

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICIÓN 2018



TEMA:
EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DEL CAMPO GEOTÉRMICO
SAN JACINTO TIZATE, NICARAGUA.

PRESENTAN:
Eduardo Benjamín Echeverría Serrano
Gunter Ezequiel Gámez Altamirano

ASESOR:
Ing. Noel López

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2018.

Contenido

1. Resumen	4
2. Introducción	5
3. Planteamiento del problema	6
4. Justificación del estudio	7
5. Objetivos.....	7
5.1 Objetivo General.....	7
5.2 Objetivos Específicos	7
6. Marco teórico.....	8
6.1 Marco Geológico	8
6.2 Marco Geoquímico	10
6.2.1 Diagrama Triangular de Giggenbach NaKCa.....	10
6.2.2 Diagrama de Entalpía	11
6.2.3 Diagrama de Gases FT & HSH.....	13
6.2.4 Diagrama Isótopos de fluidos en el reservorio	14
6.2.5 Diagrama Triangular de Giggenbach N ₂ -He-Ar	16
6.2.6 Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio.....	17
6.2.7 Diagrama Cloruro & Entalpía	19
7. Metodología.....	20
7.1 Colección de data geoquímica.....	20
7.2 Procesamiento de data geoquímica.....	20
7.2.1 Selección de muestras	20
7.2.2 Realización de diagramas geoquímicos por pozo	20
7.2.3 Evaluación geoquímica integrada	21
8. Análisis de datos.....	22
9. Presentación de resultados	22
9.1 Evaluación de la evolución geoquímica de pozos.....	23
9.2 Evaluación integrada de pozos	42
10. Conclusiones	47
11. Agradecimientos	48
12. Referencias bibliográficas	49
13. Apéndices.....	50

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo geotérmico San Jacinto Tizate (Prado & Revilla, 2014).....	6
Figura 2. Mapa de unidades geológicas en el Campo San Jacinto Tizate, Nicaragua.....	9
Figura 3. Láminas delgadas del cuerpo intrusivo diorítico.....	9
Figura 4. Contenidos relativos de Na, K, Mg en aguas geotérmicas. Evaluación de las temperaturas de equilibrio de las rocas del agua (GIGGENBACH, 1984).....	11
Figura 5. Diagrama de rejilla FT versus HSH de parámetros químicos para valores seleccionados de temperatura y vapor (D'AMORE, 1991).....	14
Figura 6. Técnicas de isótopos en estudios geotérmicos, un ejemplo de mezcla entre agua meteórica local y agua juvenil en diferentes proporciones (D'AMORE, 1991).....	16
Figura 7. Contenidos relativos de N ₂ , He y Ar en descargas de gases geotérmicos en base molar (volumen) (D'AMORE, 1991).....	17
Figura 8. Diagrama de actividad para las fases principales del sistema CaO - Al ₂ O ₃ - K ₂ O-H ₂ O a 250°C (Truesdell, Lippmann, Quijano, & D'Amore, 1995).....	18
Figura 9. Diagrama de mezcla típico de entalpía-cloruro (Truesdell et al, 1984).....	19
Figura 10. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ4-1	24
Figura 11. Gases FT & HSH del SJ4-1	24
Figura 12. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ5-1	25
Figura 13. Gases FT & HSH del SJ4-1	26
Figura 14. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-1	27
Figura 15. Diagrama de Bicarbonato	27
Figura 16. Gases FT & HSH del SJ6-1	28
Figura 17. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-2	29
Figura 18. Gases FT & HSH del SJ6-2	29
Figura 19. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-3	30
Figura 20. Gases FT & HSH del SJ6-3	31
Figura 21. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-1	32
Figura 22. Gases FT & HSH del SJ9-1	32
Figura 23. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-3	33
Figura 24. Gases FT & HSH del SJ9-1	34
Figura 25. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-4	35
Figura 26. Gases FT & HSH del SJ9-4	35
Figura 27. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-2	36
Figura 28. Gases FT & HSH del SJ12-2	37
Figura 29. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-3	38
Figura 30. Gases FT & HSH del SJ12-3	38
Figura 31. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-4	39
Figura 32. Gases FT & HSH del SJ12-4	40
Figura 33. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-5	41
Figura 34. Gases FT & HSH del SJ12-5	41
Figura 35. Diagrama de isótopos y Entalpía & cloruros.....	42
Figura 36. Diagrama triangular de Giggenbach N ₂ -He-Ar	43
Figura 37. Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio.....	44
Figura 38. Zonificación geoquímica del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate.....	45

1. Resumen

El Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua, está ubicado en la zona occidental a 75 kilómetros al Norte de la capital con una extensión de 6 kilómetros, el cual cuenta con una capacidad instalada de 77 MW. El reservorio del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate es de líquido dominante con temperaturas en el rango de 227-291°C determinado a través de registros profundos.

Este aprovechamiento del recurso geotérmico conlleva cambios químicos en el reservorio y por ende un cambio en el manejo del campo, por lo que resulta importante la caracterización e interpretación de la evolución geoquímica que presenta el campo. Para tal estudio, se cuenta con data geoquímica procedente del área de ingeniería de reservorios la cual lleva el control y procesamiento de los resultados de los análisis del monitoreo. Las muestras fueron seleccionadas considerando un valor por semestre, realizando un promedio por cada seis meses, la cual es utilizada para el procesamiento de la evaluación geoquímica. En este trabajo se presenta la evaluación en base a métodos geoquímicos para análisis y comprensión de manera confiable los procesos que están presentes en el reservorio a partir de cambios geoquímicos de los fluidos.

En la interpretación individual por pozo, se identificaron pozos que presentan procesos como enfriamiento por ebullición en las cercanías y en algunos casos en las lejanías de las zonas de alimentación de los pozos, debido a la existencia de diferentes características térmicas e hidráulicas en las diferentes zonas del reservorio geotérmico. Se encontraron también pozos que se encuentran en equilibrio respecto al análisis de E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2} , lo que indica que no hay cambios de temperaturas extremos en los alrededores del reservorio y la alimentación del pozo.

Mediante el diagrama de Giggenbach se pueden observar procesos como la sucesión de evaporación al inicio de producción de algunos pozos como explicación al exceso de vapor encontrado en ciertas zonas del campo; con excepción los pozos SJ6-1 y SJ9-1 que presentan una infiltración de aguas con temperaturas bajas.

En el análisis de gases con el Diagrama FT & HSH, se observaron cambios como aumento en la fracción de vapor y disminución en temperatura en los pozos, disminución en la fracción de vapor con un aumento de temperatura, comportamiento constante de la fracción de vapor con aumento de temperatura, etc. los cuales son indicativos de procesos sucedidos a los pozos cuyo reflejo en los gases resultó de suma importancia para la interpretación.

Basados en la interpretación individual por pozo y relacionando con la interpretación integrada de los pozos evaluados a través del uso de diagramas de isótopos, cloruro & entalpía, equilibrio mineral, y diagrama triangular de Giggenbach de N_2 -He-Ar, se determinan tres zonas importantes del reservorio, zona de ascenso de los fluidos calientes comprendida característicos de equilibrio en las entalpías y condiciones cercanas al punto de ebullición; zona de transición que reflejan condiciones de las direcciones de movimiento de los fluidos del reservorio hacia su descarga, y una zona de influencia de agua de menor indicativo de una zona limítrofe del campo explotable.

2. Introducción

El Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua, está ubicado en la zona occidental del país a 75 kilómetros al Norte de la capital, con una extensión de 6 kilómetros.

La producción comenzó en el año 2005 con el pozo SJ4-1 con generación de 5 MW en dos unidades a contra presión. A la fecha se han perforados 12 pozos productores y 6 pozos reinyectores; de los cuales 12 pozos con caracterización de líquido dominante y 1 pozo vapor dominante, se cuenta con dos unidades a condensación, con capacidad instalada de 77 MW.

El modelo conceptual geotérmico San Jacinto – Tizate, es mostrado en la Figura 1, en donde se representan los elementos principales del sistema geotérmico. El campo está ubicado en el flanco occidental del complejo volcánico San Jacinto y Santa Clara, la fuente de calor del sistema geotérmico proviene de un intrusivo de origen magmático, el sistema se centra en la zona del Tizate donde el modelo indica que se encuentra la zona de ascenso de fluidos. En esta zona se encuentran las fallas principales con dirección NE – SO estas son las fallas productoras del campo que se encuentran delimitadas al oeste por fallas secundarias con dirección E – O y al este el sistema está delimitado por un intrusivo.

La geoquímica es un área de valiosa importancia para el control de los cambios, comportamientos y evoluciones que surgen por diferentes tipos de circunstancias, afectando directamente al reservorio geotérmico, por lo que, el campo geotérmico San Jacinto Tizate cuenta con análisis de parámetros geoquímicos comprendidos desde el año 2005 a la actualidad y realizados periódicamente en 4 muestreos por año, con el propósito de monitorear y conocer las características y cambios ocurridos en cada pozo del campo.

La investigación de este proyecto se realizó por el interés de evaluar el estado geoquímico y los procesos experimentados por los pozos productores líquido dominante del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, haciendo uso de herramientas especiales para el procesamiento de los parámetros en estudio y con ello poder interpretar los resultados obtenidos de acuerdo a diagramas geoquímicos por pozos (Diagrama de Giggenbach, Diagrama de Entalpía y Diagrama de Geotermómetros de gases), y por geoquímica integrada de los pozos en estudio evaluados a través de los siguientes diagramas: isótopos, geotermómetro triangular N₂-He-Ar, actividades equilibrio mineral de fluidos en el reservorio y Cloruro & Entalpía.

Por otra parte, contribuir a la identificación de otros procesos que se puedan predecirse o conocerse, usando los análisis e interpretaciones geoquímicas. Así como también, tener un control y evaluación apropiado del reservorio geotérmico con el fin de mejorar la eficiencia y contribuir a un manejo sostenible del recurso geotérmico.

4. Justificación del estudio

La explotación de los campos geotérmicos tiene como resultado una serie de cambios en las propiedades que caracterizan el reservorio, debido a estos cambios es indispensable saber interpretar dichos cambios en el reservorio, con el uso de las diferentes ramas de la geo ciencia, dentro de estas podemos mencionar: la geología, geoquímica y geofísica.

De lo anterior nace la importancia de tener un reservorio caracterizado para conocer la evolución en el tiempo de acuerdo a los sucesos ocurridos. En esta investigación se hace uso de una de las geociencias esenciales para caracterización como lo es la geoquímica, la cual partiendo de un monitoreo continuo y periódico de los parámetros geoquímicos, se utilizará como base primordial para la evaluación el estado geoquímico y los procesos experimentados por los pozos productores de líquido dominante del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate. Con esta evaluación poder predecir problemas de este ámbito y con ello tomar acciones con la finalidad de tener un aprovechamiento óptimo y una producción sostenible.

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Evaluar el estado geoquímico y los procesos experimentados por los pozos del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate.

5.2 Objetivos Específicos

- ❖ Evaluar los antecedentes geoquímicos del campo geotérmico en estudio.
- ❖ Verificar parámetros químicos característicos de los pozos productores del campo geotérmico.
- ❖ Utilizar herramientas geoquímicas para el procesamiento de datos químicos.
- ❖ Interpretar la evolución química en los pozos productores en el periodo de estudio.
- ❖ Identificar otros procesos que puedan predecirse o conocerse usando los análisis e interpretaciones geoquímicas.

6. Marco teórico

6.1 Marco Geológico

La arquitectura estructural de los campos geotérmicos en áreas volcánicas activas está estrictamente relacionada con la interacción entre la geología del sustrato, el campo de tensión, la dinámica de las cámaras de magma y la historia eruptiva de los volcanes. Las estructuras heredadas, el régimen de estrés regional y las fallas tectónicas activas en el sótano influyen en la ubicación y la geometría de las fuentes de calor (cámaras de magma) y los volcanes que las recubren. Además, la carga gravitacional de los edificios volcánicos, la sobrepresión del fluido cambiante en los depósitos magmáticos y el sistema hidrotermal asociado, vinculados al comportamiento mecánico del sótano, modifican el campo de tensión local y pueden enfocar la deformación, generando fallas volcanotectónicas con geometría variable y cinemática. Finalmente, los contrastes litológicos en la sucesión estratigráfica pueden afectar la geometría de las fracturas y fallas y, también, pueden enfocar la migración hidrotermal de fluidos a lo largo de unidades volcánicas permeables, como capas de tefra mal consolidadas y lavas fracturadas.

La interacción entre los factores mencionados puede dar como resultado un complejo grano estructural que controla la migración de magma y fluidos hidrotermales hacia la superficie. Predecir el posible control estructural sobre la geometría y el comportamiento de los fluidos hidrotermales en el campo geotérmico requiere la reconstrucción de la estructura y el estado de estrés del área, con importantes implicaciones para la exploración y explotación eficiente del potencial geotérmico. Sin embargo, pocas de las características de deformación asociadas con los campos geotérmicos en áreas volcánicas recientes y activas tienen una expresión superficial clara, debido al emplazamiento de grandes volúmenes de sedimentos jóvenes volcánicos, aluviales y lacustres, que suelen ocultar estructuras tectónicas y volcanotectónicas. Por lo tanto, solo la integración de datos de superficie y subsuelo, incluidas las observaciones de campo, las muestras de pozos, los registros de pozos, las imágenes geofísicas, la desgasificación de suelos y el análisis de la deformación activa y la sismicidad, pueden proporcionar suficiente información para representar la arquitectura estructural tridimensional de los reservorios geotérmicos.

El Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate está alojado en un área volcánica compleja activa, donde muchos estratovolcanes alcalinos alineados y centros volcánicos monogenéticos constituyen la cadena montañosa de Los Marrabios, ubicada dentro de la depresión de Nicaragua, a lo largo de un arco paralelo NW-SE fallo de deslizamiento lateral derecho.

El Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate está ubicado entre edificios volcánicos poligénicos cuaternarios estratovolcanes llamados Telica, Santa Clara y Rota, y algunos centros más pequeños, en su mayoría monogenéticos, como las cúpulas andesítico-

riolíticas de San Ignacio. La sucesión volcánica cuaternaria está intercalada por depósitos aluviales y lacustres recientes. Al este del campo geotérmico, algunos afloramientos se han atribuido previamente a una diorita intrusivo (figura 2), cuya aparición limitaría al este la extensión del embalse. Investigaciones de campo detalladas recientes y análisis de secciones delgadas revelaron que el sector al este del campo geotérmico está cubierto por flujos de lava andesítica altamente porfiríticos, sin evidencias de rocas intrusivas en el campo (figura 2). La morfología del área y la ocurrencia de estas lavas en varios afloramientos sugieren que las elevaciones al este-sureste del campo geotérmico componen un solo centro volcánico, parcialmente erosionado.

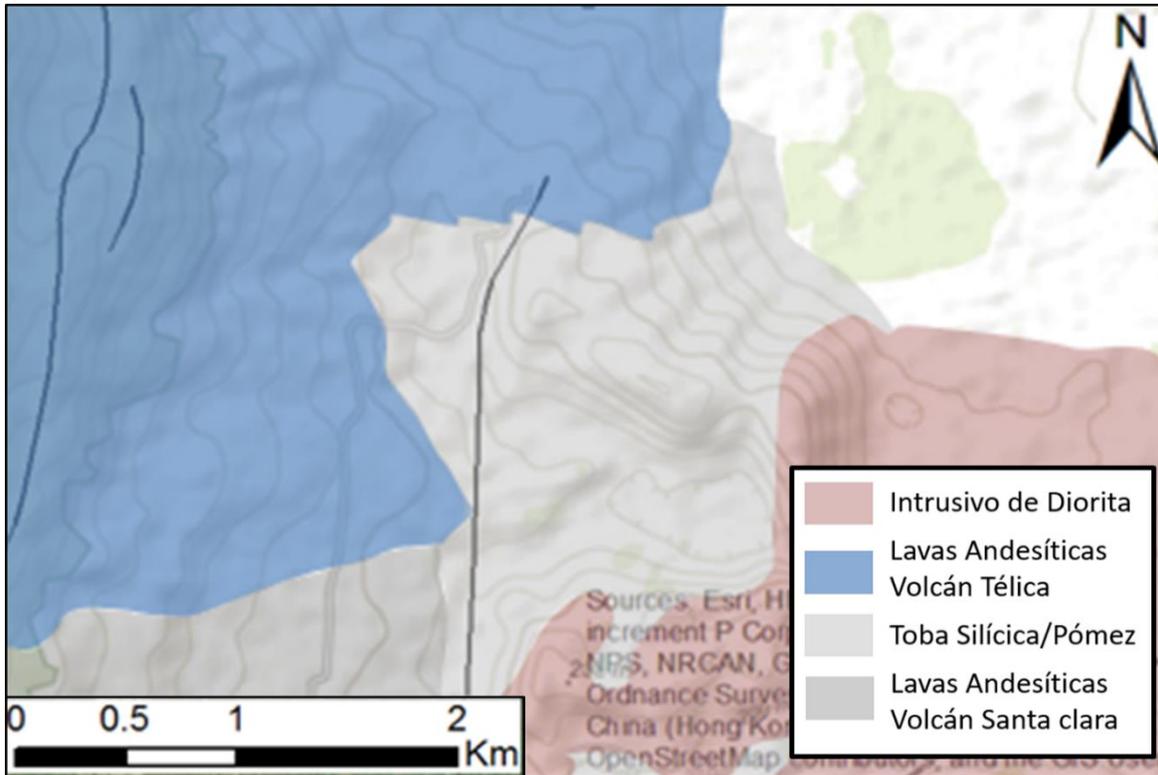


Figura 2. Mapa de unidades geológicas en el Campo San Jacinto Tizate, Nicaragua.

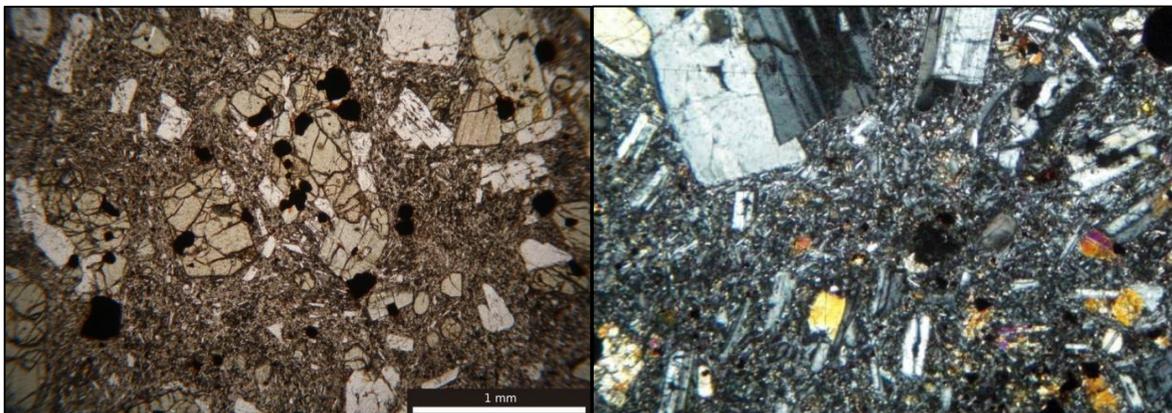


Figura 3. Láminas delgadas del cuerpo intrusivo diorítico.

Estos estudios propusieron varias fallas activas-recientes con diferente geometría y cinemática, que evolucionaron bajo la tensión horizontal máxima de la tendencia N-S regional y generaron una permeabilidad secundaria dentro del reservorio geotérmico (figura 2). Solo algunas de estas fallas se han verificado en el campo, debido a la espesa vegetación y la cubierta del suelo, mientras que la mayoría de ellas se han deducido con registros de pozos, pruebas de rastreo de reservorios e imágenes geofísicas. En muchos casos, la existencia, extensión, geometría 3D y cinemática de estas fallas siguen siendo cuestionables, con una tasa variable de éxito como objetivos para la exploración del reservorio geotérmico.

6.2 Marco Geoquímico

La geoquímica ha venido evolucionando con el tiempo, lo que ha incrementado su importancia en la evaluación y desarrollo de los recursos geotérmicos. Las perforaciones profundas de nuevos pozos productores o reinyectores en la mayoría de los ambientes geotérmicos existentes han proporcionado una gran cantidad de información sobre la composición química, evolución y estructura térmica de los yacimientos geotérmicos. Como parte de la evaluación del estado geoquímico a continuación se presenta los contenidos con los cuales se evaluará e interpretará la evolución de los parámetros geoquímicos del campo geotérmico San Jacinto Tizate, Nicaragua.

6.2.1 Diagrama Triangular de Giggenbach NaKCa

El proceso predominante de alteración de la roca que acompaña al aumento del metasomatismo de potasio en las aguas termales, que a su vez significa el de los cuatro cationes, Na, K, Mg y Ca, ver figura 4. El potasio se elimina de la fase líquida para ser absorbido en productos de alteración potásica, Na, Mg y Ca. Se agregan a la solución a través de la disolución de los minerales correspondientes. El logro del equilibrio de la roca y agua depende en cierto grado de la cinética de las reacciones de disolución y deposición de minerales individuales, pero puede discutirse en una primera aproximación en términos de la tasa general de alteración de la roca, el cual es el proceso que rige la liberación y la captación de componentes de la fase fluida.

En contraste con el estado estacionario, la composición mineralógica del sistema en equilibrio completo corresponde cuando los contenidos Na, K y Mg, y los contenidos de Ca del agua que coexisten con este conjunto en completo equilibrio y a una temperatura, se fijan de forma única y se pueden usar como puntos de referencia para la comparación con las composiciones observadas realmente.

En la dinámica, como en los sistemas geotérmicos, el equilibrio fluido-roca global, rara vez se alcanza y es probable que los fluidos muestreados hayan alcanzado alguna composición compleja en estado estacionario que refleje los efectos combinados de la composición inicial del fluido, la cinética de la disolución mineral primaria y deposición de

minerales secundarios a temperaturas y presiones decrecientes, además de la pérdida de vapor, la dilución y mezcla con fluidos de diferente origen. En medio de todas estas complejidades, el estado de equilibrio, denominado "equilibrio completo" proporciona un sistema de referencia útil para la discusión de las composiciones de líquidos y minerales reales (GIGGENBACH, 1984).

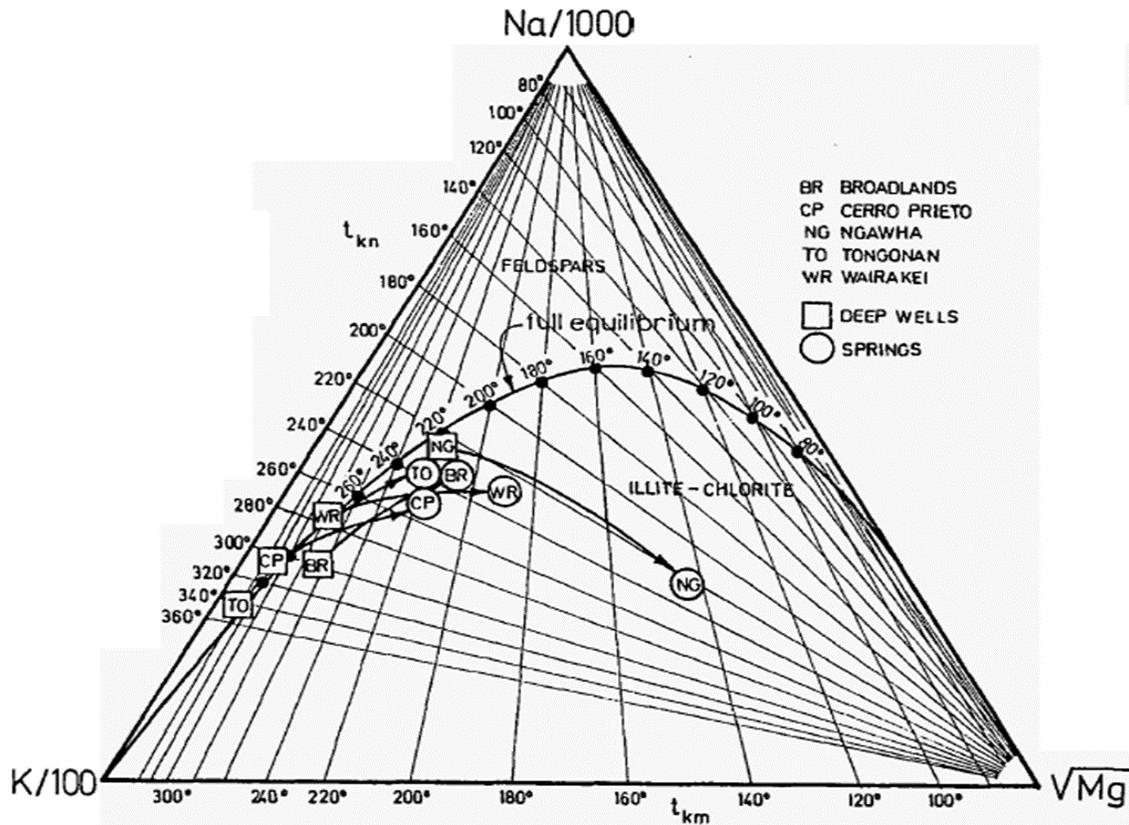


Figura 4. Contenidos relativos de Na, K, Mg en aguas geotérmicas. Evaluación de las temperaturas de equilibrio de las rocas del agua (GIGGENBACH, 1984).

6.2.2 Diagrama de Entalpía

Los cambios característicos de los indicadores geoquímicos con el tiempo proporcionan información de los procesos de reservorio en los pozos en estudio. Los geotermómetros de cuarzo y NaKCa combinados con la entalpía del fluido proporcionan información del estado y de la temperatura del fluido a distancias cercanas y lejanas de los pozos. El cloruro de acuífero proporciona información adicional de procesos de dilución y ebullición. Estos indicadores son más útiles cuando se dispone de una larga historia con muestras de agua recogidas a intervalos frecuentes y analizados al menos Na, K, Ca, Cl y SiO₂. Estos datos son necesarios para la interpretación de procesos.

La abreviación E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2} , están relacionadas a la entalpía medida, entalpía de NaKCa y entalpía de cuarzo.

Criterios de interpretación:

$E_{med} = E_{NaKCa} = E_{SiO_2}$: Indica un líquido de reservorio equilibrado completamente líquido. Las reacciones geotermométricas rápidas y lentas están en equilibrio con la temperatura de entrada. No hay presencia de exceso de vapor y las temperaturas no se han visto afectadas por mezclas.

$E_{med} > E_{NaKCa} > E_{SiO_2}$: Indica ebullición del líquido durante el flujo al pozo respondiendo a una disminución de presión en el fondo del pozo. La ebullición y la temperatura disminuye cerca del pozo y causa la transferencia de calor de las rocas para aumentar los valores de E_{med} . La SiO_2 se equilibra por lo que E_{SiO_2} disminuye. La E_{NaKCa} por la lenta reacción no es afectada.

$E_{med} = E_{NaKCa} > E_{SiO_2}$: Las presiones son controladas por un límite de presión constante, las presiones del fondo del pozo se estabilizan gradualmente y la expansión de la zona de ebullición disminuye lentamente y desaparece. La E_{SiO_2} es baja por que la ebullición y la temperatura disminuye.

$E_{NaKCa} > E_{med} = E_{SiO_2}$: Resulta de una mezcla con agua fría cerca del pozo con re-equilibración de E_{SiO_2} , pero no E_{NaKCa} .

$E_{med} > E_{NaKCa} = E_{SiO_2}$: Indica mezcla de líquido equilibrado con vapor formado por ebullición lejos del pozo.

$E_{NaKCa} > E_{SiO_2} > E_{med}$: Indica mezcla de agua más fría con líquido equilibrado. Los valores más bajos de E_{SiO_2} resulta de la dilución de reequilibrio y E_{NaKCa} no es afectado. Podría ser un pozo con múltiples entradas.

$E_{med} = E_{SiO_2} > E_{NaKCa}$: Indica avance térmico de agua fría E_{NaKCa} aún conserva la memoria de equilibrio a temperaturas más bajas, aunque el líquido se ha calentado por un flujo de roca caliente. Los cambios de cloruros indicaran un avance hidráulico o químico.

$E_{med} \gg E_{NaKCa} \gg E_{SiO_2}$: Es un patrón inusual a lo largo de la descarga de una salmuera muy diluida, indica vapor condensado a alta temperatura, esto ocurre en los casing o separador y posiblemente en conductos de reservorio. La condensación ocurre con entalpía constante y no es producido por enfriamiento del fluido, pero si hay una dilución de la salmuera con vapor condensado el cual disminuye la temperatura de sílice.

Otros casos pueden ocurrir por la combinación de estos procesos; por ejemplo, la ebullición en el reservorio podría ir acompañada de la entrada de agua fría en el pozo.

Algunas de estas combinaciones producen indicaciones ambiguas. La consideración de los cambios en el cloruro de acuífero es valiosa en la interpretación de estos procesos de reservorio (Truesdell, Lippmann, Quijano, & D'Amore, 1995).

6.2.3 Diagrama de Gases FT & HSH

El primer problema serio al que nos enfrentamos en geoquímica de gases ya sea que se aplique a fluidos de pozos geotérmicos en campos explotados o de manifestaciones geotérmicas en la detección geotérmica, son las numerosas composiciones variables de los diferentes gases.

Esta variabilidad de composiciones tanto en el gas seco como en su concentración con respecto al agua se puede observar a lo largo del tiempo y el espacio para fluidos de pozos o manantiales, ubicadas en diferentes zonas del mismo campo geotérmico o en diferentes campos geotérmicos que tienen temperaturas similares medidas en el reservorio.

Estas variabilidades térmicas se pueden interpretar mediante un análisis combinado de la variación en el tiempo en los valores calculados de la fracción de vapor “y”.

Criterios de interpretación:

1. Aumento de temperatura y disminución de la fracción de vapor “y”: Indica una contribución de fluido de una fuente más caliente y más profunda con líquido de alta saturación.
2. Aumento de temperatura y aumento de fracción de vapor “y”: Aumento aparente de la temperatura y fuente de vapor.
3. Disminución de temperatura y disminución de fracción de vapor “y”: Puede indicar una fuente local de agua pura y de baja temperatura, sin que el contenido de gas reaccione. Como el caso de una nueva inyección o una recarga rápida.
4. Disminución de temperatura y aumento de fracción de vapor “y”: Esta situación se suele relacionar con una disminución de la relación H_2S/H_2O . Esto podría deberse a la recarga como consecuencia debido a la explotación y la ebullición de un fluido de baja temperatura rico en gases. Debido a su posición marginal con respecto a la zona de flujo ascendente principal del campo, que ha sufrido un tiempo de residencia relativamente largo en el reservorio, o por una precipitación de sulfuros causada por una producción excesiva local con bloqueo en las fracturas principales. En este caso el residuo de condensado es tan rico en sales como provocar la precipitación de mayores cantidades de sulfuro que la producción local de HS, ver figura 5 (D'AMORE, 1991).

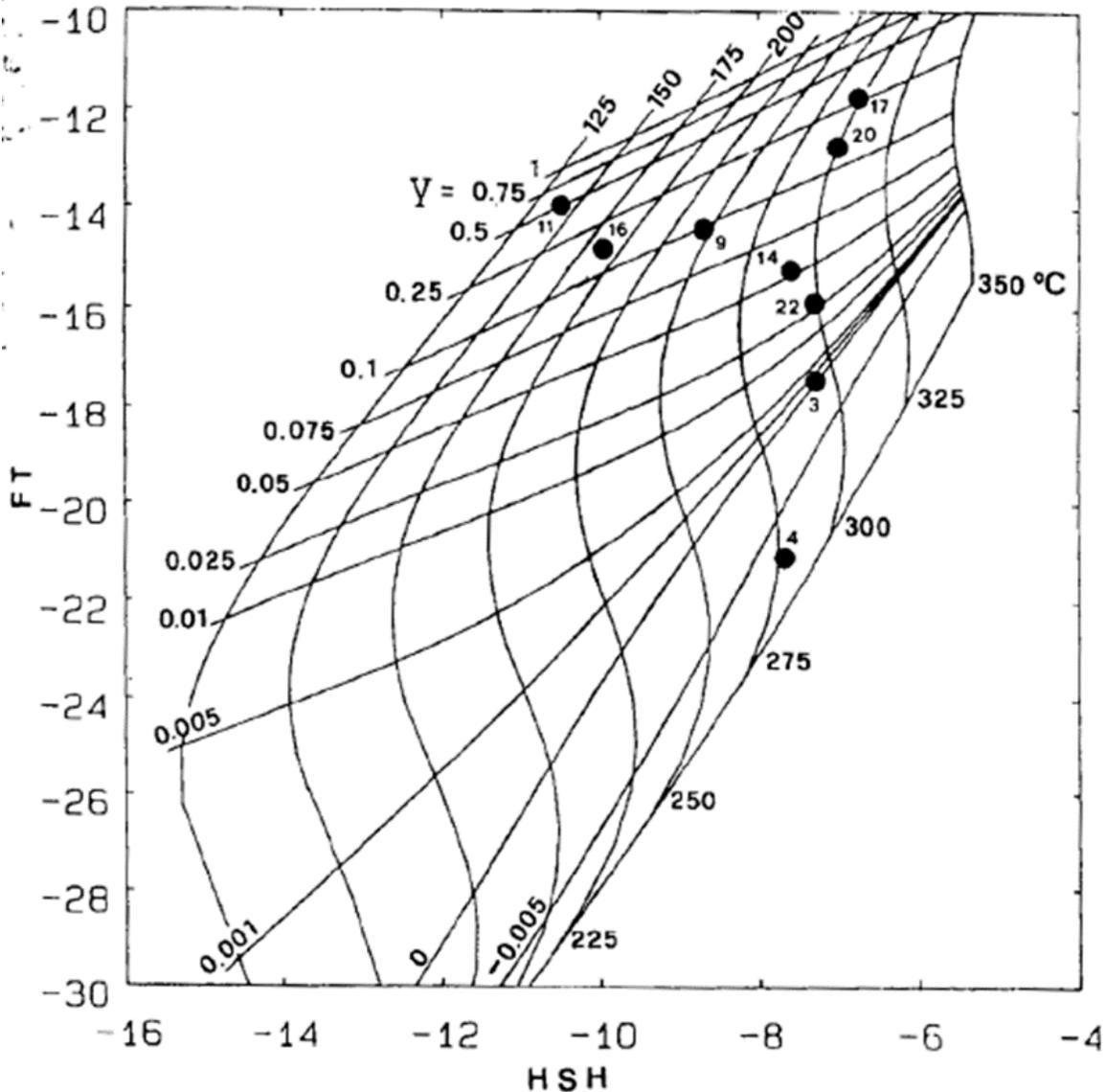


Figura 5. Diagrama de rejilla FT versus HSH de parámetros químicos para valores seleccionados de temperatura y vapor (D'AMORE, 1991).

6.2.4 Diagrama Isótopos de fluidos en el reservorio

Isótopo son todos aquellos átomos del mismo tipo que tienen una cantidad diferente de neutrones en el núcleo, lo cual los hace más pesados o más ligeros que el átomo más abundante, pero conservando todas las propiedades.

La característica distinguible será la masa o peso, relacionado a su movilidad. Los electrones son los encargados de ligar a los átomos en las reacciones químicas y tienen un peso despreciable mientras que los protones y los neutrones en el núcleo le dan el peso al átomo. Y debido a que la ausencia o ganancia de un neutrón en un átomo es perceptible y medible, los isótopos tendrán diferente movilidad lo que hará variar las

proporciones originales respecto al lugar de muestreo, mientras que el resto de características se conservarán (cumpliendo todas las leyes físicas, químicas, de asociación de los elementos y conservación de la masa y energía).

Aplicación de isótopos

Los isótopos son muy útiles en sistemas geotérmicos para muchos aspectos tales como clasificación de tipos de fluidos: superficiales, someros, juveniles-maduros, magmáticos, etc. Así como también, para la clasificación del tipo de sistema presente (líquido dominante o vapor dominante). También han sido utilizados en datación de edades de aguas subterráneas ($^3\text{H}/^1\text{H}$), por supuesto que son útiles para determinar el origen de las aguas o su recarga ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$), y movimiento de fluidos ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$ vs geoindicadores químicos como cloruros), para análisis de agrupamiento en contraste con localización real de sitios, etc. Los isótopos han sido útiles además para la determinación de la extensión superficial del sistema y para definir interacción agua roca, y geotermometría isotópica, entre otras.

Procesos que afectan la composición isotópica de las aguas geotérmicas.

El cambio de oxígeno es el principal fenómeno que determina la composición isotópica del agua geotérmica en ambientes de alta temperatura; hemos visto que el agua meteórica se infiltra para alimentar un reservorio geotérmico con una composición inicial de isótopos que refleja su origen; ascendiendo desde el reservorio, observando que la composición es similar en los isótopos de hidrógeno y en los valores relativamente positivos en los isótopos de oxígeno.

Otros procesos pueden modificar el contenido de isótopos estables del agua después de que se haya infiltrado.

En sistemas geotérmicos a baja temperatura, la reacción de intercambio de isótopos de oxígeno entre el agua y los minerales tiene tasas de reacción muy bajas. Como consecuencia, se necesita un largo tiempo de contacto para variar la composición del isótopo del agua en una medida detectable, ver figura 6.

El equilibrio no será alcanzado en caso de tener tiempos largos de residencia en el reservorio. La ebullición y la pérdida de vapor son los procesos de enfriamiento más importantes en sistemas geotérmicos con grandes descargas superficiales. Debido a que la cantidad de calor es mayor que la que puede perderse por conducción, y porque la deposición de minerales sella el camino de ascenso debido a las aguas profundas que descienden (D'AMORE, 1991).

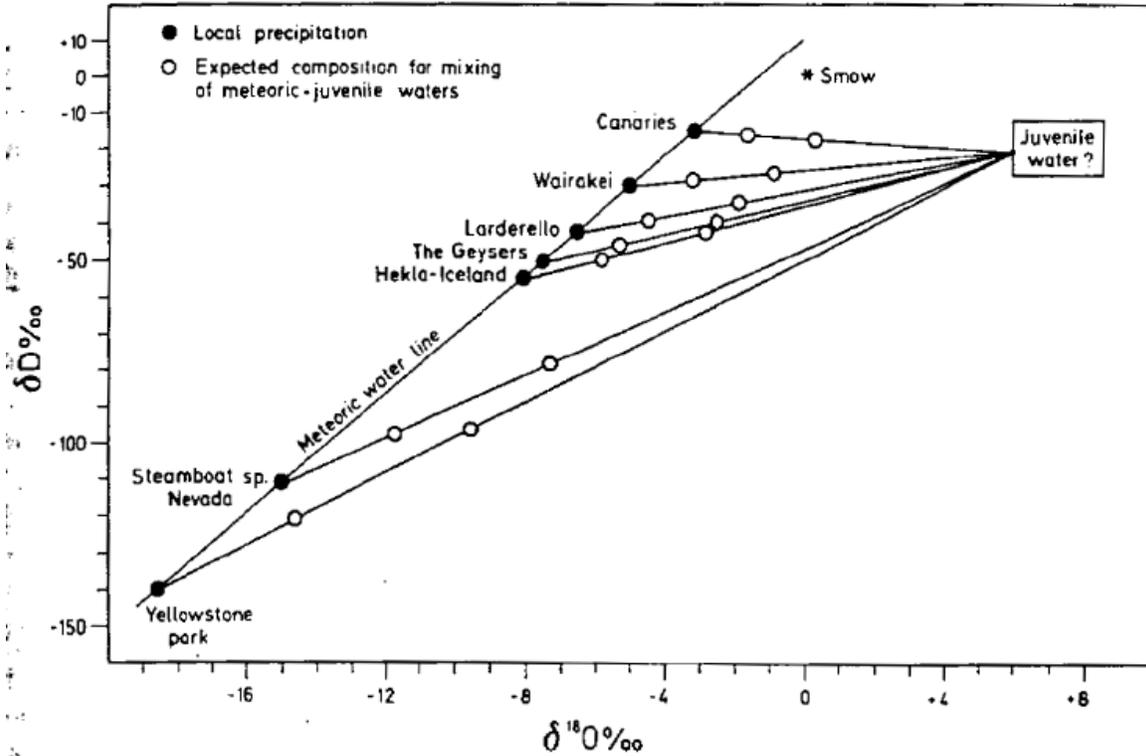


Figura 6. Técnicas de isótopos en estudios geotérmicos, un ejemplo de mezcla entre agua meteórica local y agua juvenil en diferentes proporciones (D'AMORE, 1991).

6.2.5 Diagrama Triangular de Giggenbach N₂-He-Ar

En el diagrama triangular de He-Ar-N₂, se delimitan tres áreas relacionadas a los tres componentes principales del diagrama:

Un **componente meteórico**, representado por agua subterránea saturada con aire, y que contribuye con N₂ y Ar, en relación molar de 38 o mayor, debido al arrastre de burbujas de aire. La relación de He/Ar < 0.001

Un **componente magmático**, caracterizado por un aumento de las proporciones de N₂/Ar de alrededor de 800, pero se han observado proporciones menores a 200. Estas relaciones muy altas de N₂/Ar parecen ser típicas de los gases "andesíticos", estas relaciones son usualmente más bajas. El contenido de He del componente magmático es considerablemente más alto que el del componente meteórico, (He/Ar=1.0).

Un **componente corteza**, compuesto en gran parte de radiogénico de He. Se puede esperar que los contenidos de He-4 aumenten al aumentar el tiempo de residencia de los gases en la corteza.

El aire libre, como lo indica la presencia adicional de O₂, siempre es un contaminante, su relación de N₂/Ar es 84.

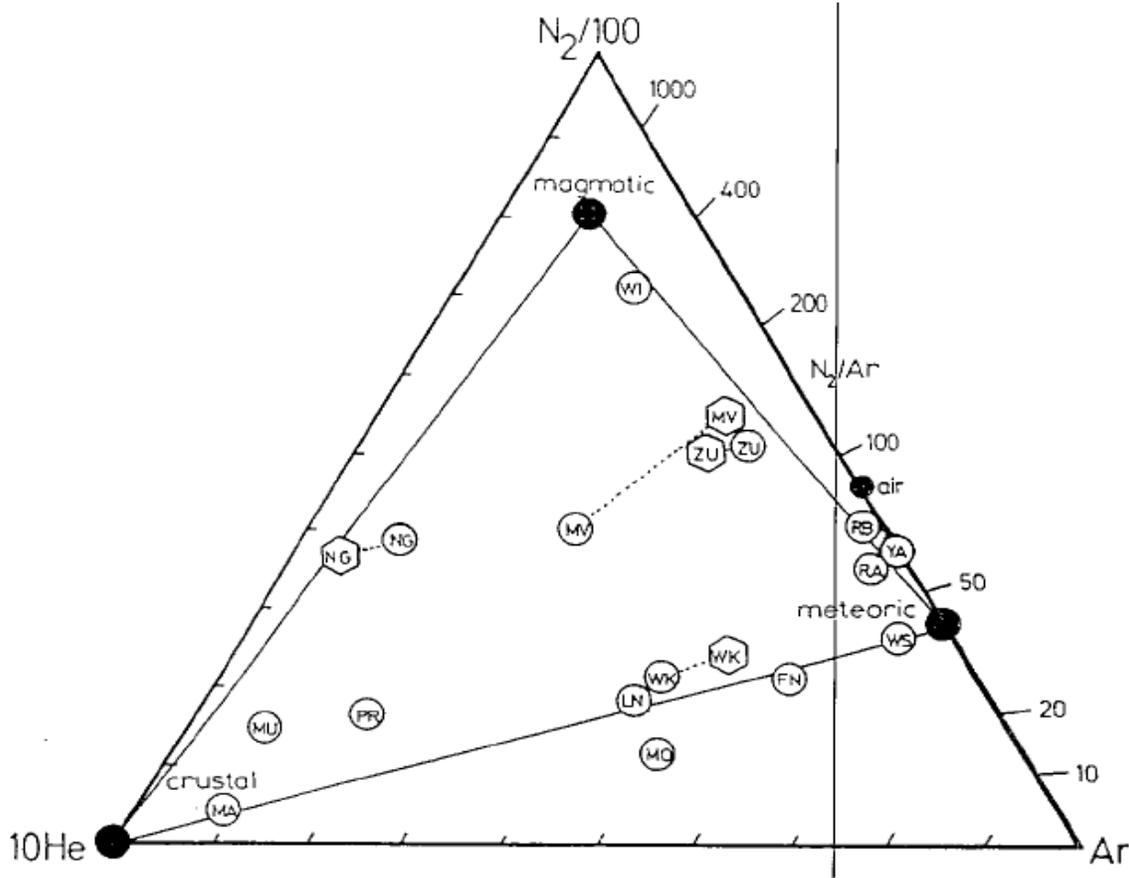


Figura 7. Contenidos relativos de N₂, He y Ar en descargas de gases geotérmicos en base molar (volumen) (D'AMORE, 1991).

6.2.6 Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio

Los diagramas de actividad son solo una forma de representar la relación entre los minerales y los fluidos de sistemas geotérmicos y para comparar los conjuntos de alteraciones observados en el sistema geotérmico. También son útiles para discutir los efectos mineralógicos del enfriamiento o la ebullición de soluciones hidrotermales.

Los diagramas se pueden verificar para cualquier par de componentes principales que nos gusten, siempre que se disponga de buenos datos termodinámicos o experimentales para calcular las posiciones de los límites de fase. Como subrayó Helgeson et al. (1978), los datos para los aluminosilicatos como la caolinita y para las fases cálcicas como la wairakita son contradictorios, y a menudo se evalúan subjetivamente. También tenemos problemas de solución de sólido, en el caso del grupo de zeolitas, una variación significativa en las propiedades físicas con respecto a la temperatura y la presión. Estos problemas se aplican particularmente a los minerales de aluminosilicatos que contienen calcio y magnesio, los más importantes de los cuales, en términos de alteraciones

geotérmicas, son la epidota (generalmente representada por cliozoisita $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$), clorita, wairakita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}, 2\text{H}_2\text{O}$) y los minerales arcillosos.

En tales casos, los datos químicos de los sistemas geotérmicos pueden ser la guía confiable para el equilibrio de fases.

Calcita

La solubilidad de la calcita se usó antes como base para la estimación del pH a partir de la química de las descargas de pozos.

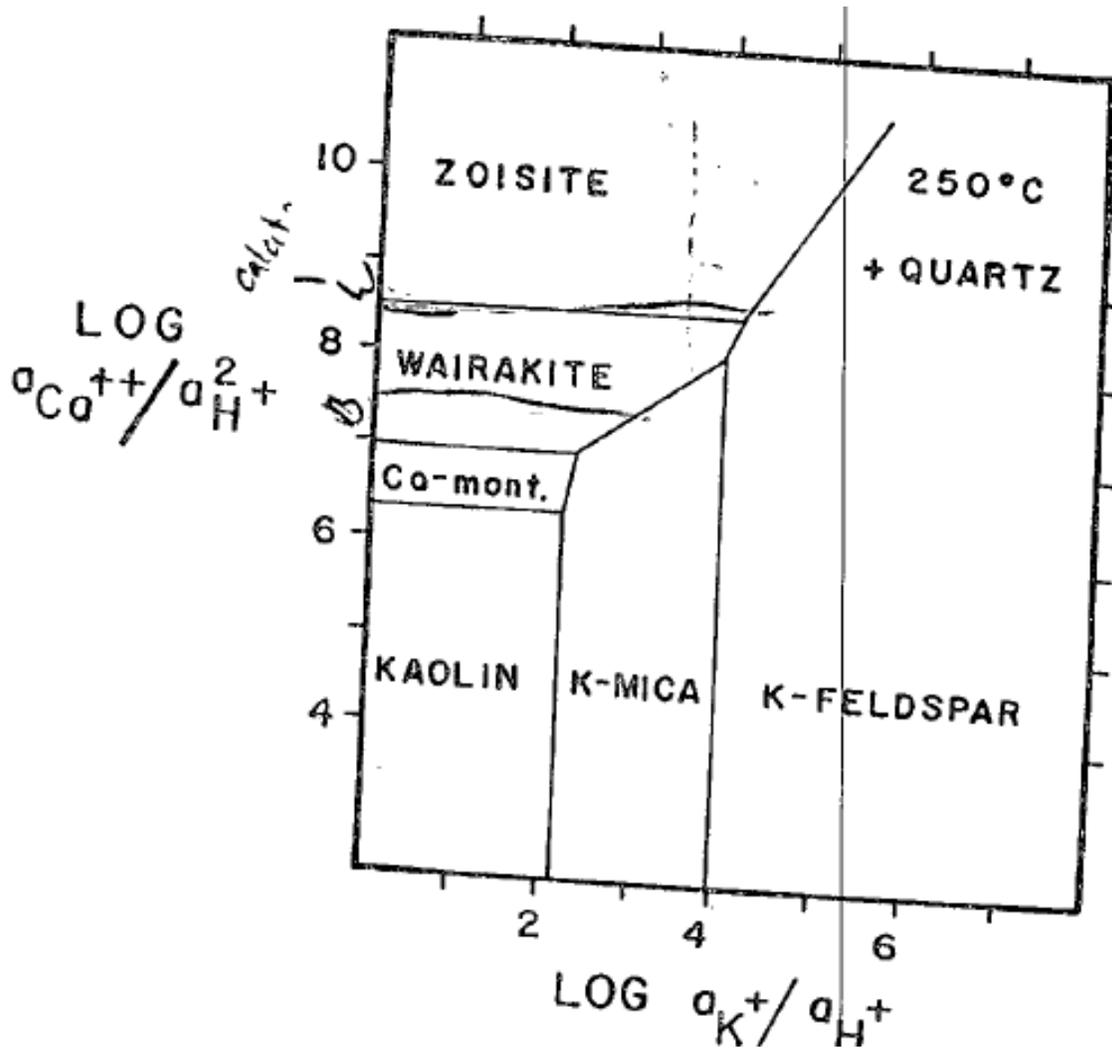


Figura 8. Diagrama de actividad para las fases principales del sistema $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}$ a 250°C (Truesdell, Lippmann, Quijano, & D'Amore, 1995).

6.2.7 Diagrama Cloruro & Entalpía

Pueden surgir aguas termales donde el agua clorurada desde la profundidad llega directamente a la superficie, pero en muchos sistemas se produce una mezcla subterránea de fluidos para producir fluidos híbridos o mezclas de agua fría, vapor, pérdidas de vapor y fluidos de acuíferos fríos.

Para obtener información hidrológica de fuentes termales y pozos, necesitamos poder reconocer estos procesos y al menos determinar de manera semicuantitativa las proporciones relativas de cada componente de la mezcla. En el diagrama de mezcla se relaciona la entalpía, fase y concentración de cloruro, (Truesdell et al, 1984).

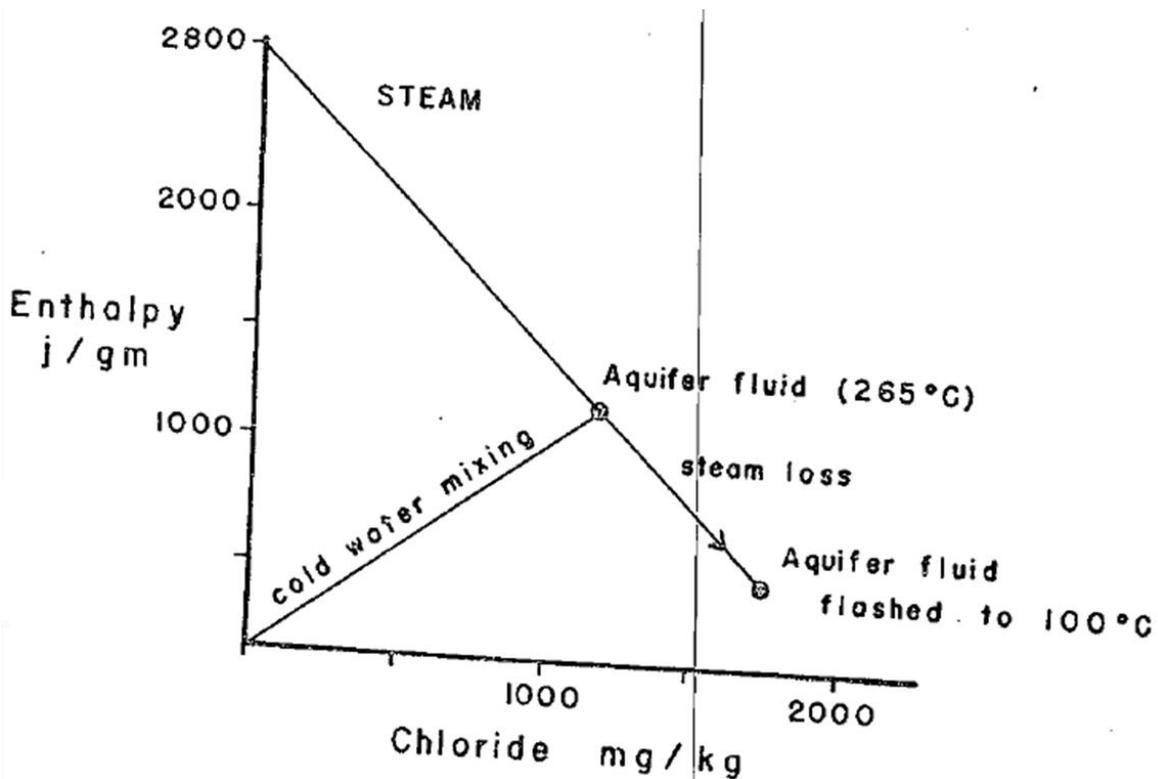


Figura 9. Diagrama de mezcla típico de entalpía-cloruro (Truesdell et al, 1984).

7. Metodología

Para la realización del estudio se consideró una serie de pasos con la finalidad de desarrollar el tema de una manera ordenada y concisa. A continuación, se detallan los pasos realizados:

7.1 Colección de data geoquímica

La data geoquímica procede del área de reservorio la cual lleva el control y procesamiento de los resultados de los análisis del monitoreo continuo y periódico de los parámetros geoquímicos del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate.

7.2 Procesamiento de data geoquímica

7.2.1 Selección de muestras

La selección de las muestras consideradas para este estudio consistió en obtener un valor por semestre, realizando un promedio por cada seis meses, la selección de los valores descrita anteriormente es la utilizada para el procesamiento de la evaluación geoquímica que a continuación procede.

7.2.2 Realización de diagramas geoquímicos por pozo

Para la evaluación del comportamiento individual de cada pozo con los valores seleccionados de las muestras, se realizaron diagramas específicos para su respectiva interpretación y evaluación del comportamiento del campo, dentro de estos podemos mencionar:

Diagrama Triangular de Giggenbach Na-K-Mg

Útil para determinar las geotemperaturas y estados del fluido observando los cambios experimentados a lo largo de la explotación del campo geotérmico en estudio.

Diagrama de Entalpía

Utilizado para determinar los procesos que ocurren en el reservorio a distancias cercanas y lejanas de los pozos. Estos cambios se identifican con las comparaciones de E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2} con respecto a la explotación y manejo del recurso geotérmico en el tiempo.

Diagrama de Gases FT & HSH

Utilizado para determinar la variabilidad de la “fracción de vapor” y los cambios de temperatura que experimenta los gases en el tiempo.

7.2.3 Evaluación geoquímica integrada

Una vez realizada la evaluación de los comportamientos de cada uno de los pozos en estudio, se hace una retroalimentación haciendo uso de diagramas que muestran las características generales de todos los pozos y con ellos, realizar una interpretación global de los comportamientos que ocurren en diferentes zonas del campo geotérmico, a continuación, se especifican los diagramas utilizados para dicha interpretación:

Diagrama de Isótopos de fluidos en el reservorio

Con el objetivo de clasificación de tipos de fluidos, ya sean estos: superficiales, someros, juveniles-maduros, magmáticos. Así como también, para la clasificación del tipo de sistema presente (líquido dominante o vapor dominante).

Diagrama triangular de Giggenbach N₂-He-Ar

Útil para determinar a qué tipo de zona se adecuan los pozos en estudio, de acuerdo al tipo de componente en el diagrama triangular, ya sean estos: componente meteórico, componente magmático o componente corteza, tomando en cuenta las características que cada uno de estos presentan.

Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio

Importancia de poder clasificar o representar la relación entre los minerales y los fluidos de sistemas geotérmicos, y para comparar los conjuntos de alteraciones observados en el sistema geotérmico.

Diagrama Cloruro & Entalpía

Diagrama en el cual se puede verificar proceso ocurrido en los sistemas sea este una mezcla subterránea de fluidos para producir fluidos híbridos o mezclas de agua fría, vapor, pérdidas de vapor y fluidos de acuíferos fríos.

8. Análisis de datos

En el Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, se realiza monitoreos completos de los pozos productores cuatro veces al año. De este set de datos se eligieron 2 muestras representativas por año para evaluar la evolución del campo.

Se tomaron datos semestrales por año, por el cual esta codificado de la siguiente manera Sn20nn que significa:

- S1: semestre 1 o 2
- 20nn: año que corresponde del 2005 al 2018

9. Presentación de resultados

Posteriormente a la aplicación de la metodología descrita previamente, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación; en una primera fase se presentan los resultados obtenidos con respecto a la evolución geoquímica de los pozos del campo geotérmico en estudio durante sus diferentes períodos de operación mediante análisis gráfico utilizando las siguientes herramientas:

- Diagrama de entalpía (Truesdell, Lippmann, Quijano, & D'Amore, 1995).
- Diagrama triangular de Giggenbach de Na-K-Mg (GIGGENBACH, 1984).
- Diagrama de Gases FT & HSH (D'AMORE, 1991).

La segunda fase de la presentación de resultados consiste en la integración de los principales hallazgos en los pozos evaluados, con el fin de establecer el comportamiento espacial de los fluidos del campo geotérmico, utilizando para ello las herramientas de evaluación siguientes:

- Diagrama isotópico de fluidos en el reservorio (D'AMORE, 1991).
- Diagrama Cloruro & Entalpía (Truesdell et al, 1984).
- Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio (Truesdell, Lippmann, Quijano, & D'Amore, 1995).
- Diagrama triangular de Giggenbach de N₂-He-Ar (D'AMORE, 1991).

Los resultados antes descritos se presentan a continuación:

9.1 Evaluación de la evolución geoquímica de pozos

Pozo SJ4-1

En la figura 10, se observa que en el año 2005 (fase inicial del pozo) la E_{NaKCa} y la entalpía de E_{SiO_2} presenta valores similares observándose en ambos una tendencia al descenso, a diferencia de la E_{med} que se observa con valores mayores a las E_{NaKCa} y E_{SiO_2} hasta inicios del año 2013, este comportamiento indica que probablemente el pozo tenga un aporte de vapor adicional, sin embargo, este aporte de vapor se observa que disminuye con el paso del tiempo. En el breve periodo comprendido entre el final de 2013 y 2015 se observa un cambio en el comportamiento en las entalpías ya que en este punto los tres parámetros (E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2}) presentan valores similares, esto significa que ya no hay aporte adicional de vapor y que todo el fluido emitido por el pozo proviene de una zona de alimentación líquida.

A partir del año 2015 inicia un cambio en el comportamiento de las entalpías donde E_{med} y E_{NaKCa} aumenta, y E_{SiO_2} disminuye, siendo E_{med} mayor que E_{NaKCa} y esta a su vez mayor que E_{SiO_2} lo cual es indicativo que existe ebullición en los fluidos a medida que se desplazan hacia el pozo, este comportamiento se mantiene hasta el año 2018.

El diagrama de Giggenbach indica que del año 2005 al 2013 se da una caída de geotemperatura, pero ubicándose más hacia la zona de evaporación lo cual se corresponde con el exceso de vapor reflejado por la E_{med} . En la transición del segundo semestre del año 2013 a 2015 se observa una estabilización de la geotemperatura y un desplazamiento desde la zona de mayor evaporación hacia una menos evaporada, lo cual está en concordancia con la estabilización de entalpías explicada anteriormente para este mismo período; del 2015 en adelante se observa un aumento de temperatura lo cual está en correspondencia con el comportamiento de la E_{NaKCa} lo cual probablemente significa que en la lejanía de la zona de alimentación del pozo este comienza a “recuperar” su condición inicial de temperatura sin embargo también hay evidencia de que el fluido experimenta ebullición cuando se desplaza hacia la zona de alimentación del pozo.

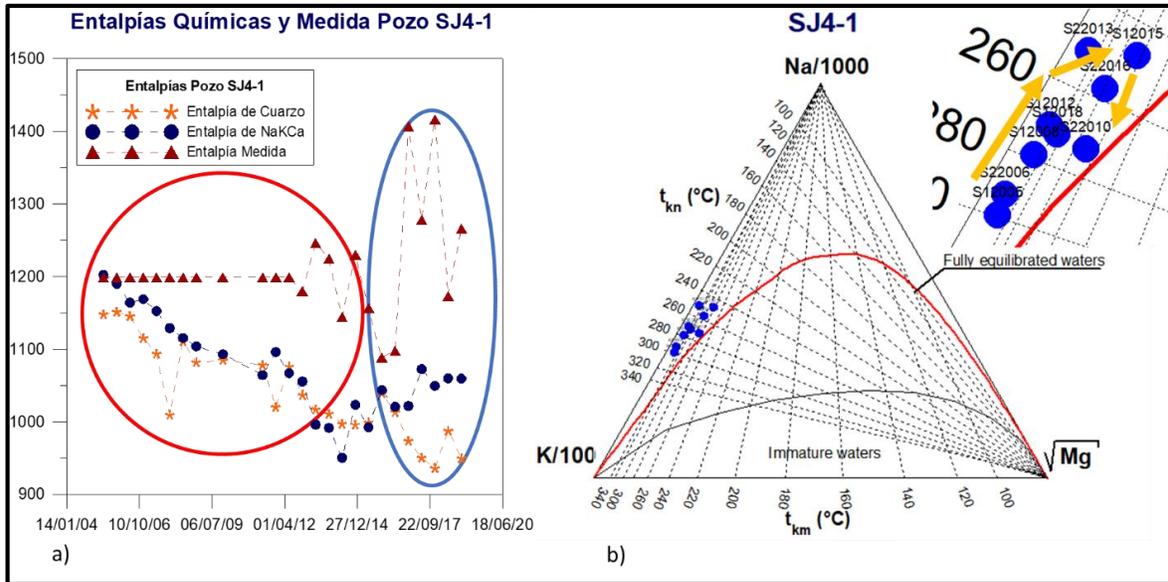


Figura 10. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ4-1

A través de los gases (ver figura 11) la tendencia general desde el inicio de producción del pozo hasta el año 2013 es la disminución de temperatura y el aumento en la fracción de vapor lo cual resulta contradictorio debido a que el exceso de vapor del pozo fue disminuyendo en ese mismo período, esto significa que dicho aporte de vapor no provenía de una zona cercana a la alimentación principal del pozo y por tanto no se refleja en la relación FT-HSH, lo que sí se refleja es la ebullición en el reservorio la cual se hace más notoria hacia el año 2018 donde además de incrementar la fracción de vapor también disminuye la geotemperatura, lo cual es un reflejo claro de la ebullición que experimentan los fluidos cuando se desplazan hacia el pozo tal como se había afirmado con anterioridad. Es importante destacar que en el período de 2014-2015 no se tuvieron datos confiables de gases para incluir en el análisis.

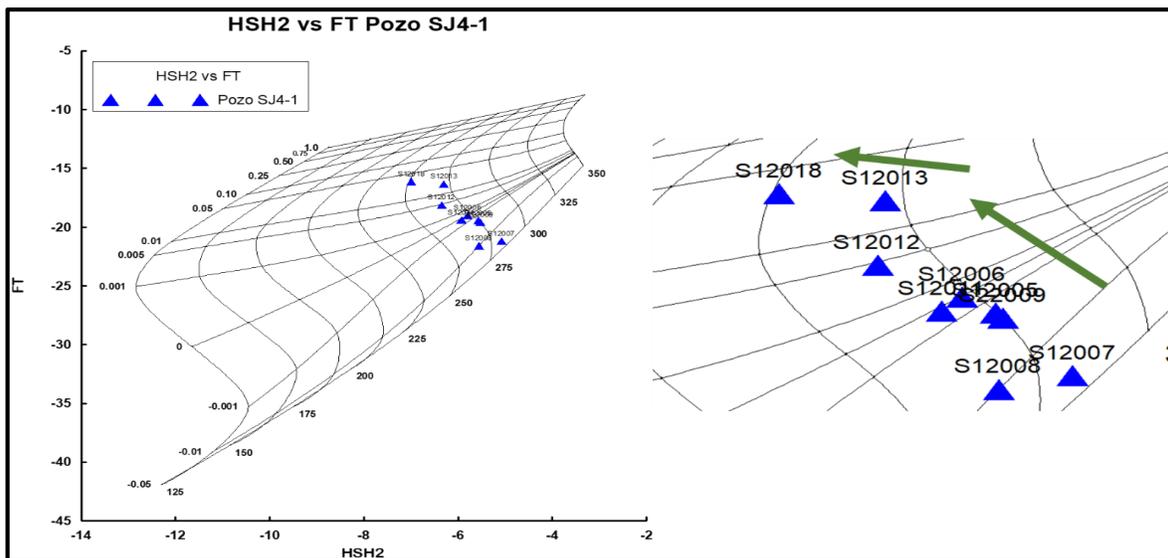


Figura 11. Gases FT & HSH del SJ4-1

Pozo SJ5-1

En la figura 12, del año 2005 al 2012 se puede observar que la $E_{med} > E_{NaKCa} > E_{SiO_2}$ en el pozo SJ5-1, el cual representa un proceso de ebullición del líquido durante el desplazamiento hacia el pozo a causa de una disminución de presión en el fondo del pozo generando vapor en exceso, sin embargo, se observa que la diferencia entre las entalpías no es tan marcada y por tanto pueda que la ebullición que está ocurriendo sea mínima.

Del 2014 al 2016 las entalpías se equilibran manteniéndose constante. Del 2016 al 2018 la E_{med} y E_{NaKCa} se mantienen en equilibrio, en cambio la E_{SiO_2} tiene una ligera disminución por un posible proceso de enfriamiento por ebullición localizada cuando ingresa al pozo. La transición observada de 2014 en adelante es indicativa que ha habido un cambio en las condiciones del pozo lo cual ha contribuido a disminuir la ebullición de tal manera que en el último período esta se da solamente de manera localizada, es decir en zona muy cercana a la alimentación del pozo.

El diagrama de Giggenbach indica que del 2005 al 2013 se da una caída de temperatura, ubicándose los fluidos más hacia la zona de evaporación correspondiéndose con el exceso de E_{med} . En el periodo comprendido entre 2013 y el primer semestre de 2015 se observa una estabilización de la geotemperatura y un desplazamiento hacia una menor evaporación lo cual está en correspondencia con la estabilización de las entalpías.

En los datos del 2015 al 2017 se observa un aumento de temperatura debido a que en las lejanías del pozo empieza a recuperarse la condición inicial debido a que la ebullición en este período es localizada tal como se reflejó en las entalpías.

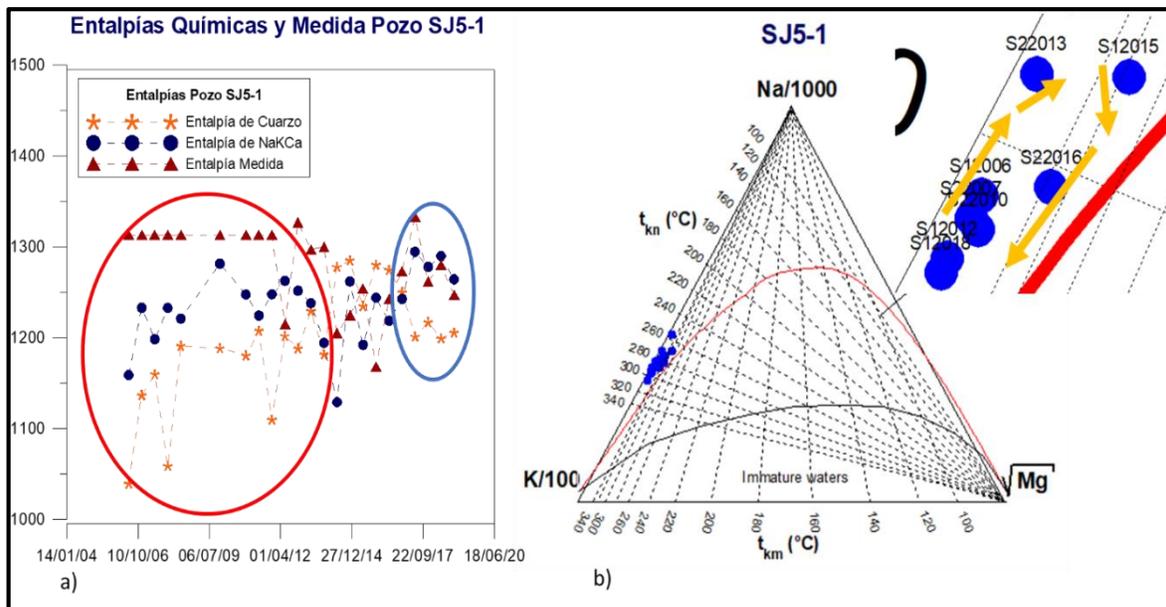


Figura 12. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ5-1

En los gases (ver figura 13), se observa que del año 2005 al 2013 existe comportamiento aleatorio dentro de aproximadamente la misma geotemperatura y en mayor o menor medida cercano a la línea de equilibrio con el líquido, lo cual no refleja que exista ebullición fuerte en el reservorio que le otorgue una fracción de vapor, lo cual se corresponde con lo dicho en las entalpías ya que la ebullición no debe ser lo suficientemente fuerte para tener su reflejo en los gases. Del año 2013 al 2018 se observa que existe un descenso de temperatura y al mismo tiempo un aumento en la fracción de vapor, reflejando la ebullición significativa y localizada que se da en las cercanías del pozo lo cual le confiere ya una fracción de vapor al ingresar al mismo.

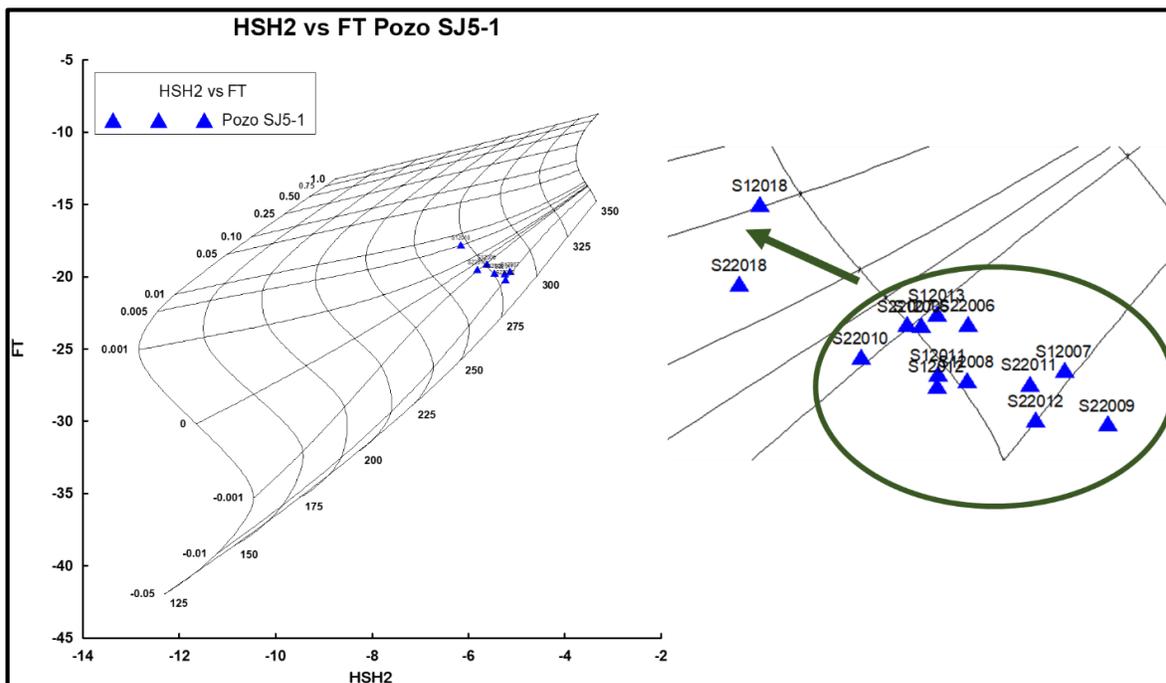


Figura 13. Gases FT & HSH del SJ4-1

Pozo SJ6-1

En la figura 14, se observa que del año 2013 a inicios del 2017 la E_{SiO_2} presentaba valores mayores a la E_{med} y a la E_{NaKCa} , producto de un posible ingreso de agua de menor temperatura al pozo, situación que va disminuyendo gradualmente hasta ya no presentarse en el segundo trimestre de 2017 en donde se alcanza el equilibrio en las entalpías, lo cual indica que el ingreso de agua fría ya no se presenta. El hecho anterior se confirma observando el contenido de bicarbonatos (HCO_3) de este pozo el cual inicialmente presentaba valores relativamente altos con tendencia a disminuir en el tiempo (ver figura 15) correspondiéndose con lo observado mediante las entalpías.

El diagrama de Giggenbach confirma lo explicado en el párrafo anterior ya que en el primer período se observan geotemperaturas menores indicativo de la presencia de un

fluido de menor temperatura, a su vez se observa que a partir de 2017 sucede un incremento de geotemperatura lo cual se debe al cese de la influencia de dicho fluido de menor temperatura o al alcance del equilibrio térmico en dicha zona, lo cual se corresponde con el comportamiento de las entalpías.

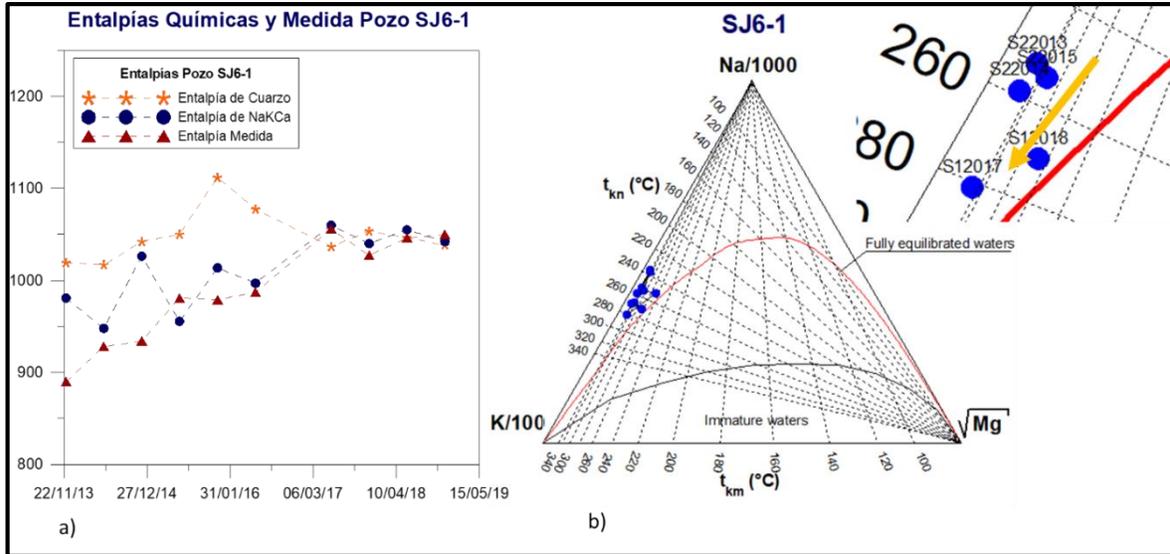


Figura 14. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-1

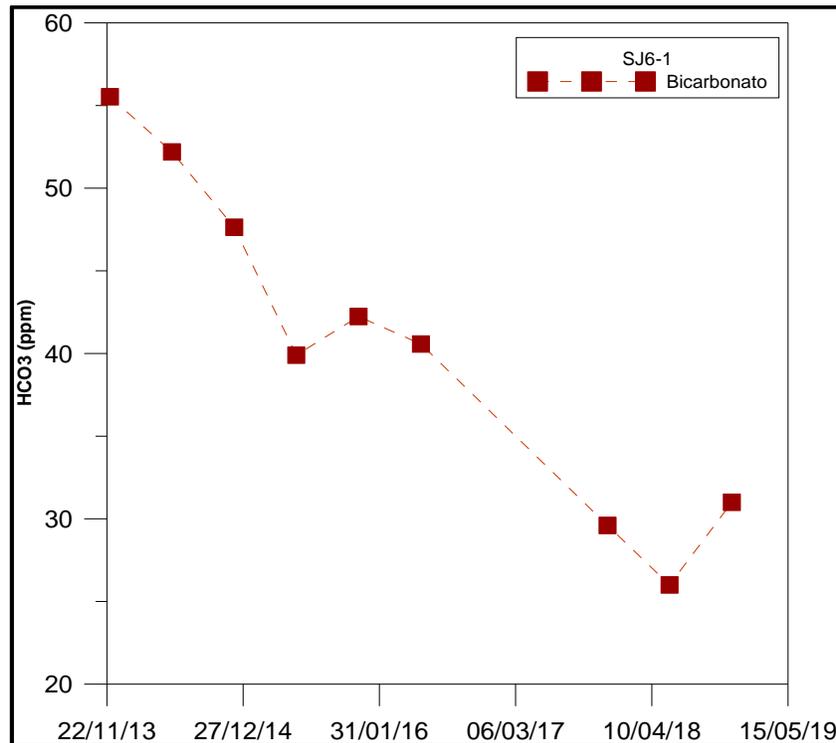


Figura 15. Diagrama de Bicarbonato

En el comportamiento que reflejan los gases (ver figura 16) respecto a los cambios ocurridos, se observa que las muestras de los primeros años presentan menores

geotemperaturas y fracciones de vapor, lo cual indica también la influencia de un fluido de menor temperatura y al igual que en los análisis anteriores se presenta hacia el final un incremento en la temperatura indicando la disminución de la influencia del fluido de menor temperatura o el equilibrio térmico.

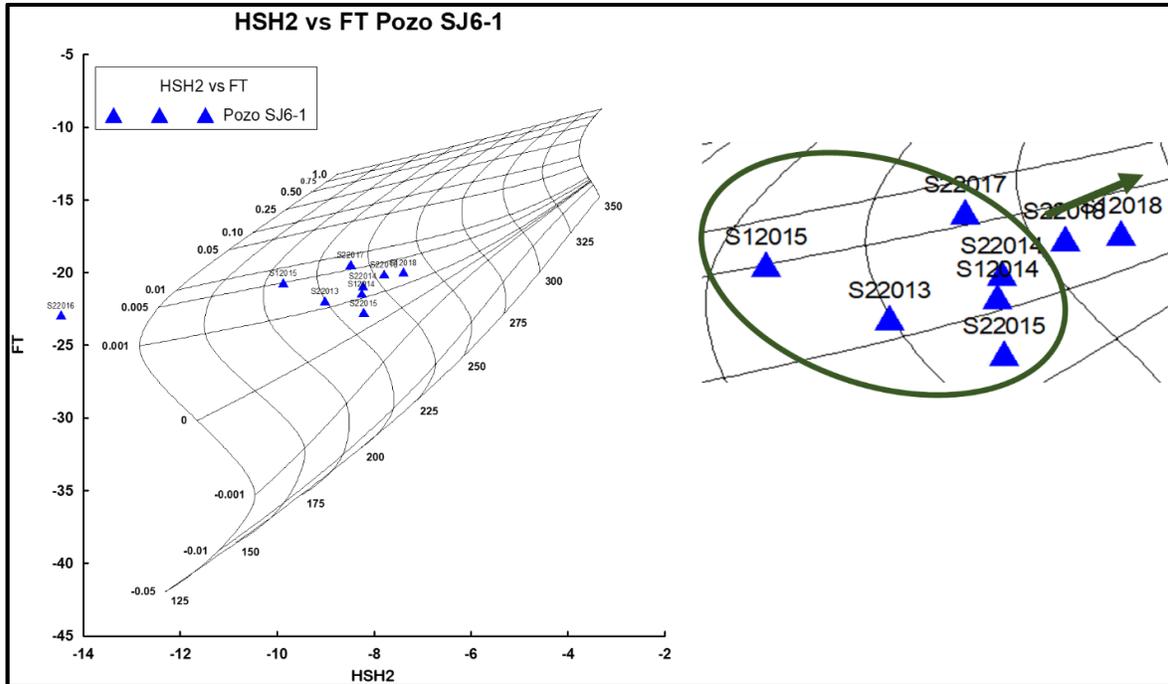


Figura 16. Gases FT & HSH del SJ6-1

POZO SJ6-2

En la figura 17, se observa que la E_{NaKCa} y la E_{SiO_2} tiene valores similares en el período comprendido de 2011 al 2015, en cambio la E_{med} es mucho mayor producto de un exceso de vapor el cual se observa que disminuye con el paso del tiempo al igual que sucede en el pozo SJ4-1.

Del año 2015 al 2017 aproximadamente, se refleja un periodo de transición en el cual se da un equilibrio entre la E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2} . Pero del año 2016 al 2018 la E_{med} y la E_{NaKCa} aumentan, y la E_{SiO_2} disminuye posiblemente por ebullición localizada en las cercanías del pozo lo cual podría ser debido a un cambio en las condiciones de operación que favorece a la disminución de la ebullición ya que en este último período esta solo se da de manera puntual en la zona de alimentación del pozo.

El diagrama de Giggenbach indica que del 2011 al 2015 se da una caída de temperatura dirigida hacia la zona de mayor evaporación lo cual se corresponde con el exceso de E_{med} . En el periodo del 2015 al 2017 se observa un aumento de temperatura en concordancia con el proceso observado mediante las entalpías.

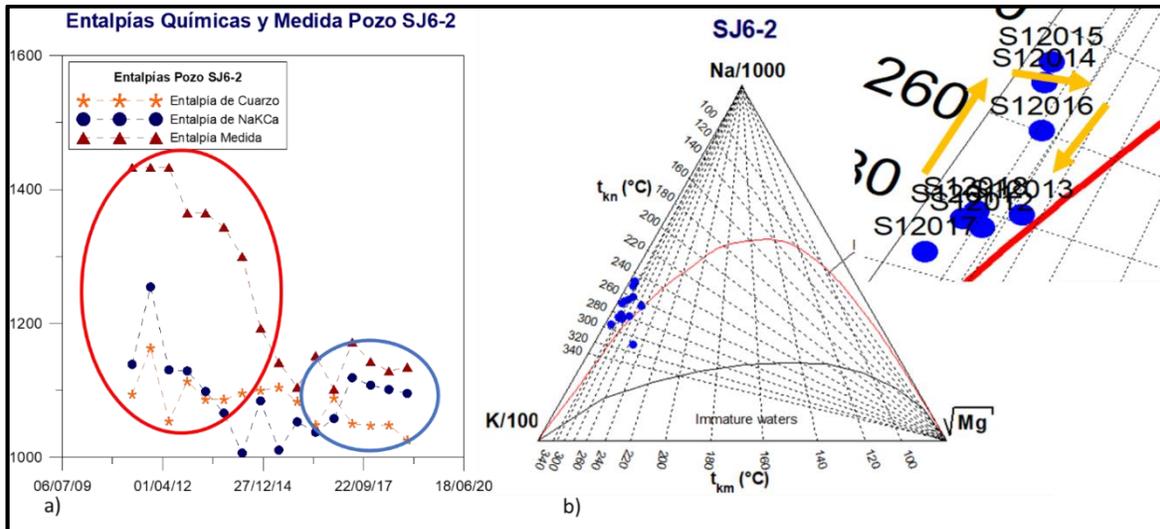


Figura 17. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-2

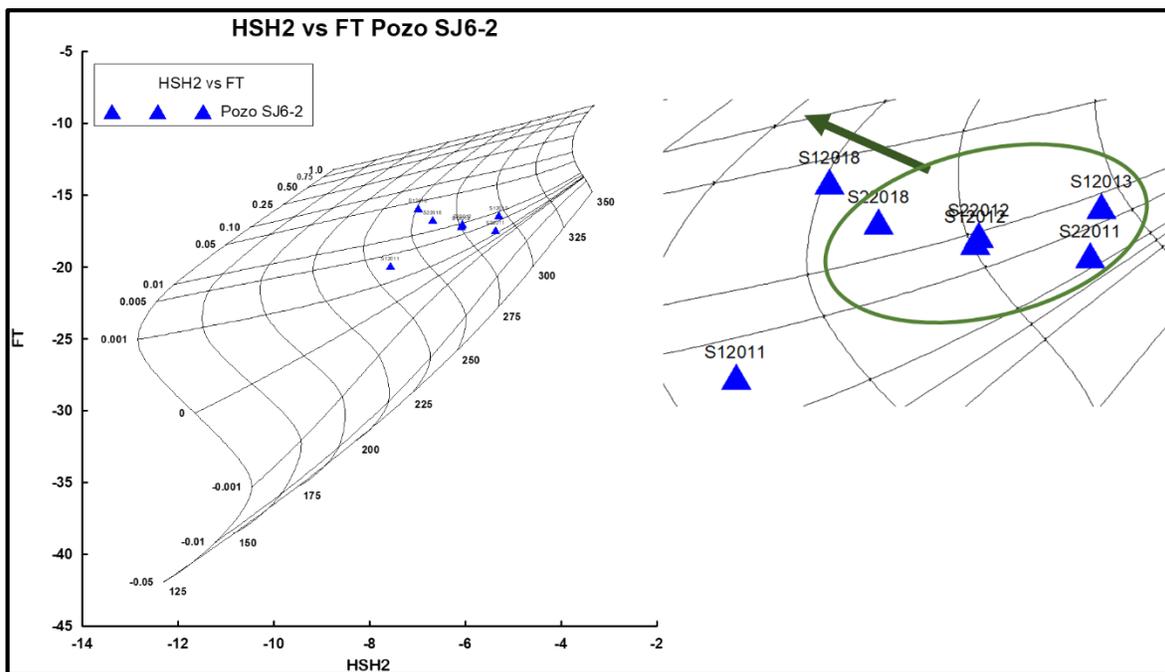


Figura 18. Gases FT & HSH del SJ6-2

En la gráfica de gases (ver figura 18) se observa que en el periodo inicial del pozo, se refleja una condición de mayor temperatura y menor fracción de vapor, esto podría resultar contradictorio ya que en las entalpías se observó que en este mismo lapso de tiempo se presentó exceso de vapor, sin embargo este comportamiento podría deberse a que dicha entrada de vapor separado, podría estar reflejando la condición de temperatura a la cual se produjo dicho vapor la cual podría ser una zona de mayor temperatura (posiblemente la zona del pozo SJ5-1); en el último periodo (hacia 2018) se observa que existe un decremento de la temperatura de gases y a su vez un incremento en la fracción

de vapor lo cual sugiere un enfriamiento por ebullición en el pozo, esto respalda lo explicado anteriormente ya que en este periodo ya no se presenta ingreso de vapor separado y por lo tanto los gases reflejan la condición de su zona de alimentación la cual de acuerdo a las entalpías presenta ebullición.

Pozo SJ6-3

En la figura 19, se observa que la diferencia entre las entalpías no es tan significativa y por tanto puede decirse que están aproximadamente en equilibrio, sin embargo se observa que estas son bajas con respecto a los demás pozos del campo indicando que en esta zona existe un fluido de menor temperatura; la tendencia con el tiempo de las mismas indica un incremento de temperatura lo cual podría corresponder al alcance del equilibrio térmico en la zona, lo cual también se refleja en el diagrama de Giggenbach al pasar del 2016 desde una zona no equilibrada a una zona en equilibrio con presencia de fluidos sometidos a evaporación.

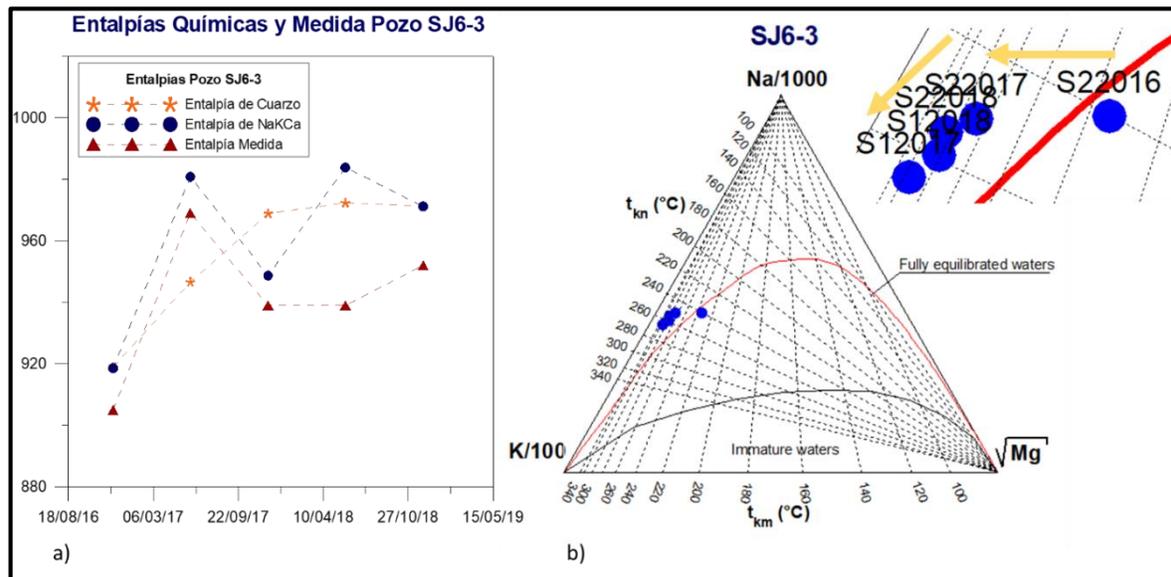


Figura 19. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ6-3

En la parte de gases (ver figura 20) se observa que para el transcurso del año 2016 - 2017, al 2018 refleja un aumento en temperatura, pero al mismo tiempo una disminución de la fracción de vapor lo cual se corresponde con el aumento de temperatura previamente explicado, así como con la condición de un pozo con abundante líquido (buena carga hidráulica) pero con baja temperatura (baja entalpía).

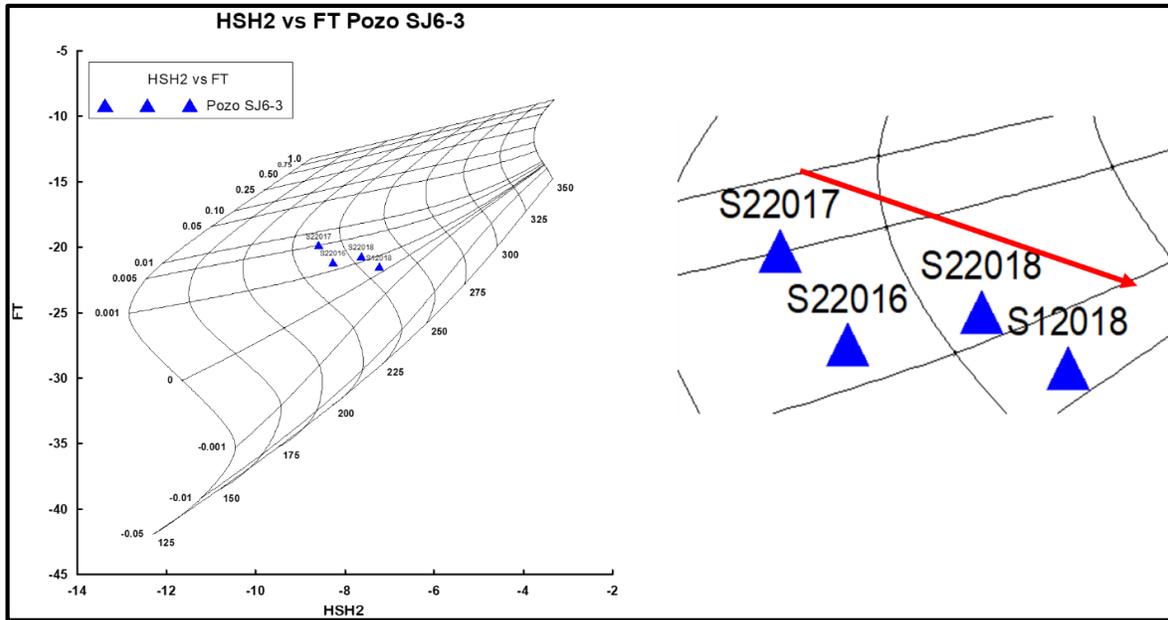


Figura 20. Gases FT & HSH del SJ6-3

Pozo SJ9-1

En el figura 21, del año 2010 al 2011, se puede observar que la E_{SiO_2} es mayor que la E_{med} y E_{NaKCa} , lo que significa que en dicho periodo podía haber entrada de agua de menor temperatura (cercano a zona del pozo SJ6-1) sin embargo dicho comportamiento es puntual ya que desde el 2011 hasta el 2014 las entalpías presentan valores aproximadamente iguales con una tendencia a la disminución de temperatura, lo cual indica que el fluido que alimenta al pozo es completamente líquido con tendencia a la disminución de la temperatura lo cual podría sugerir que en este periodo el pozo presenta influencia de fluido de reinyección, situación que cambia a partir del año 2014 en donde comienza a observarse un incremento en la E_{SiO_2} lo cual sugiere que la influencia de fluido de reinyección ya no está presente en la misma dimensión y a partir de 2016 puede observarse que la E_{NaKCa} es mayor que la E_{SiO_2} medida y de cuarzo, lo cual significa que el pozo comienza a tener aporte de agua que estuvo equilibrada a una mayor temperatura y que sufre un enfriamiento por descompresión en la cercanía del pozo, esto significa que al pozo ya no llega agua de reinyección sino fluido proveniente de zonas más calientes del campo.

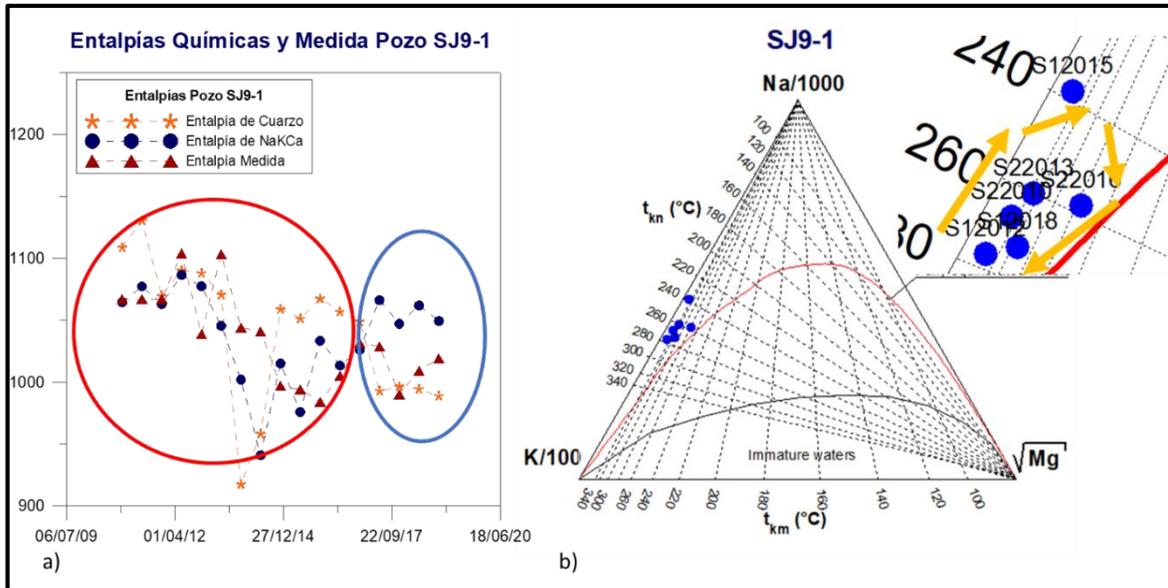


Figura 21. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-1

A través de los gases (ver figura 22) se observa que en el periodo de 2010 al 2013 las muestras se ubican en una temperatura relativamente constante por debajo de la línea de equilibrio con líquido, lo cual podría ser indicativo también de la influencia de reinyección ya que se trata de un líquido no saturado; para el año 2018 se observa una disminución de geotemperatura y aumento de fracción de vapor lo cual corresponde a una ebullición reflejada en el diagrama de entalpías a partir del año 2016 y explicada con anterioridad.

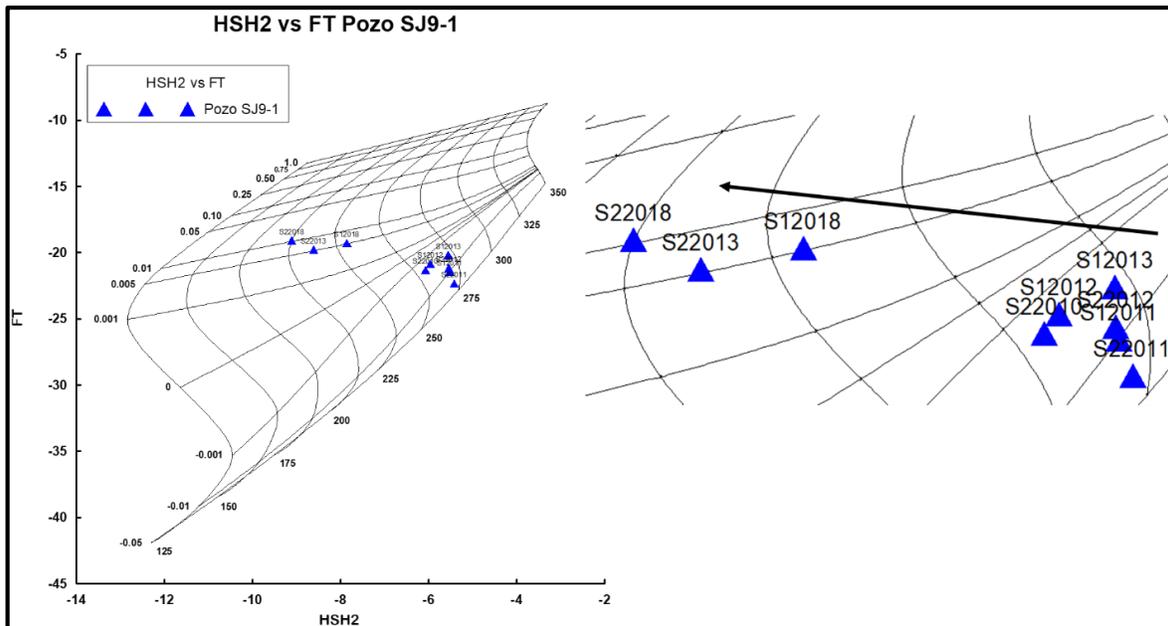


Figura 22. Gases FT & HSH del SJ9-1

Pozo SJ9-3

En el figura 23, se observa que del año 2010 al 2018, como tendencia general se puede observar que la E_{med} es mayor que las entalpías químicas, observándose en estas dos últimas alternancia de $E_{NaKCa} \approx E_{SiO_2}$ y $E_{NaKCa} > E_{SiO_2}$ lo que significa que existe aporte de vapor adicional y también ebullición la cual es reflejada por la de cuarzo y debe suceder en la cercanía del pozo ya que se observa que la E_{NaKCa} prácticamente no varía en el tiempo, lo cual indica que dichas transiciones de medida y de cuarzo se dan de manera puntual seguramente afectado por la condición de operación del pozo.

La grafica de Giggenbach no presenta un comportamiento estable, cabe considerar que se trata de un pozo con dos piernas, el cual en operación es considerado un pozo cíclico debido a que produce con intermitencia vapor seco y fluido bifásico y por ende no refleja un comportamiento estable en los años. Este comportamiento también es observado en gases (Ver figura 24).

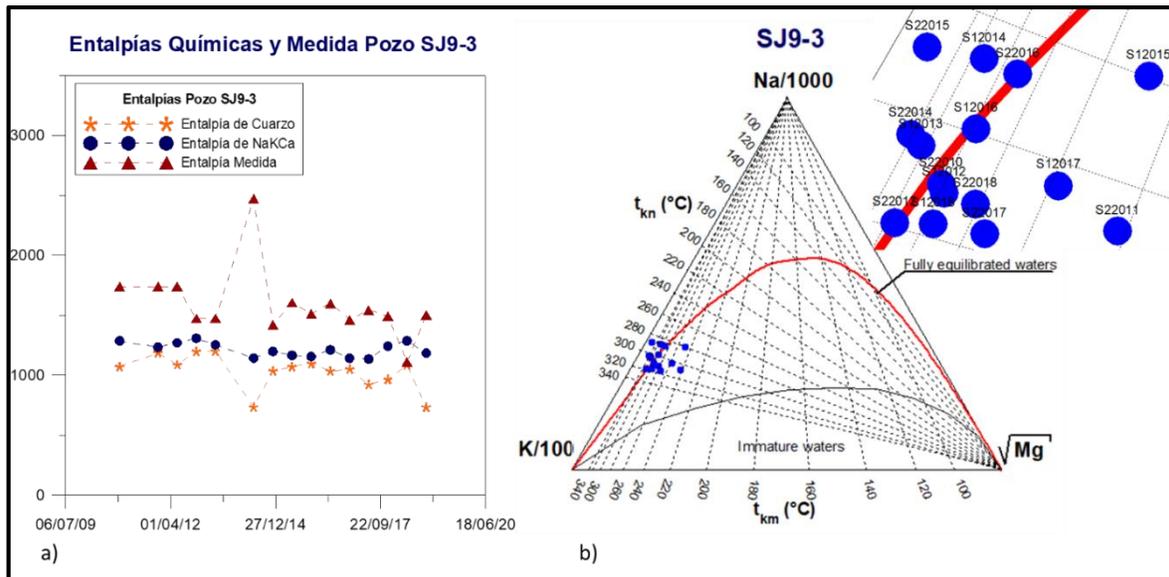


Figura 23. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-3

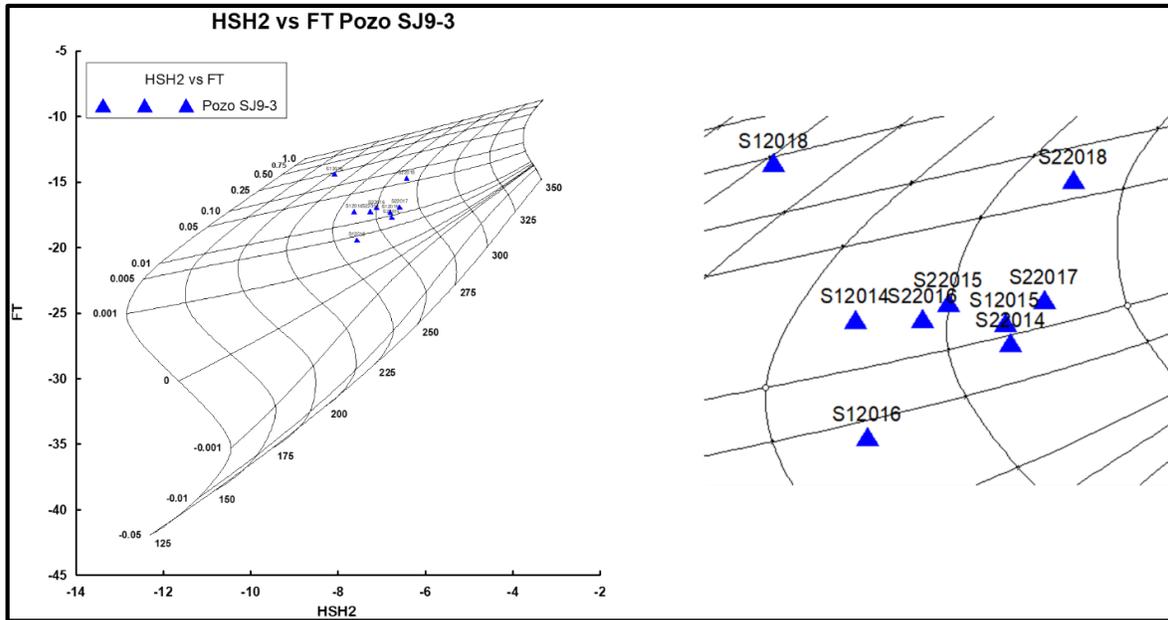


Figura 24. Gases FT & HSH del SJ9-1

Pozo SJ9-4

En la figura 25, del año 2016 al 2018, se puede observar que la entalpía de E_{NaKCa} es mayor a la E_{SiO_2} y a la entalpía medida, la diferencia de entalpías no es demasiado grande sin embargo esto sugiere que podría haber ebullición puntual en la zona de alimentación del pozo con un enfriamiento reflejado en la entalpía de cuarzo y la entalpía medida. Se observa también que se ha producido un leve descenso en la temperatura hacia los últimos años, lo cual también se ve reflejado en el diagrama de Giggenbach.

En la gráfica de Giggenbach se observa que del 2016 al 2017 aumenta la temperatura, llegando a estar cerca de la línea de equilibrio. Del 2017 al 2018 se observa una disminución de temperatura, cerca de su temperatura inicial, pero con un leve incremento hacia la zona de evaporación.

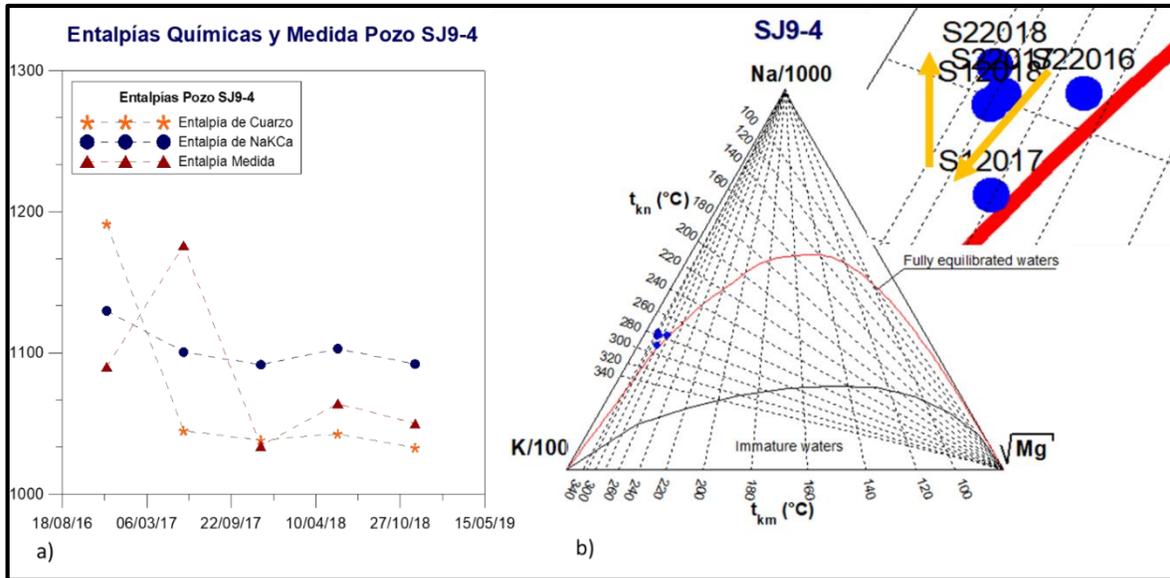


Figura 25. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ9-4

Los gases indican (ver figura 26) que del 2016 al 2017 se dio un ligero incremento de temperatura y fracción de vapor, se observa también que para el transcurso del año 2017 al primer semestre de 2018 hubo aumento de temperatura acompañado de un posterior descenso para el segundo semestre por lo cual no se tiene una tendencia clara hasta el momento con gases para este pozo, sin embargo, sí se observa la presencia de fracción de vapor en el fluido respaldando la ebullición planteada por las entalpías.

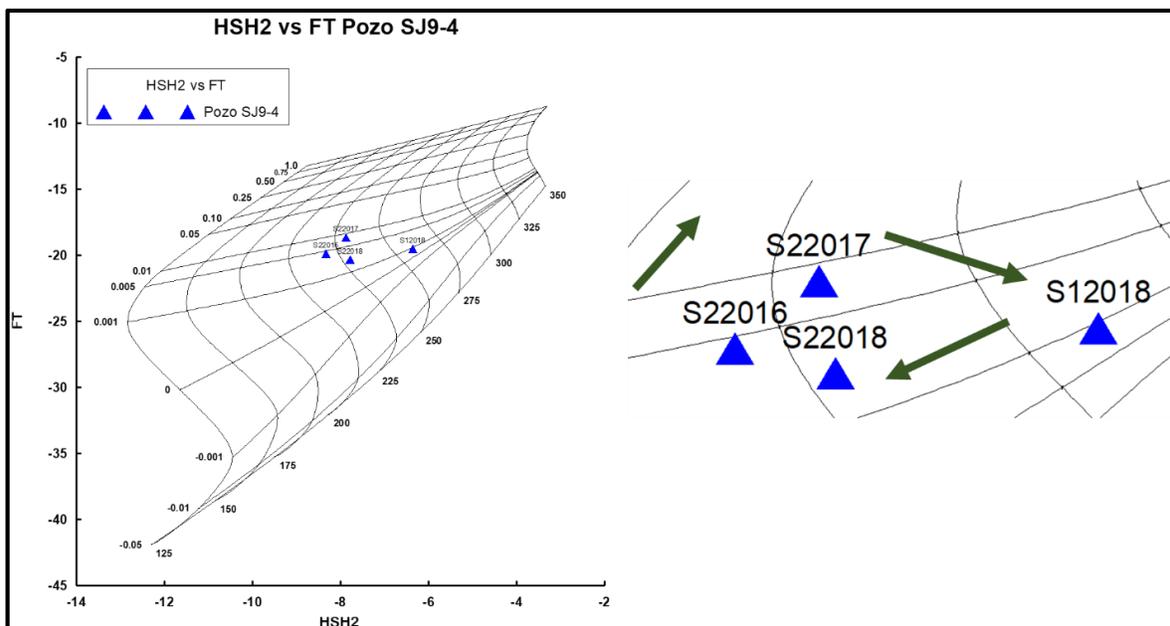


Figura 26. Gases FT & HSH del SJ9-4

Pozo SJ12-2

En la figura 27, se observa que al inicio de la producción del pozo en el año 2011 se encontraba con exceso de entalpía debido a que la entalpía medida era mayor que la E_{NaKCa} y E_{SiO_2} debido probablemente a un aporte de vapor adicional. En el 2013 la entalpía medida empezó a descender paulatinamente, en cambio la E_{NaKCa} y E_{SiO_2} fueron aumentando, indicios de que la temperatura de reservorio empezó a aumentar hasta inicios del 2014, llegando a un estado de equilibrio entre las tres entalpías, aunque se observan pequeñas variaciones, pero no mayores a 100 KJ/Kg, este proceso se mantuvo hasta el 2016.

A partir del 2017 al 2018 la E_{SiO_2} es relativamente menor que la E_{med} y E_{NaKCa} , esto indica que el reservorio del cual es abastecido el pozo se encuentra estable en las lejanías del pozo, pero ocurre un proceso de enfriamiento en las cercanías del pozo esto se debe a una caída de presión instantánea lo cual refleja una posible ebullición teniendo como consecuencia una disminución en la E_{SiO_2} . Este comportamiento se observa en el diagrama de Giggenbach.

El diagrama de Giggenbach indica que del 2011 al 2014 se da una caída de temperatura, pero ubicándose más hacia la zona de evaporación que es debido al exceso de entalpía medida. En los datos del 2014 al 2017 se observa un aumento de temperatura debido al proceso de equilibrio en que se encuentran las entalpías y del 2017 al 2018 hay una leve caída de temperatura y situándose en una zona evaporación menor, debido a que se da un proceso de enfriamiento por ebullición.

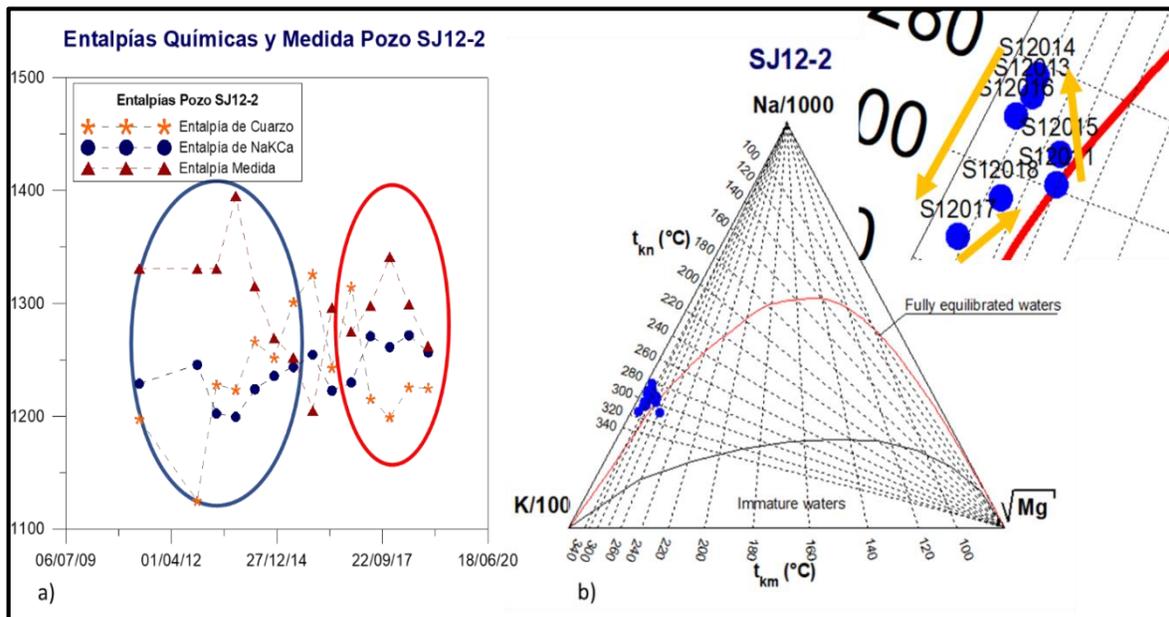


Figura 27. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-2

En los gases (ver figura 28) se observa el mismo comportamiento que en las gráficas de entalpías y Giggenbach. Del 2011 al 2013 aumenta la temperatura y para el 2018 decrece levemente, pero aumenta su fracción de vapor a causa de la ebullición que se da en las cercanías del pozo.

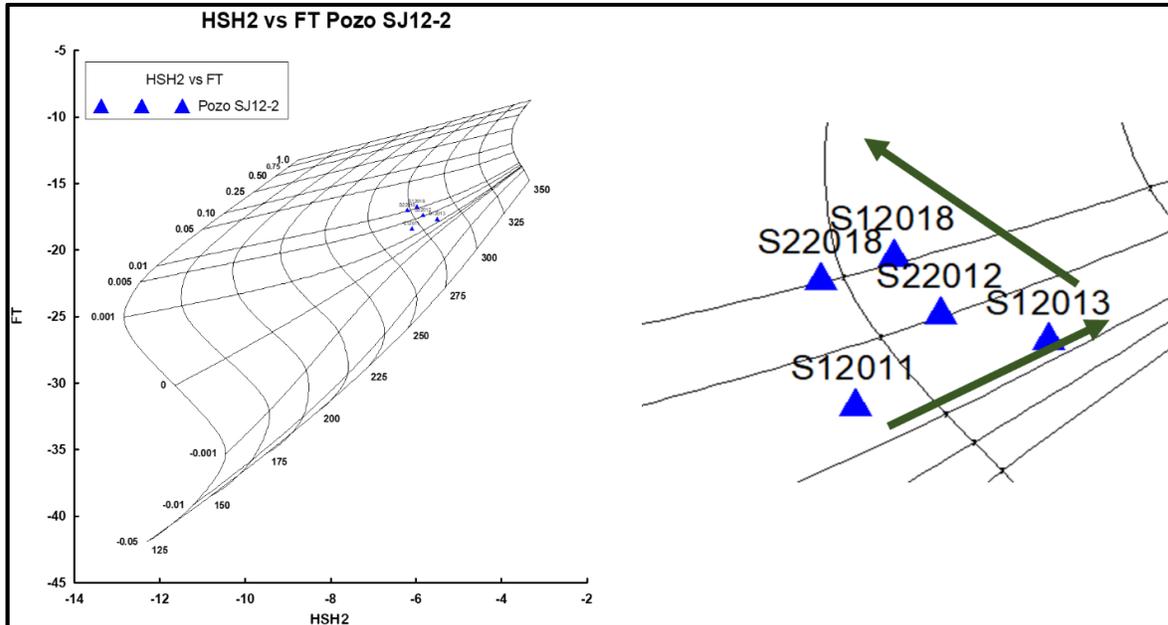


Figura 28. Gases FT & HSH del SJ12-2

Pozo SJ12-3

En la figura 29, se observa que el pozo SJ12-3 al igual que el pozo SJ12-2 al inicio de su producción en el año 2011 se encontraba con exceso de entalpía debido a que la E_{med} era bastante mayor que la E_{NaKCa} y E_{SiO_2} . En el 2013 la E_{med} empezó a descender paulatinamente, en cambio la E_{NaKCa} y E_{SiO_2} fueron aumentando, indicios de que la temperatura de reservorio se encontraba en aumento hasta inicios del 2014, llegando a un estado de equilibrio entre las tres entalpías hasta el 2016.

A partir del 2017 al 2018 la E_{SiO_2} es relativamente menor que la E_{med} y E_{NaKCa} , esto indica que el reservorio del cual es abastecido el pozo se encuentra estable en las lejanías, pero ocurre un proceso de enfriamiento en las cercanías del pozo esto se debe a una caída de presión instantánea lo cual refleja una posible ebullición teniendo como consecuencia una disminución en la E_{SiO_2} . Este comportamiento se observa también en el diagrama de Giggenbach.

El diagrama de Giggenbach indica que del 2011 al 2014 se da una caída de temperatura, pero ubicándose más hacia la zona de evaporación que es debido al exceso de E_{med} . En los datos del 2014 al 2017 se observa un aumento de temperatura debido al proceso de equilibrio en que se encuentran las entalpías y del 2017 al 2018 hay una leve caída de

temperatura y situándose en una zona evaporación menor, debido a que se da un proceso de enfriamiento por ebullición.

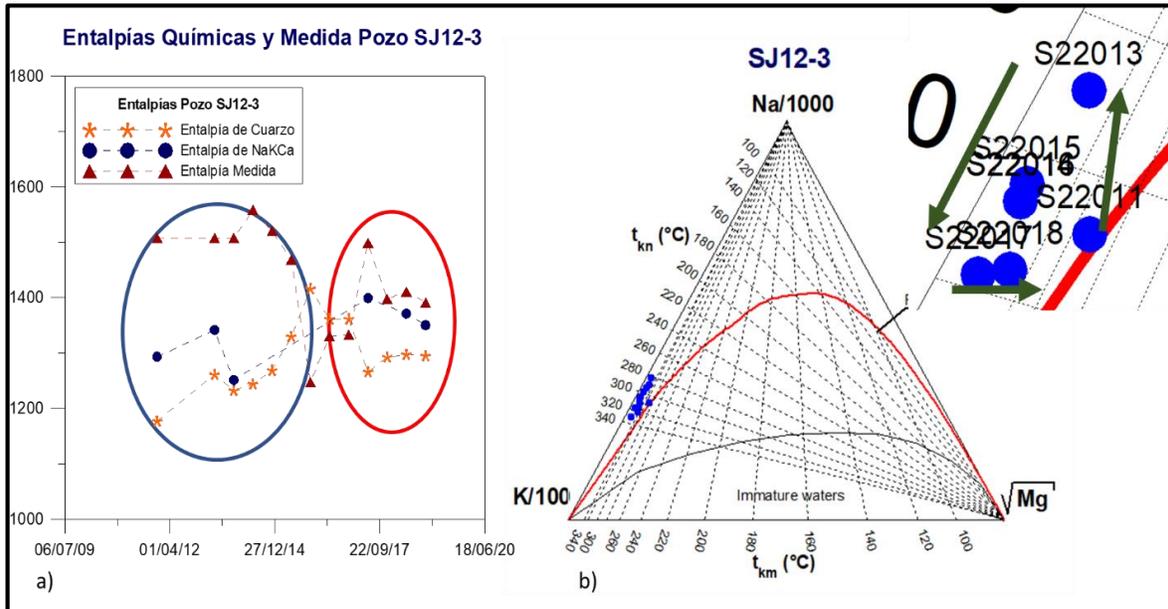


Figura 29. a) Entalpia y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-3

En gases (ver figura 30) del 2011 al 2013 se observa una temperatura constante, y se encuentra en la zona completamente liquida, lo cual sugiere que el vapor adicional no proviene de una zona cercana a la alimentación del pozo. En el 2018 decrece ligeramente su temperatura del primer semestre al segundo semestre y aumenta su fracción de vapor a causa de la ebullición que se da en las cercanías del pozo.

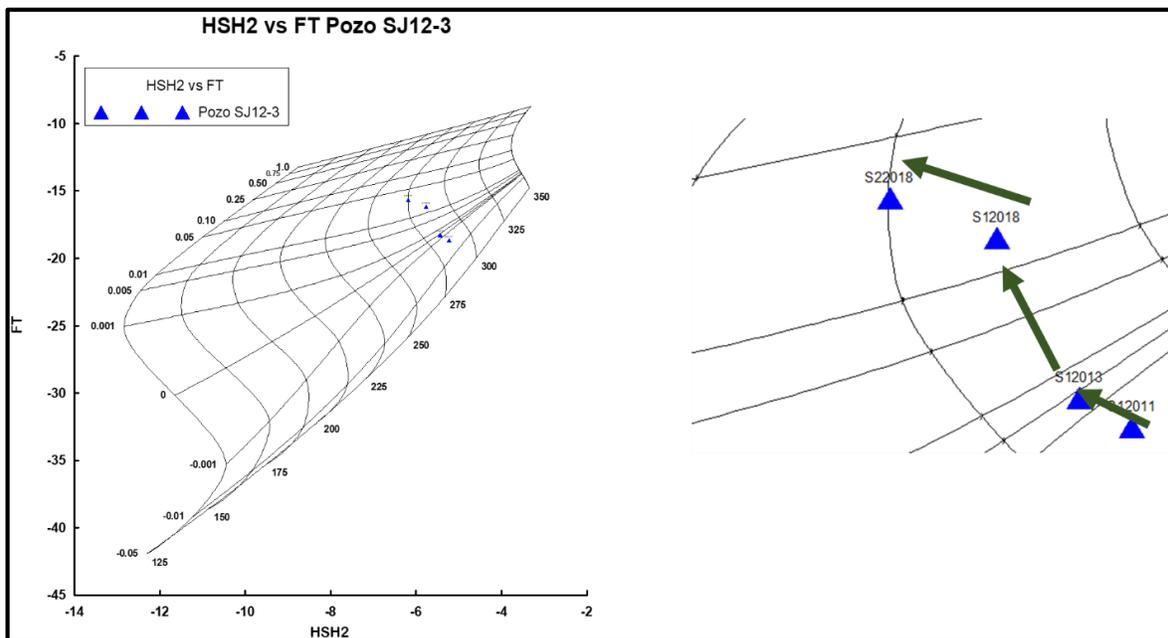


Figura 30. Gases FT & HSH del SJ12-3

Pozo SJ12-4

En la figura 31, se percibe que al inicio de producción en comienzos del año 2018 se reflejaba un enfriamiento por ebullición localizada a la entrada de la alimentación del pozo debido a que la E_{med} y E_{NaKCa} eran levemente mayores que la E_{SiO_2} . A finales del 2018 la E_{med} y E_{NaKCa} empezaron a descender ligeramente (aproximadamente 39 KJ/Kg), en cambio la E_{SiO_2} aumento (aproximadamente 21 KJ/Kg), encontrándose en la actualidad en un estado de equilibrio entre las tres entalpías.

El diagrama de Giggenbach indica que del primer al segundo semestre del 2018 se da una mínima caída de temperatura, pero se traslada ligeramente de una zona completamente líquida y en equilibrio, a una zona de evaporación lo cual sugiere que el fluido presente es de alta temperatura pero que se encuentra cercano a su punto de ebullición.

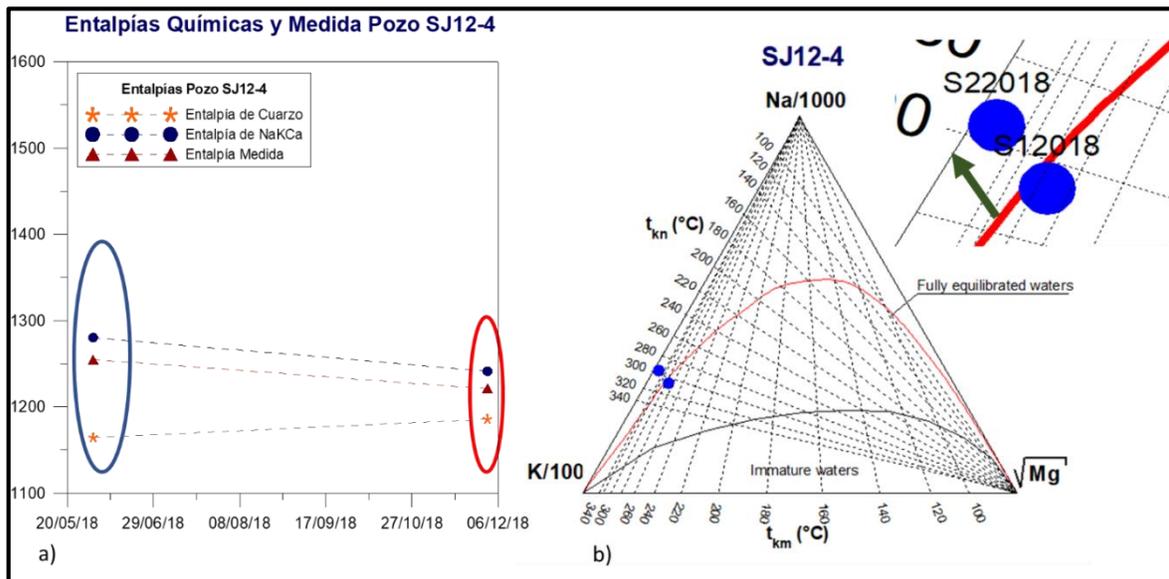


Figura 31. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-4

En los gases (ver figura 32) se observa una alta fracción de vapor y aumento de temperatura, posiblemente porque el pozo fue perforado en el primer semestre del 2018 lo cual contienen alto contenido de gases y con el tiempo disminuye, buscando un estado de equilibrio, observándose una caída de fracción a finales del 2018. Estos gases probablemente aún no se encuentren en equilibrio ya que no reflejan las temperaturas reales del pozo y su interpretación no es aún certera.

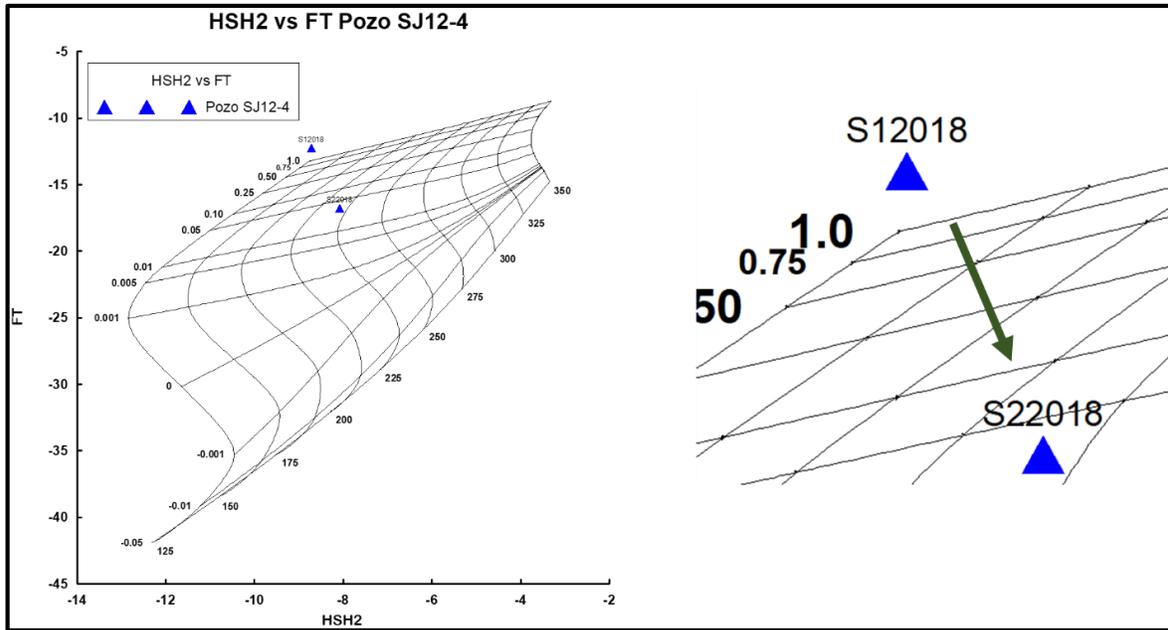


Figura 32. Gases FT & HSH del SJ12-4

Pozo SJ12-5

En la figura 33, puede notarse que al inicio de la producción del pozo a comienzos del año 2018 presentaba enfriamiento por ebullición debido a que la E_{med} y E_{NaKCa} eran levemente mayores que la E_{SiO_2} . A finales del 2018 la E_{med} y E_{NaKCa} empezaron a descender ligeramente (en promedio aproximadamente 35.3 KJ/Kg), en cambio la E_{SiO_2} aumento (25.4 KJ/Kg), encontrándose en la actualidad en un estado de equilibrio entre las tres entalpías, este comportamiento probablemente obedece al efecto de la extracción en el pozo la cual aparentemente ya ha sido asimilada por el mismo en su mayor dimensión.

El diagrama de Giggenbach indica que del primer al segundo semestre del 2018 se da una mínima caída de temperatura, pero aumenta su evaporación correspondiéndose con el equilibrio que se ve en las entalpías.

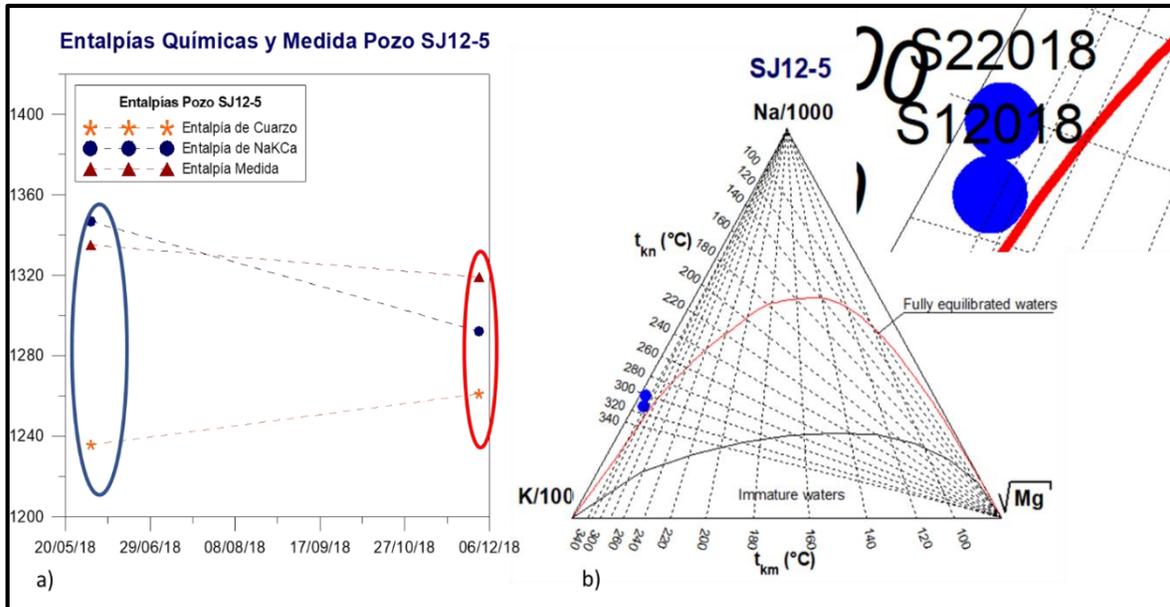


Figura 33. a) Entalpía y b) Diagrama de Giggenbach del SJ12-5

En la figura 34, se observa el comportamiento de los gases donde se presencia una pequeña caída de fracción de vapor y aumento de temperatura del primer al segundo semestre 2018, posiblemente porque el pozo fue perforado en el primer semestre del 2018 lo cual contienen alto contenido de gases y con el tiempo disminuye, buscando un estado de equilibrio.

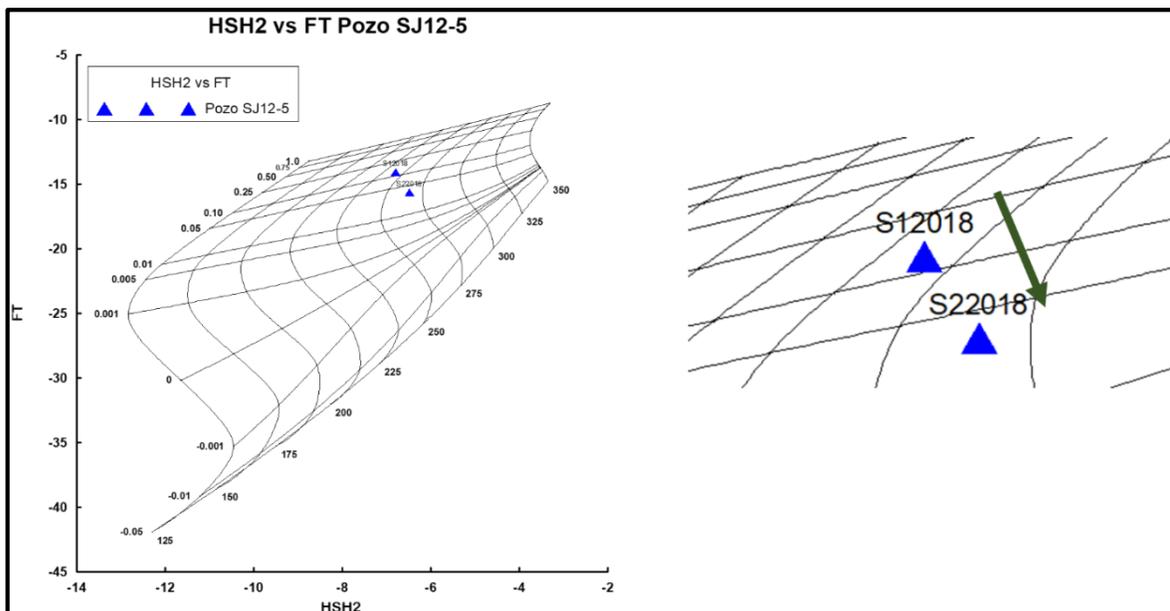


Figura 34. Gases FT & HSH del SJ12-5

9.2 Evaluación integrada de pozos

En la figura 35, se presenta el diagrama isotópico para los pozos productores SJ4-1, SJ5-1, SJ6-2, SJ9-1 y SJ9-3, los demás pozos no se presentan debido a que no se encuentran disponibles datos de isotopos.

Estos pozos se encuentran ubicados de tal manera que se puede observar una línea característica, calificándose como una línea de evaporación isotópica del campo, esto se debe a que los isotopos han tenido una evolución a medida que se desplazan desde la zona de ascenso de fluidos del reservorio hacia la zona de descarga del mismo (pozos SJ6-2 y SJ4-1) con lo cual se muestra un aumento de su concentración (enriquecimiento) que varía en cada pozo. En el caso del pozo SJ5-1 tiene los valores más bajos en comparación a los demás pozos, esto hace referencia de una posible zona de upflow del sistema geotérmico, debido a que posiblemente provengan del fluido madre. Esto se refuerza con la gráfica de entalpía & cloruros en donde se encuentran todos los pozos productores.

En el diagrama de entalpía & cloruro el pozo SJ5-1 se encuentra ubicado en una zona de alta entalpía y bajo contenido relativo de cloruros, lo cual es característico de fluidos que se encuentran cercanos a la zona de ascenso del reservorio geotérmico, en esa misma zona se encuentran los pozos, SJ12-2, SJ12-3, SJ12-4 y SJ12-5, los cuales podrían corresponder a la misma zona de upflow. En el caso de los pozos SJ6-1 y SJ6-3, se encuentran ubicados en la zona de dilución caracterizada por un contenido bajo de cloruros y de entalpía, esto se corresponde con la gráfica de bicarbonatos realizada en el pozo SJ6-1 y probablemente ese mismo proceso se de en el pozo SJ6-3 que se encuentra ubicado cerca de la zona SJ6-1. Los pozos SJ6-2, SJ4-1, SJ9-1 y SJ9-4 se encuentran ubicados en la zona de pérdida de vapor. Lo cual se correlaciona con los mencionado anteriormente con los isotopos (SJ6-2 y 9-1) e indica que dichos fluidos ya poseen cierto recorrido alejándose de la zona de ascenso.

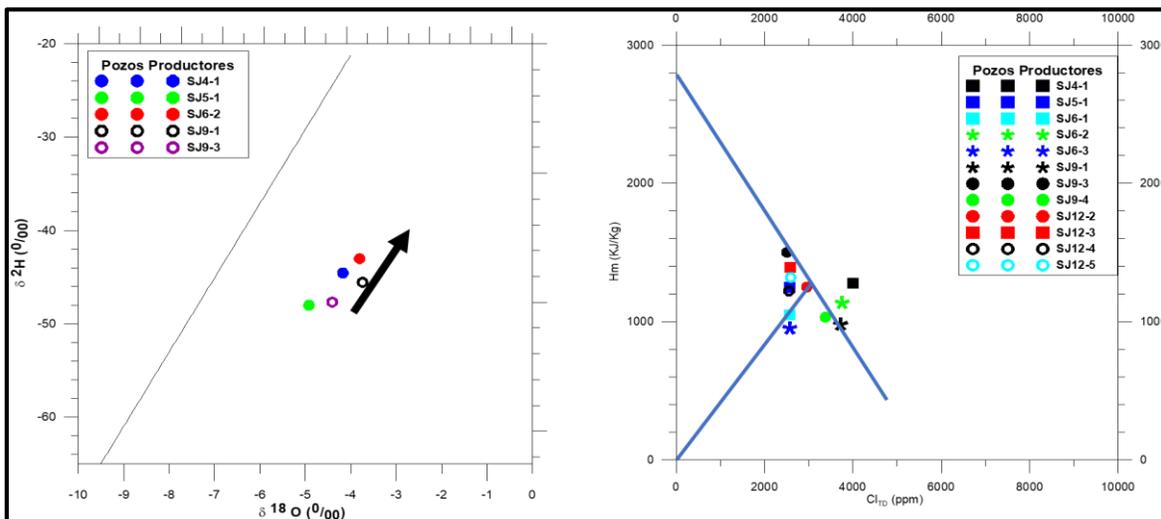


Figura 35. Diagrama de isótopos y Entalpía & cloruros

En el diagrama de gases de Giggenbach (ver figura 36) se observa que los pozos SJ4-1, SJ6-1, SJ6-3 y SJ9-4 se encuentran con tendencia a una zona de fluido con influencia meteórica, indicando que son alimentados por un fluido más joven o que se encuentran a mayor distancia de la fuente de calor. En el caso de los pozos SJ5-1, SJ12-2, SJ12-4, SJ12-3, SJ12-5 y SJ9-3 se encuentran situados hacia una zona con influencia magmática debido a que posiblemente el upflow que fue ubicado en la zona SJ5-1 con el diagrama de isotopos, provenga de la zona de los SJ12, también esto indica que están más cerca de un fluido de origen o la fuente de calor, que en este caso podría tratarse del intrusivo mapeado al este del campo cercano a la zona de los SJ12, así mismo se observa que a medida que los pozos se alejan de esta zona estos van reduciendo su contenido magmático tal como sucede con el pozo SJ5-1 así como se indica en la figura 36 mediante la flecha con color verde.

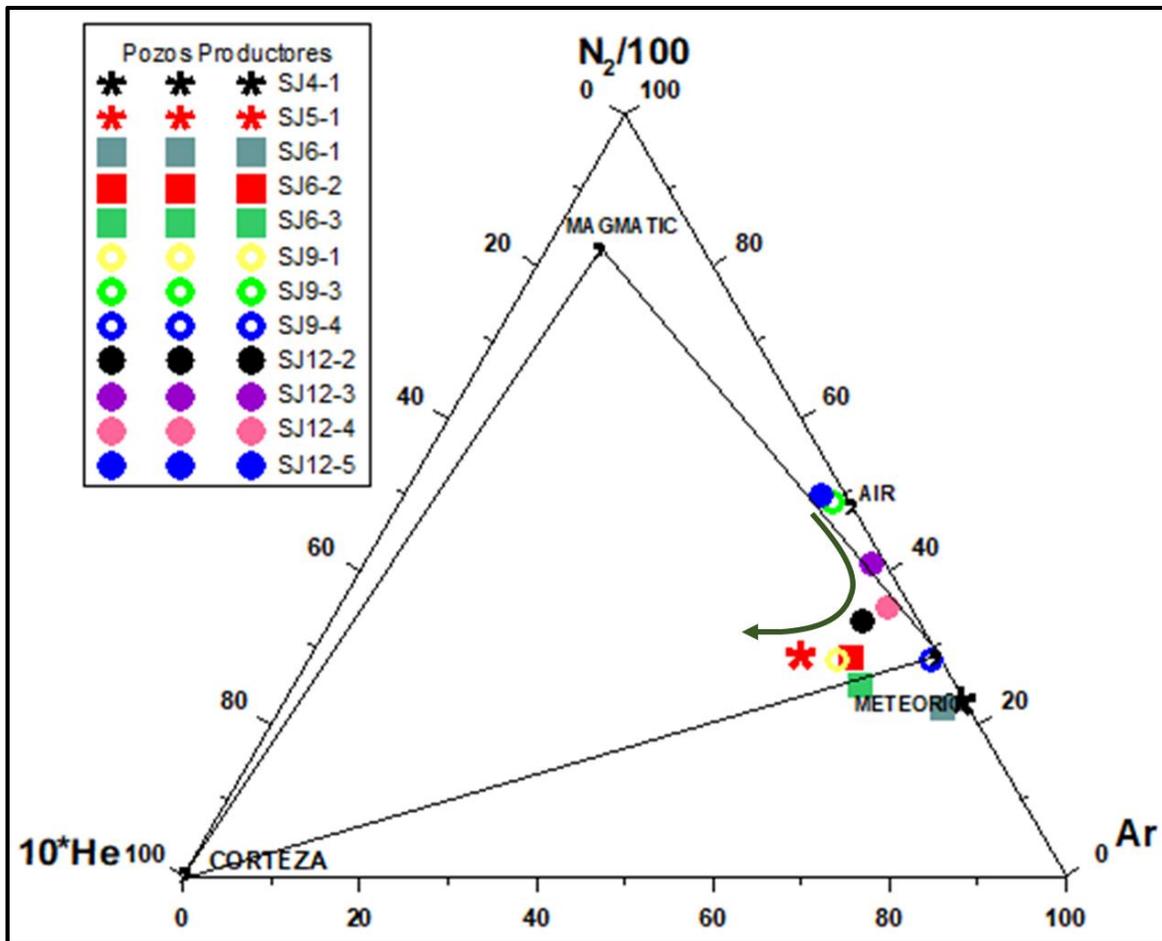


Figura 36. Diagrama triangular de Giggenbach N₂-He-Ar

En la figura 37, se observa el diagrama de minerales en donde se ve representado gráficamente el estado del ensamble mineralógico de cada pozo productor en su inicio y en la actualidad.

Se observa que en el caso de los pozos SJ12 existe tendencia a ubicarse en la zona de la mica potásica lo cual se corresponde con su cercanía a la fuente de calor ya que su asociación mineralógica refleja la correlación con un mineral primario característico de sistemas volcánicos como los presentes en la zona; pozos como el SJ6-1, SJ6-3 y SJ9-4 se ubican separados de los demás pozos en la zona de la Epidota (mineral de alta temperatura), lo cual resulta un tanto contradictorio ya que anteriormente se vio que la zona de estos pozos es fría y con rasgos de influencia de aguas de menor temperatura, sin embargo es posible que dicha epidota se formase en tiempos más antiguos en los cuales existió mayor temperatura y por lo tanto se trata de una zona en enfriamiento.

En el diagrama se observan algunos cambios importantes en algunos pozos desde el inicio hasta la actualidad de su operación, los cuales se discuten a continuación:

En el caso del pozo SJ12-3 no se observa que ha cambiado su mineralogía, en comparación al SJ12-2 que sí ha experimentado un desplazamiento importante; ambos pozos de acuerdo al análisis de entalpías experimentaron un exceso de vapor al inicio de su producción y en la actualidad en los dos ocurre un proceso de enfriamiento por ebullición localizada, ese proceso se observa que afecta en la mineralogía del SJ12-2, caso contrario al SJ12-3 debido probablemente a que este se encuentra situado más cerca de la fuente de calor, y estos procesos no hacen que varíen su mineralogía.

En el caso del pozo SJ5-1 se observa un movimiento hacia la K-mica producto de un descenso en el pH debido a un proceso de desgasificación por pérdida de vapor que posiblemente se transporte hacia los pozos SJ6-2 y SJ4-1. El pozo SJ6-2 se trasladó de la zona de K-mica a la zona de equilibrio entre la K-mica y la wairakita, este movimiento es producto del exceso de vapor en el que se encontraba al inicio de la producción, que con el tiempo y el efecto de extracción se fue disminuyendo hasta llegar en la actualidad a un proceso de enfriamiento por ebullición como se menciona anteriormente en la sección de la entalpía.

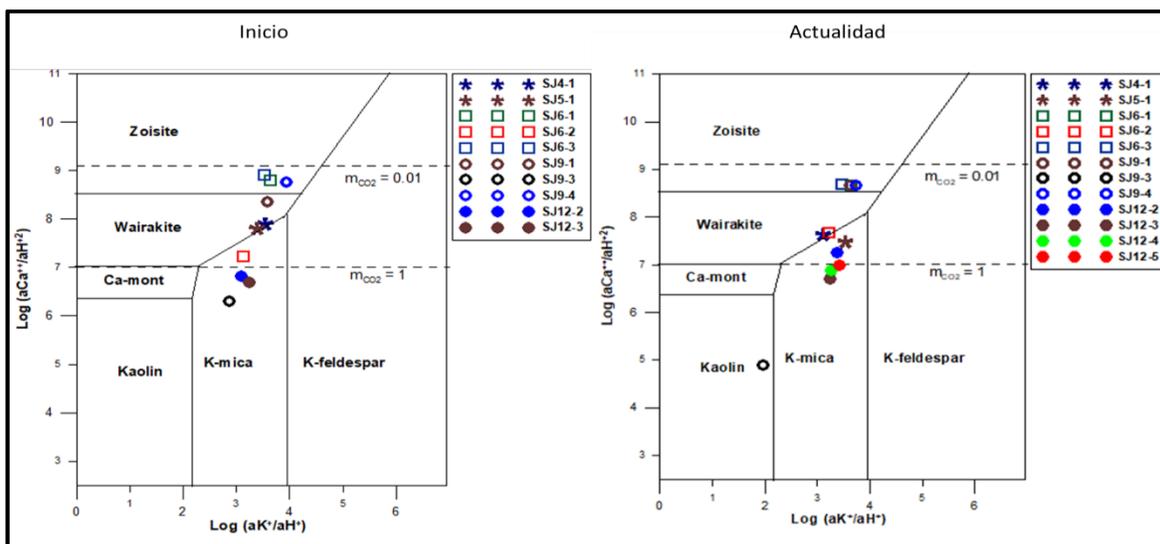


Figura 37. Diagrama de Equilibrio Mineral de fluidos en el reservorio

Integración de los hallazgos.

Con base en todo el análisis anterior, la figura 38, presenta zonificación de los principales hallazgos encontrados mediante la evaluación de los pozos, en esta se observa la existencia de tres zonas con procesos y características similares los cuales se describen a continuación:

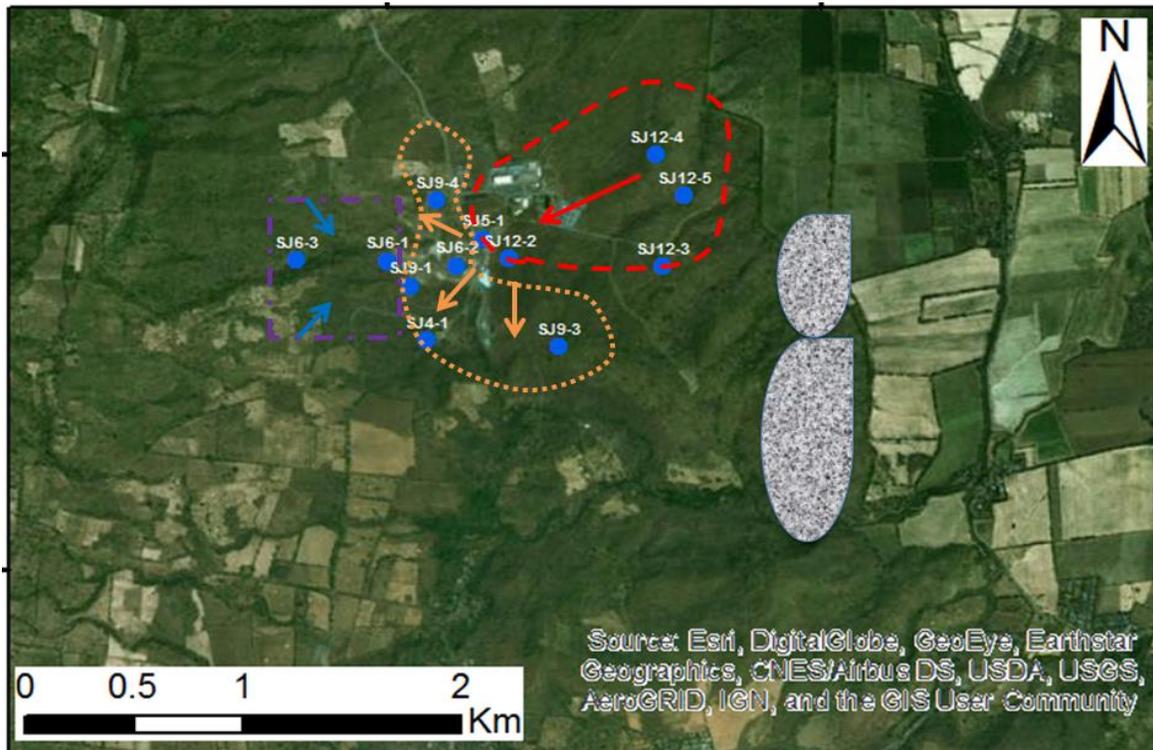


Figura 38. Zonificación geotérmica del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate.

Zona de ascenso de fluidos calientes: Delimitada en color rojo en la figura 38, esta zona comprende los pozos SJ12 y SJ5-1 los cuales en sus inicios presentan exceso de vapor causado por ebullición (más visible en el pozo SJ5-1) y posteriormente han presentado equilibrio de las entalpías evolucionando en los últimos años al reflejo de ebullición localizada (menos pronunciada que al principio), sus contenidos isotópicos, cloruros, gases y ensamble mineralógico indican que estos son los fluidos más íntegros del campo, los cuales son característicos de una zona de upflow; sin embargo cabe mencionar que la condición de dicho fluidos es muy cercana al punto de ebullición, es decir que aunque poseen alta temperatura la presión o la carga hidráulica no es suficiente para llevar los fluidos a la condición de líquido comprimido por lo cual se genera ebullición localizada y el manejo de la presión de operación del pozo es importante para controlar la ebullición en el mismo.

Zona de transición: Delimitada en color naranja en la figura 38, esta zona comprende los pozos SJ9-1, SJ9-4, SJ4-1 y SJ6-2 los cuales presentan condiciones isotópicas más positivas con contenidos de cloruros mayores, esto es característico de fluidos que se

alejan de la zona de ascenso y por lo tanto experimentan pérdida de vapor evidenciado en una ebullición más pronunciada en algunos casos, a su vez indican las direcciones de movimiento de los fluidos del reservorio hacia su descarga. Es importante notar que el pozo SJ9-1 presenta cierta desviación de este comportamiento en algunos análisis ya que se encuentra cerca de una zona donde existe entrada de fluidos de menor temperatura, la cual se describe en el párrafo siguiente. Es importante hacer notar que el pozo SJ9-4 se incluye dentro de este grupo ya que su entalpía de Na-K-Ca refleja que los fluidos de este pozo provienen de una zona de mayor temperatura y por ende estos se encuentran ya alejándose de la zona de ascenso.

Zona de influencia de fluidos fríos: Delimitada en color morado en la figura 38, esta zona comprende los pozos SJ6-1 y SJ6-3, esta presenta condiciones de menores geotemperaturas y evidencia de entrada de fluidos de menor temperatura reflejado en sus contenidos relativos de gases, cloruros y entalpias, esto es indicativo de una zona limítrofe del campo explotable y que a su vez podría estar recargando el reservorio ya que la carga hidráulica encontrada en esta zona es alta y los fluidos presentes en la misma se ubican en la condición de líquido comprimido.

10. Conclusiones

La investigación sobre la evolución del estado geoquímico del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, resultó ser una base primordial para la caracterización del reservorio, todo esto mediante un continuo monitoreo del campo y una base de datos de parámetros geoquímicos importantes, utilizados como herramienta para su respectiva interpretación y determinación de los cambios ocurridos en el tiempo de acuerdo a los procesos que experimenta el reservorio producidos por la explotación del recurso geotérmico.

Por medio de la interpretación geoquímica de la información disponible se determinó que pozos como SJ4-1, SJ5-1, SJ6-2, SJ9-3, SJ9-4, SJ12-2 y SJ12-3, presentan evidencia de ebullición la cual en algunos casos se da de forma localizada en la cercanía de la zona de alimentación del pozo y en otros en una mayor extensión generando presencia de exceso de vapor en algunas zonas del reservorio, esto sugiere la existencia de una capa de vapor importante en zonas del campo donde las condiciones geológicas estructurales permiten en movimiento segregado del vapor (fenómeno de segregación de fases). Se comprobó también en el campo la existencia de pozos que se encuentran en equilibrio respecto al análisis de E_{med} , E_{NaKCa} y E_{SiO_2} , los cuales son los pozos SJ6-1, SJ6-3, SJ12-4 y SJ12-5, lo cual indica que no hay cambios de temperatura y presión extremos por la extracción en los alrededores de sus zonas de alimentación, esto debido a que los dos primeros casos presentan recarga de agua de menor temperatura y los dos últimos se encuentran muy cercanos a la zona de ascenso de fluidos, condiciones que les confieren un aporte rápido de fluidos en respuesta a la extracción.

De forma global el comportamiento observado en el diagrama de Giggenbach refleja la condición de fluidos evaporados de alta temperatura sobre todo al inicio de la producción en donde se presentaba un exceso de vapor favorecido por que el campo no era explotado en ese momento, en la actualidad se observa un enfriamiento por ebullición causado por la explotación de ha ocurrido a través del tiempo. Con la excepción los pozos SJ6-1 y SJ9-1 que presentan una infiltración de aguas con temperaturas más bajas, lo cual se debe a que estos pozos se encuentran ubicados alejados de la fuente de calor.

En el análisis de resultados integrados de pozos de acuerdo a los comportamientos mostrados en los Diagramas de Isótopos de fluidos en el reservorio, Diagrama triangular de Giggenbach N_2 -He-Ar, Diagrama Cloruro & Entalpía, se puede resaltar que existen tres zonas de comportamientos en el área del reservorio:

- Zona de ascenso de fluidos calientes característica de equilibrio en las entalpías y condiciones cercanas al punto de ebullición.
- La zona de transición que indica condiciones de las direcciones de movimiento de los fluidos del reservorio hacia su descarga.
- Zona de influencias de fluidos fríos de menor temperatura, indicativo de una zona limítrofe del campo explotable.

11. Agradecimientos

A Dios.

Por habernos permitido llegar con determinación, perseverancia y salud, para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Al Ingeniero Noel López, quién nos enriqueció de conocimientos y orientó en la realización del trabajo de graduación.

A las instituciones de LaGeo, UES, UNU-GTP, NDF, ICEIDA, por habernos brindado la oportunidad de enriquecer los conocimientos e invertir en el proceso de formación integral.

12. Referencias bibliográficas

- D'AMORE, F. (1991). APPLICATIONS OF GEOCHEMISTRY IN GEOTHERMAL RESERVOIR DEVELOPMENT. *SERIES OF TECHNICAL GUIDES ON THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY*, 133-135.
- D'AMORE, F. (1991). APPLICATIONS OF GEOCHEMISTRY IN GEOTHERMAL RESERVOIR DEVELOPMENT. *SERIES OF TECHNICAL GUIDES ON THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY*, 224-228.
- D'AMORE, F. (1991). GAS GEOCHEMISTRY AS A LINK BETWEEN GEOTHERMAL EXPLORATION AND EXPLOTATION. *SERIES OF TECHNICAL GUIDES ON THE USE OF GEOTHERMAL ENERGY*, 95-112.
- GIGGENBACH, W. (1984). GRAPHICAL TECHNIQUES FOR THE EVALUATION OF WATER/ROCK EQUILIBRATION CONDITIONS BY USE OF Na, K, Mg AND Ca CONTENTS OF DISCHARGE WATERS. *NZ Geothermal*, 37-38.
- Henley, R. W., Truesdell, A. H., Barton Jr, P. P., & Whitney, J. A. (1984). FLUID-MINERAL EQUILIBRIA IN HYDROTHERMAL SYSTEMS. *ECONOMIC GEOLOGY*, 70-79.
- Prado, L. L., & Revilla, D. M. (2014). *Evaluación de las características Termo hidáulicas desde la perforación hasta la evaluación de descarga en pozos geotérmicos multilaterales*. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico (PREG).
- Truesdell et al. (1984). FLUID-MINERAL EQUILIBRIA IN HYDROTHERMAL SYSTEMS. *ECONOMIC GEOLOGY*, 22-26.
- Truesdell, A., Lippmann, M., Quijano, J., & D'Amore, F. (1995). Chemical and physical indicators of reservoir processes In exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. *World Geothermal Congress*, 2-4.

13. Apéndices

Cuadros del cálculo de las actividades para el diagrama de equilibrio mineral

SJ4-1 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00080353	molar	
[K]	0.00822243	molar	
[H+]	2.0091E-06	molar	
aCa	0.00016231		
aK	0.00499101		
aH+	1.4325E-06	pH	5.84391047
Log (aCa/(aH	7.89817231		
Log(aK/aH)	3.54209916		

SJ4-1 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00312608	molar	
[K]	0.00822243	molar	
[H+]	5.5081E-06	molar	
aCa	0.00066273		
aK	0.00499101		
aH+	3.9658E-06	pH	5.4016675
Log (aCa/(aH	7.62467087		
Log(aK/aH)	3.09985619		

SJ5-1 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00033497	molar	
[K]	0.00826038	molar	
[H+]	2.0749E-06	molar	
aCa	6.4983E-05		
aK	0.00498101		
aH+	1.4711E-06	pH	5.83235376
Log (aCa/(aH	7.47750926		
Log(aK/aH)	3.52967108		

SJ5-1 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00108643	molar	
[K]	0.00794328	molar	
[H+]	3.1189E-06	molar	
aCa	0.00024553		
aK	0.00498044		
aH+	2.2737E-06	pH	5.64327247
Log (aCa/(aH	7.67665338		
Log(aK/aH)	3.34054001		

SJ6-1 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00134276	molar	
[K]	0.00480839	molar	
[H+]	9.6605E-07	molar	
aCa	0.00031824		
aK	0.00306776		
aH+	7.1005E-07	pH	6.14871266
Log (aCa/(aH	8.80017367		
Log(aK/aH)	3.63553334		

SJ6-1 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00137088	molar	
[K]	0.00564937	molar	
[H+]	1.1298E-06	molar	
aCa	0.00031942		
aK	0.00358735		
aH+	8.2814E-07	pH	6.08189603
Log (aCa/(aH	8.66814797		
Log(aK/aH)	3.63666975		

SJ6-2 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00134896	molar		
[K]	0.00874984	molar		
[H+]	5.5463E-06	molar		
aCa	0.00026575			
aK	0.00522365			
aH+	3.9378E-06		pH	5.40474165
Log (aCa/(aH	7.23394953			
Log(aK/aH)	3.12271598			

SJ6-2 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00255859	molar		
[K]	0.0091622	molar		
[H+]	4.592E-06	molar		
aCa	0.00051683			
aK	0.00548816			
aH+	3.2787E-06		pH	5.48430179
Log (aCa/(aH	7.68195495			
Log(aK/aH)	3.22372861			

SJ6-3 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00190546	molar		
[K]	0.00453942	molar		
[H+]	1.3428E-06	molar		
aCa	0.00047827			
aK	0.00295062			
aH+	9.9902E-07		pH	6.00042706
Log (aCa/(aH	8.68052785			
Log(aK/aH)	3.47034042			

SJ6-3 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00133968	molar		
[K]	0.00336512	molar		
[H+]	8.8716E-07	molar		
aCa	0.00038181			
aK	0.00228828			
aH+	6.7601E-07		pH	6.17004503
Log (aCa/(aH	8.92193492			
Log(aK/aH)	3.52955394			

SJ9-1 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00171396	molar		
[K]	0.00758578	molar		
[H+]	1.6943E-06	molar		
aCa	0.00032565			
aK	0.00446802			
aH+	1.1945E-06		pH	5.92281088
Log (aCa/(aH	8.35837537			
Log(aK/aH)	3.57292618			

SJ9-1 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00309742	molar		
[K]	0.00818465	molar		
[H+]	1.652E-06	molar		
aCa	0.00064117			
aK	0.00492716			
aH+	1.1845E-06		pH	5.92648084
Log (aCa/(aH	8.65993203			
Log(aK/aH)	3.61907734			

SJ9-3 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00056105	molar	
[K]	0.00939723	molar	
[H+]	1.0715E-05	molar	
aCa	0.00011838		
aK	0.0057699		
aH+	7.7042E-06	pH	5.11327111
Log (aCa/aH)	6.29982467		
Log(aK/aH)	2.87443948		

SJ9-3 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00047315	molar	
[K]	0.00555904	molar	
[H+]	5.3456E-05	molar	
aCa	0.00013248		
aK	0.00379127		
aH+	4.052E-05	pH	4.39233079
Log (aCa/aH)	4.90681962		
Log(aK/aH)	1.97111517		

SJ9-4 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00165196	molar	
[K]	0.00751623	molar	
[H+]	1.205E-06	molar	
aCa	0.00035022		
aK	0.00459242		
aH+	8.6763E-07	pH	6.0616675
Log (aCa/aH)	8.66767087		
Log(aK/aH)	3.72370871		

SJ9-4 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00092257	molar	
[K]	0.00814704	molar	
[H+]	7.9799E-07	molar	
aCa	0.00018913		
aK	0.00492081		
aH+	5.7136E-07	pH	6.24308698
Log (aCa/aH)	8.76292782		
Log(aK/aH)	3.93512392		

SJ12-2 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00044668	molar	
[K]	0.00744732	molar	
[H+]	5.035E-06	molar	
aCa	8.487E-05		
aK	0.00444605		
aH+	3.5547E-06	pH	5.4491953
Log (aCa/aH)	6.8271442		
Log(aK/aH)	3.09716963		

SJ12-2 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases			
[Ca]	0.00051642	molar	
[K]	0.00903649	molar	
[H+]	3.2584E-06	molar	
aCa	9.2955E-05		
aK	0.00529539		
aH+	2.2776E-06	pH	5.64252282
Log (aCa/aH)	7.25331815		
Log(aK/aH)	3.36642044		

SJ12-3 Inicio

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00021478	molar		
[K]	0.00816582	molar		
[H+]	4.0458E-06	molar		
aCa	3.9091E-05			
aK	0.004826			
aH+	2.828E-06		pH	5.54852282
Log (aCa/aH)	6.68911704			
Log(aK/aH)	3.23211031			

SJ12-3 Actualidad

Para diagrama de equilibrio de fases				
[Ca]	0.00026915	molar		
[K]	0.00905733	molar		
[H+]	4.3451E-06	molar		
aCa	4.6294E-05			
aK	0.00526231			
aH+	3.0025E-06		pH	5.52252195
Log (aCa/aH)	6.71057235			
Log(aK/aH)	3.24369809			