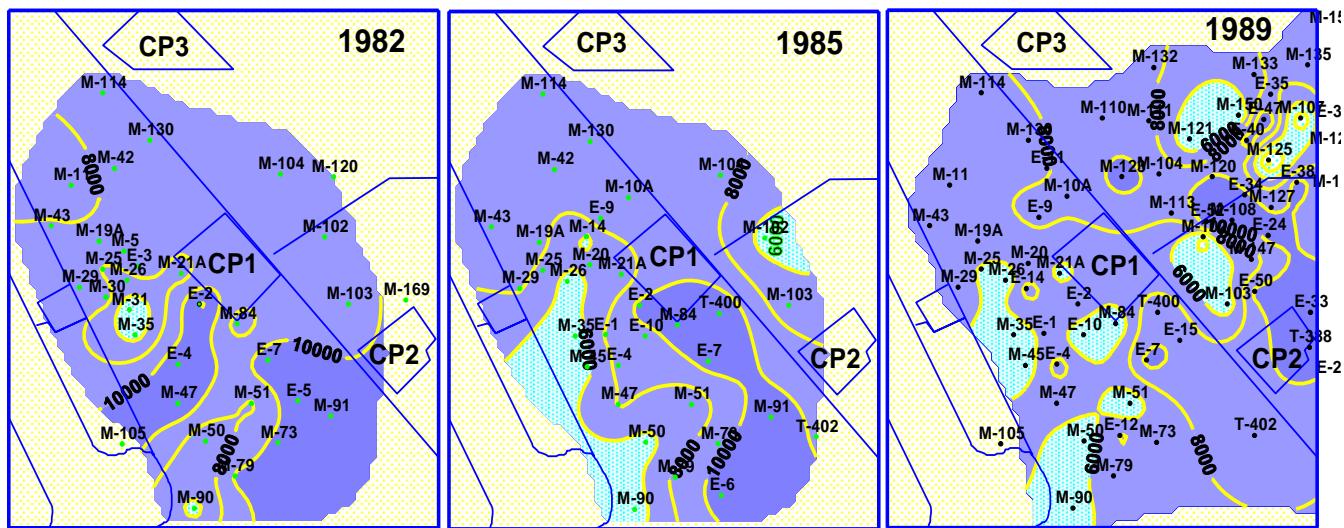


Figura 9. Distribución del cloruro en el yacimiento (ppm), para los años 1982, 1985 y 1989.

Tanto la evolución isotópica del Oxígeno-18 como la de los cloruros presentada en las figuras 8 y 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 de aguas.

La evolución de la temperatura del geotermómetro de NaKCa para los mismos años analizados, es presentada en la Figura 10, en donde se puede observar que los fluidos de menor temperatura son producidos por los pozos del norte. Por ejemplo en 1982, la mayoría de los pozos en la zona norte presentaron temperaturas entre 260 y 280° C, mientras que en el sur las temperaturas que predominaron 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 manteniendo las menores temperaturas en la zona norte respecto a las de la parte centro y sur de CP-I.

5. Variación de la temperatura con registros de fondo

Con el 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 de registros de fondo de 8 pozos, localizados 3 en la zona centro norte (E-9, E-63 y 143) y 5 pozos en la zona centro sur (M-84, M-84A, E-57, M-48 y 144), como se muestra en la Figura 11. En la Figura 12, se muestran registros de temperatura de los pozos E-9, E-63 y 143, así como el intervalo productor. El pozo E-9 fue perforado en 1984 y los registros corridos con el pozo etático (sin fluir) en 1984, presentaron 310 °C en el intervalo de 1300 a 1700 m (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 es reparado en 1994, dejando

un intervalo productor más profundo, sin embargo la temperatura alcanzada a profundidades mayores a 1 600 m, fue de 260 °C, según registro 4A, mientras que de los 1200 a 1500 m, la temperatura fue de 300 °C. La baja temperatura registrada por debajo de los 1600 m, se confirma con el registro 5A, corrido cuando el pozo fluyó.

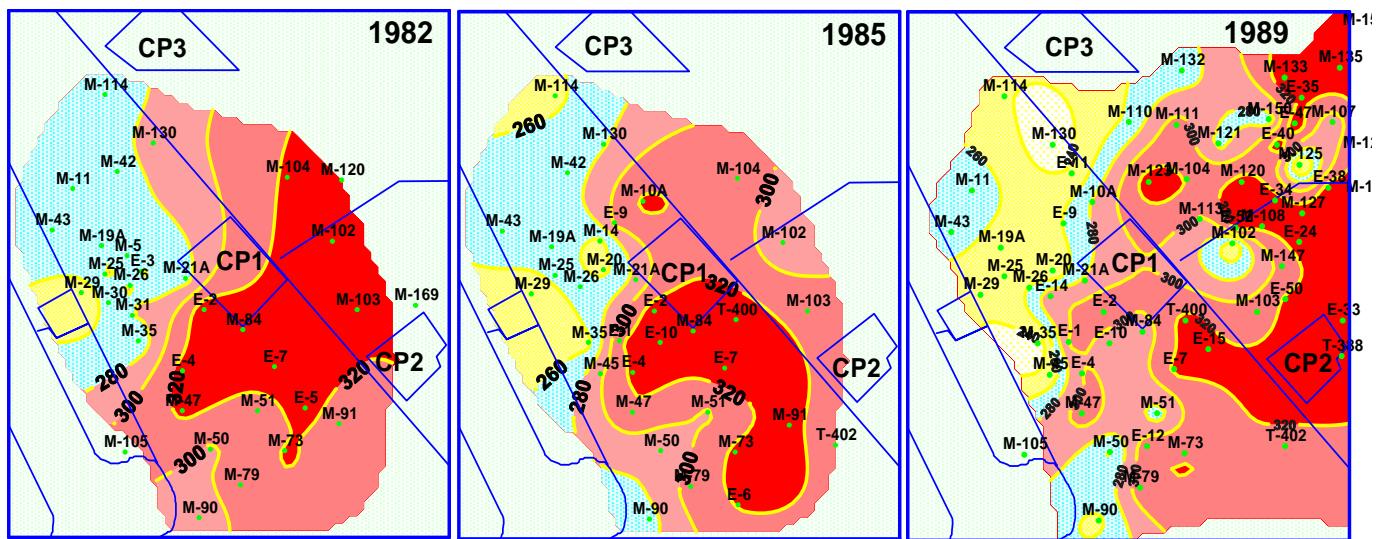


Figura 10. Distribución de la $T\text{-NaKCa}$ ($^{\circ}\text{C}$), para los años 1982, 1985 y 1989.

El pozo E-63 se perforó en 1989 alcanzando 300° C según el registro estático 1B, en el intervalo de 1300 a 1600m. La temperatura de 300° C se confirma con el registro 2B, fluyendo el pozo. En 1997 el pozo es profundizado, alcanzando los mismos 300° C en el intervalo mencionado, sin embargo, a la profundidad de 1650 m, se registraron 250° C, como lo muestra el registro 3B y lo confirma el registro fluyendo 4B.

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 alcanzan una temperatura entre 280 y 300° C en el intervalo de 1550 a 1750 m, sin embargo por debajo de los 1800 m y hasta los 2150 m, la temperatura disminuye a 220° C, aunque se incrementa por arriba de los 250° C a los 2195 m, sin embargo cuando el pozo fluye, no se tiene aportación de fluido del fondo, como se interpreta con el registro fluyendo 3C.

De los tres pozos analizados, pertenecientes todos a la zona B1N, por su localización y profundidad, podemos afirmar que debido a la recarga inducida por la explotación, se ha presentado un mayor enfriamiento en los estratos profundos B1N, que en los estratos someros AN.

Para los pozos localizados hacia el centro sur de CP-I, en la Figura 13 se muestran registros de los pozos vecinos M-48 y E-57. El pozo M-48 quedó terminado en la zona AS y los registros 1A y 2A corridos sin fluir y fluyendo respectivamente, se observa que las temperaturas a profundidades de 1100 a 1200 m sobrepasaban los 300°C, a finales de los 70's. El pozo E-57 perforado en 1989, a escasos 100 m del M-48, pero a 2000 m de profundidad, en la zona B1S, registro temperaturas de 200 °C en el intervalo de 1200 a 1300 m y en el intervalo de 1600 a 1900 m, 260 °C.

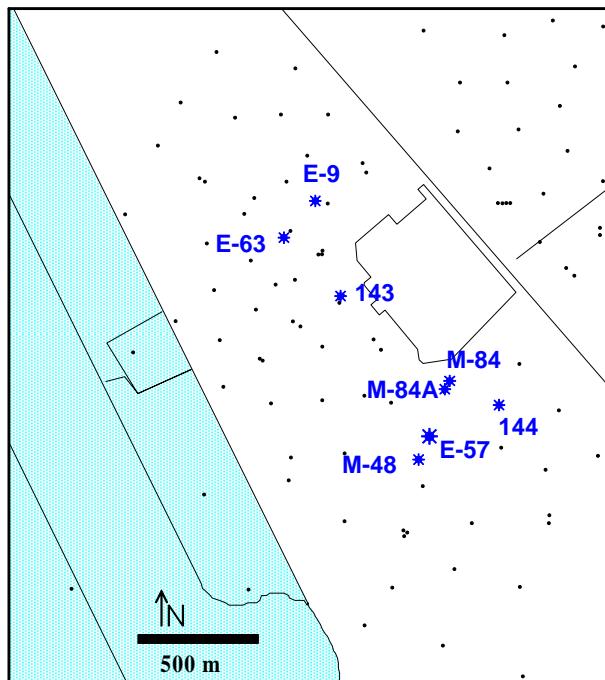


Figura 11. Localización de los pozos con registros de temperatura analizados.

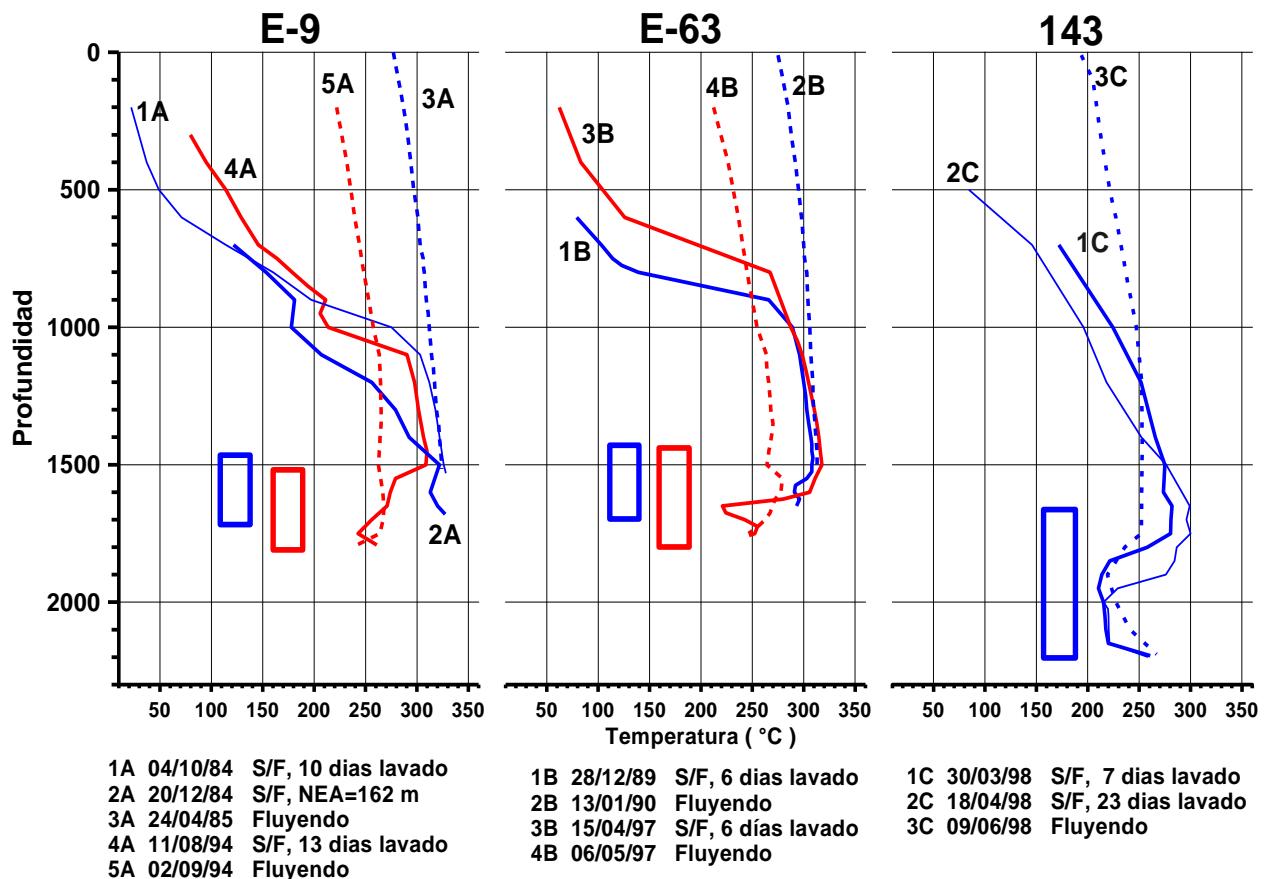
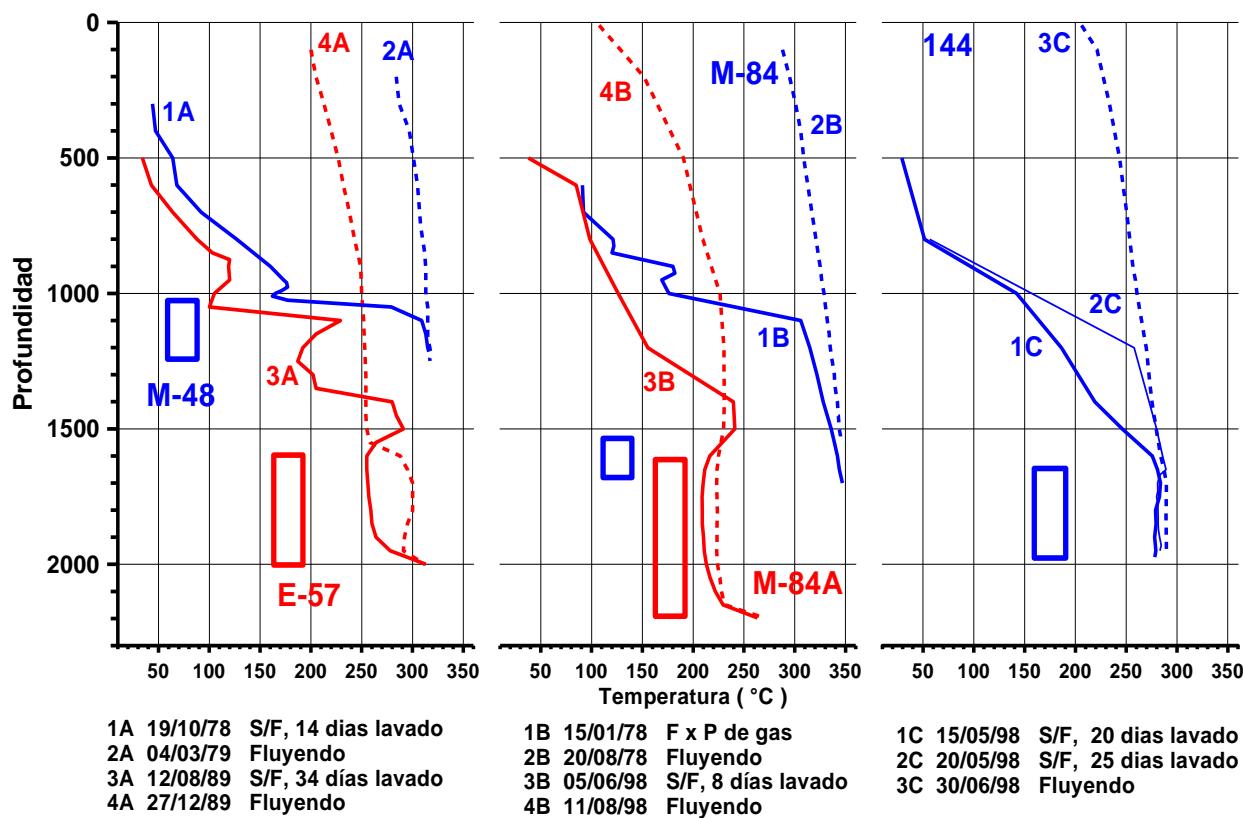


Figura 12. Perfiles de temperatura de los pozos E-9, E-63 y 143.



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

El pozo M-84 se presenta en la Figura 13 los registros 1B estático y 2B fluyendo, en los cuales se alcanzó 340 °C por debajo de los 1500 m de profundidad. Por la localización del pozo y por tener una profundidad total de 1696 m, se consideró en la zona B1S, aunque bien pudo haber quedado en la zona AS. El pozo gemelo M-84A, perforado en 1998 a una profundidad de 2195 m, a escasos 40 m del M-84, alcanzó una temperatura de 220 °C en el intervalo de 1600 a 2100 m, como se puede observar en los registros 3B estático y 4B fluyendo, aunque la temperatura se incrementó a 260 °C a profundidades mayores de los 2150 m. Sin embargo, el pozo no produjo de esos estratos, como se puede interpretar por el registro 4B fluyendo. Debido a que el pozo no alcanzó una presión de cabezal mayor a la del separador primario, éste nunca se integró.

Finalmente en la Figura 13 se muestran registros del pozo 144, perforado también en 1998 y a escasos 230 m del pozo M-84A. Los registros 1C y 2C fueron corridos con el pozo estático, en los cuales se alcanzaron más de 280 °C a profundidades mayores a 1600 m. El registro con pozo fluyendo 3C, alcanzó cerca de los 290 °C, en el intervalo productor de 1630 a 1970 m. Por la localización y terminación del pozo, este quedó en la zona B1SE.

De la evolución de temperatura presentado en estos 5 pozos, del centro sur del sector CP1, se puede afirmar que el mayor enfriamiento provocado por la explotación se ha presentado a profundidades de la zona AS, aunque a profundidad, en la zona B1S, el enfriamiento también ha sido significativo pero

no como en la parte somera. Así mismo, la zona B1SE, es la que presenta el menor enfriamiento respecto a lo observado en las dos zonas anteriores.

6. Evolución de la presión

Para ilustrar como ha evolucionado la presión en las diferentes zonas de CP-I, se muestra la evolución de los niveles espejo de agua (NEA) en pozos de observación. Se incluyen pozos terminados en las 5 zonas definidas 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 de AN. El pozo E-14 queda terminado en la zona B1N. Los pozos 101 y M-48 quedan terminados en la zona AS y los pozos E-8 y M-84A en la zona B1S. Los pozos M-91, 131, 138, 112 y 114 quedan terminados en la zona B1SE.

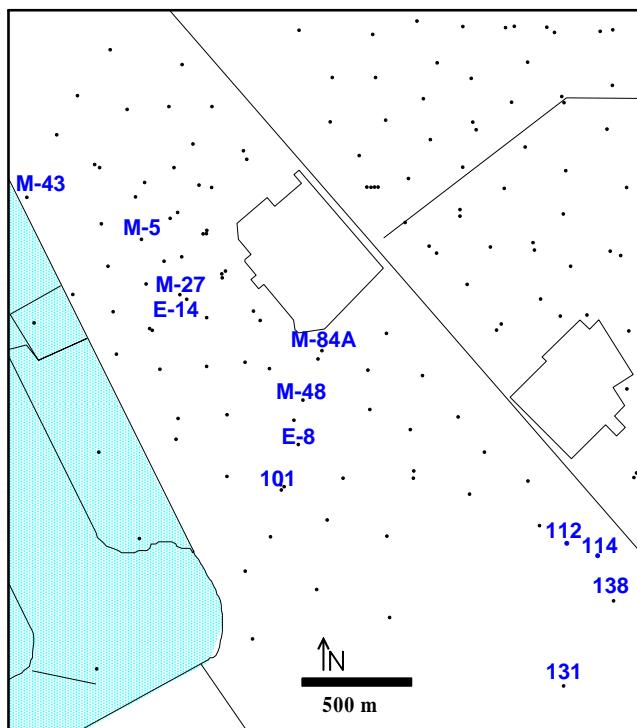


Figura 14. Localización de los pozos que se analiza su historia del NEA.

La historia del NEA para los pozos mencionados, se muestra en la Figura 15, en la cual se puede observar que el pozo M-43, localizado más al norte tiene el NEA más somero, a 170 m medidos en el 2008. Los pozos M-5 y M-27 pertenecientes también a la zona AN, cuentan con una mayor historia del NEA. En estos pozos el NEA medido en 1984 era de 100 m, presentando una gradual declinación hasta alcanzar los 250 m en 1998, posteriormente se estabiliza a esta profundidad, como lo muestra la medición de 2008. Sin embargo, el pozo profundo E-14 de la zona B1N, vecino al pozo somero M-27, presenta un historial del NEA más profundo que el de los pozos someros, ya que el NEA varió de 200 m medidos en 1992 a 400 m medidos en el 2008.

Los pozos someros del sur M-48 y 101, muestran que la evolución del NEA es mayor la presentada en las zonas del norte, AN y B1N, alcanzando en el 2008 450 m, en el pozo 101. El pozo E-8 de la zona B1S, localizado entre el M-48 y 101, ha presentado una mayor declinación que los pozos

mencionados, ya que de 150 m medidos en 1985, bajó a 550 m en el 2008. Para confirmar que el nivel en la zona B1S es profundo, se incluye el historial del pozo M-84A, aunque algo errático el NEA, confirma que el nivel en la zona se localiza por debajo de los 600 m en el 2008.

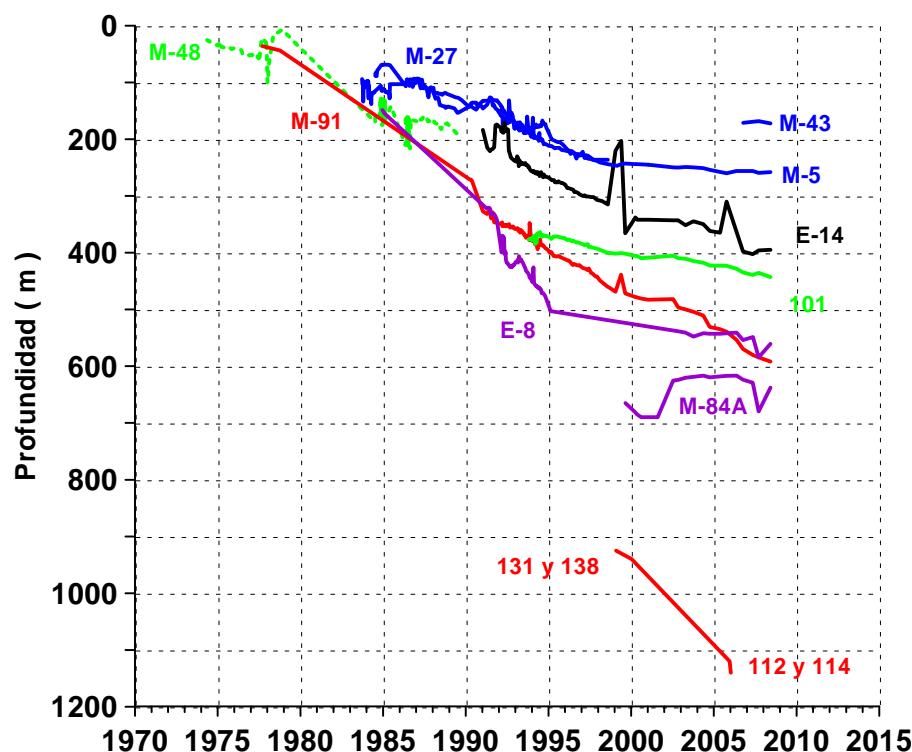


Figura 15. Historia del NEA en pozos seleccionados de CP-I.

Otro pozo con un gran historial es el M-91, localizado en la zona B1SE, quien tenía un NEA de 50 m en 1978, pero fue bajando hasta los 595 m en el 2008. Para confirmar que el nivel en la zona B1SE es el más profundo, se incluyen las mediciones del NEA de los pozos 131, 138, 112 y 114, localizados en la misma zona pero al sur, como se puede observar en la Figura 14. El NEA medido en 1999, después de perforarse los pozos 131 y 138, fue de 925 m, y en los pozos 112 y 114, terminados de perforar a finales del 2005 y principios del 2006 respectivamente, el nivel medido fue de más de 1100 m.

7. Resultados

Con las características mostradas en las secciones anteriores, se procederá con un resumen de cada zona, para evaluar la que pueda resultar de mayor interés para desarrollar un proyecto de aprovechamiento del recurso utilizando unidades de ciclo binario.

Zona AN: Es una zona relativamente estable, hidráulicamente cuenta con abundante recarga lateral del oeste, según la isotopía y química. La recarga puede provenir del denominado acuífero sigma (Rodríguez *et al.*, 2000), la cual presenta relativa buena temperatura, permitiendo que la declinación de la entalpía y de la producción de vapor, sean de las menores del sector CP-I. Es en esta zona donde se han localizado los pozos productores más longevos, como el M-19A (Rodríguez y Romero, 2004). Esta zona 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 lo ocurre en otras zonas de CP-I, como se verá más adelante.

Zona AS: Es una zona que presentó una fuerte declinación. Actualmente no se tiene ningún pozo productor ya que la declinación de la temperatura, hasta de 100° C en algunas partes, y la caída de la presión, no pueden garantizar producciones rentables. Esta zona presenta infiltraciones de aguas someras que se caracterizan por su relativa baja temperatura. Esta zona hidráulicamente está conectada con las zonas productoras profundas como la B1S y las zonas de extensa explotación por el este, como lo es la zona B1SE y CP2, lo cual ha inducido una mayor recarga de baja temperatura, que provoca fuertes enfriamientos como los mencionados. A pesar de contar con un enorme recarga, se tiene una 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 conectado hidráulicamente con zonas de gran explotación como lo es la zona de CP3, se ha inducido una recarga de aguas de menor temperatura provenientes del oeste, que al pasar por la zona B1N le han provocado un enfriamiento significativo, lo que resultó en una alta declinación de la entalpía y de la producción de vapor. A pesar de la enorme recarga que recibe, se tiene una mayor caída de la presión que la presentada en la zona somera AN.

Zona B1S: La zona es recargada con agua de temperatura substancialmente menor. Al estar conectada hidráulicamente con zonas de mayor explotación, como lo es la zona B1SE y CP-II, se ha inducido una mayor recarga de agua fría, lo cual ha provocado una fuerte declinación de la entalpía y de la producción de vapor. A pesar de la enorme recarga que recibe la zona, se presenta una fuerte caída de presión. Desde el 2000 solo se ha mantenido con un pozo en producción, ya que el resto de los pozos de la zona han ido muriendo sin haber sido reparados o reemplazados.

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 de CP-II, anexa hacia el este de esta zona, lo cual ha provocado un enorme abatimiento de la entalpía, la producción de vapor y la presión del yacimiento. A pesar de esta situación, esta zona es la que en los últimos años aporta más del 60 % del vapor producido en CP-I, de hecho hasta mediados del año 2008, aún se mantenían en producción 12 pozos.

8. Discusión

La zona de mayor interés para que pudiera ser utilizada con unidades de ciclo binario es la zona AN. Aunque esta es la zona de mayor tiempo en explotación y la que inicialmente presentó las condiciones de presión y temperaturas más bajas, es la que actualmente presenta incluso mayor temperatura que algunas otras zonas de CP-I, debido a que esta zona presentó una menor declinación de la entalpía, presión y de la producción de vapor. Sin embargo, es necesario señalar cuáles son las ventajas y desventajas para su aprovechamiento.

Ventajas de la zona AN:

- Es la zona más somera respecto a las otras 4 zonas de CP-I y de todo el campo, por lo que los pozos requeridos para su explotación deberán ser más económicos.

- Es la zona que ha presentado la menor declinación de la entalpía, presión y producción de vapor.
- Es la zona que actualmente cuenta con mayor presión y temperatura que las zonas AS, B1N y B1S.
- Tomendo en cuenta que la temperatura promedio actual de la zona es de 200 °C y que la mínima requerida para el ciclo binario es de 130 °C, se dispone de un amplio margen para asegurar que se tendrá recurso energético suficiente por al menos 30 años como vida útil del proyecto.

Desventajas de la zona AN:

- Es posible que al entrar a un ritmo mayor de explotación, se induzca recarga de aguas fría substancialmente mayor a lo observado, provocando un enfriamiento prematuro.
- Es posible que se presenten problemas de incrustación.
- Es posible que al disminuir la presión y temperatura, 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, iniciada en 1973, el yacimiento ha experimentado una invasión de aguas de menor temperatura por el oeste, identificadas desde el inicio de la explotación. Como consecuencia, la temperatura y presión del yacimiento han disminuido provocando una fuerte declinación de la entalpía y de la producción de vapor. El número de pozos productores ha disminuido considerablemente en CP-I, abandonando algunas zonas a la explotación.

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 profundidades del intervalo productor, presión, temperatura y ritmos de declinación, relacionadas principalmente por las características de la recarga recibida.

La zona de mayor interés es la zona AN, aunque al inicio de la explotación no fue la de mayor presión y temperatura, sin embargo, debido a su mayor estabilidad productiva respecto a las otras cuatro zonas, esta aún conserva condiciones que pueden ser utilizadas con unidades de ciclo binario.

Referencias

Grant, M.A., A.H. Truesdell, A.H., 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., y M.H. Rodríguez-R. (2000). Development history of Cerro Prieto (1973-2000). *Geothermal Resource Council Trans.* 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. *Proceedings 25th Geothermal Reservoir Workshop*, Stanford, California, pp. 388-397.

Rodríguez, M.H., y Francisco Romero Ríos (2006). Análisis de la evolución productiva del pozo M-19A del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Memorias del Congreso Anual 2006 de la Asociación Geotérmica Mexicana*, Mexicali, BC.

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, 1st Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California*, México, pp. 130- 138.