

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**



**EVOLUCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ESPECIES QUÍMICAS Y
FENÓMENOS FÍSICOS EN EL RESERVORIO DEL CAMPO GEOTÉRMICO
MOMOTOMBO, NICARAGUA**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Ruddy Alfredo Romero Espinoza.

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

Tutora:

PhD. Indiana García Granados

Managua, Nicaragua

Noviembre, 2022

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
III. MARCO DE REFERENCIA	5
3.1 Estructura Geológica del Campo Geotérmico de Momotombo	5
3.1.1 Características generales del campo	6
3.1.2 Descripción del proceso geotérmico	6
3.1.3 Modelo conceptual del reservorio geotérmico Momotombo	7
3.2 Clasificación de las Aguas Geotérmicas	8
3.2.1 Aguas cloruradas sódicas	8
3.2.2 Aguas ácidas sulfatadas.....	8
3.2.3 Aguas sulfatadas ácidas cloruradas	9
3.2.4 Aguas bicarbonatadas sódicas.....	9
3.3 Diagramas de Clasificación de Aguas Geotérmicas	10
3.3.1 Diagramas d'Amore y Panichi	10
3.3.2 Diagrama de Piper-Hill-Langelier.....	12
3.3.3 Diagramas triangulares	12
3.3.3.1 Diagrama Na-K-Mg	12
3.3.3.2 Diagrama Cl-SO ₄ -HCO ₃	14
3.4 Geotermómetros Acuosaos	14
3.4.1 Geotermómetros catiónicos.....	16
3.4.2 Geotermómetro de sílice	16
3.5 Modelo de Mezcla Entalpía vs Cloruro de Reservorio	17
3.6 Modelado de Especiación Química	18
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	20
4.1 Tipo de Estudio.....	20
4.2 Universo	20

4.4 Clasificación del Fluido Producido en los Pozos Productores del Campo Geotérmico Momotombo	22
4.4.1 Muestreo de fluidos geotérmicos	23
4.4.2 Muestreo in-situ	23
4.4.3 Muestreo de agua separada	25
4.4.4 Muestreo de vapor geotérmico	26
4.4.5 Métodos analíticos.....	27
4.4.6 Evaluación de la calidad de los resultados	28
4.4.7 Clasificación de las aguas geotérmicas	29
4.5 Estimación de Temperaturas Profundas del Reservorio Geotérmico Momotombo.....	29
4.6 Identificación de Procesos Físicos que ha Experimentado el Reservorio Geotérmico Momotombo	29
4.6.1 Cálculo de concentración de especie química en el reservorio.....	29
4.7 Modelación de Especiación Química	31
4.8 Variables de Estudio	31
V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	33
5.1 Evaluación de Antecedentes Geoquímicos del Campo Geotérmico Momotombo	33
5.1.1 Diagrama de Piper	34
5.1.2 Diagrama triangular (Na-K-Mg)	35
5.1.3 Diagrama triangular (Cl-SO ₄ -HCO ₃)	50
5.2 Estimación de Temperaturas Profundas del Reservorio Geotérmico Momotombo.....	52
5.3 Identificación de los Procesos Físicos que ha Experimentado el Reservorio Geotérmico utilizando el Modelo de Mezcla.....	68
5.4 Evaluación de Posibles Problemas por Deposición Mineral que puede Ocurrir a Condiciones de Reservorio y/o en Superficie durante la Explotación y que Influyan en la poca Productividad del Campo Geotérmico	79
VI. CONCLUSIONES.....	86
VII. RECOMENDACIONES.....	87
VIII. LISTA DE REFERENCIAS	88
ANEXO A.....	91
ANEXO B.....	93
ANEXO C	94
ANEXO D	95

ANEXO E.....	97
ANEXO F.....	98
ANEXO G.....	99
ANEXO H.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros d'Amore y Panichi.....	10
Tabla 2	Ecuaciones empíricas de geotermómetros acuosos.....	16
Tabla 3	Coodernadas, elevación, profundidad de pozos productores.....	23
Tabla 4	Punto de toma de muestra tanto para agua como vapor.....	24
Tabla 5	Condiciones de preservación y tipo de envase.....	26
Tabla 6	Substancia y su metodología de medición.....	28
Tabla 7	Calidad de los resultados de los antecendentes.....	32
Tabla 8	Calidad de los resultados del DLG.....	33
Tabla 9	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-4.....	54
Tabla 10	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-26.....	55
Tabla 11	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-27.....	56
Tabla 12	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-31.....	58
Tabla 13	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-35.....	59
Tabla 14	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-36.....	61
Tabla 15	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-38.....	62
Tabla 16	Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-43.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de planta de energía de condensación con ciclo binario.....	6
Figura 2	Modelo conceptual del reservorio geotérmico Momotombo.....	7
Figura 3	Esquema de tipos de aguas.....	10
Figura 4	Comparaciones entre las representaciones de los datos quimicos en el gráfico de diamante y diagrama rectangular.....	11
Figura 5	Diagrama de Pippet-Hill-Langelier.....	12
Figura 6	Diagrama Na-K-Mg.....	14
Figura 7	Entalpía de producción vs cloruros calculados a descarga total.....	17
Figura 8	Ubicación de los pozos del campo geotérmico Momotombo.....	20
Figura 9	Esquema del escenario geológico regional de Nicaragua.....	21

Figura 10	Puntos de muestreo tanto para agua como para vapor .	23
Figura 11	Evases para muestreo de agua en el campo geotérmico Momotombo	25
Figura 12	Bulbo de Giggenbach de 300 mL de capacidad para tomas de muestra de gases ..	26
Figura 13	Diagrama de piper para los pozos productores del campo geotermico Momotombo	34
Figura 14	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-4	35
Figura 15	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-23	36
Figura 16	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-26	37
Figura 17	Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-26	38
Figura 18	Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-27	39
Figura 19	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-27	39
Figura 20	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-31	40
Figura 21	Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-31	40
Figura 22	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-35	41
Figura 23	Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-35	42
Figura 24	Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-35	42
Figura 25	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-36	43
Figura 26	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-38	44
Figura 27	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-41	45
Figura 28	Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-41	45
Figura 29	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-42	46
Figura 30	Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-42	46
Figura 31	Gráfica de los datos de produccion para el pozo MT-42	47
Figura 32	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-43	47
Figura 33	Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-43	48
Figura 34	Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor OM-53	49
Figura 35	Diagrama triangular (Cl-SO ₄ -HCO ₃) para los pozos productores del campo geotermico Momotombo	50
Figura 36	Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 para los pozos productores del campo geotérmico Momotombo	50
Figura 37	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-4	52
Figura 38	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-4	52
Figura 39	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-23	53
Figura 40	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-23	54
Figura 41	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-26	55
Figura 42	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-26	56
Figura 43	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-27	57
Figura 44	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-27	57
Figura 45	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-31	58
Figura 46	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-31	59
Figura 47	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-35	60
Figura 48	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-35	60
Figura 49	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-38	62

Figura 50	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-38.....	62
Figura 51	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-41.....	63
Figura 52	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-41.....	64
Figura 53	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-42.....	64
Figura 54	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-42.....	65
Figura 55	Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-43.....	66
Figura 56	Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo OM-53.....	67
Figura 57	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del campo geotermico momotombo..	67
Figura 58	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-4	68
Figura 59	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-4	69
Figura 60	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-23.....	69
Figura 61	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-23	70
Figura 62	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-26.....	71
Figura 63	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-26	71
Figura 64	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-27.....	72
Figura 65	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-27	72
Figura 66	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-31.....	73
Figura 67	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-31	73
Figura 68	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-35.....	74
Figura 69	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-35	74
Figura 70	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-41.....	75
Figura 71	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-41	75
Figura 72	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-42.....	76
Figura 73	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-42	76
Figura 74	Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-43.....	77
Figura 75	Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-43	78
Figura 76	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-4	79
Figura 77	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-23.....	79
Figura 78	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-26.....	80
Figura 79	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-27.....	81
Figura 80	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-31.....	81
Figura 81	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-35.....	82
Figura 82	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-38.....	82
Figura 83	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-41.....	83
Figura 84	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-42.....	84
Figura 85	Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-43.....	84

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por la oportunidad que me dio de cumplir mi meta.

A mis padres Nidia y Héctor por apoyarme en todo momento, por el apoyo incondicional que me han brindado y todas las oportunidades que me dieron en el transcurso de mi vida.

A Dara con quien he compartido 4 años, y siempre me ha brindado su apoyo, comprensión y amor.

A mi tutora la Dra. Indiana García porque siempre estuvo cuando la he requerido y conocimiento brindado a lo largo de la tesis.

Al Ingeniero Tiffer Martinez por su apoyo en darme el permiso de utilizar los datos del laboratorio de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL).

A la Licenciada Gioconda Guevara por su apoyo y gestión de los permisos a lo largo de este trabajo.

A los Ingenieros Kelym Martinez y Lisbeth Herrera por su apoyo en compartir información.

Al Ing. Guillermo Martinez, por brindarme un poco de su conocimiento y además de iniciar esta investigación conmigo.

Al Departamento de laboratorio geoquímico de ENEL, por recolectar los datos y compartir información.

Gracias al personal de Momotombo Power Company (MPC) en especial a los Ing. Lenin Prado y Arlo Nicaragua por haberme compartido datos y apoyo para el desarrollo de mi tesis profesional en la planta Momotombo. A los Ing. José Guido y Kevin Gutiérrez por haberme brindado información.

DEDICATORIA

Dedico de manera especial a Dios, porque él me dio la vida y la oportunidad de haber culminado.

A Nidia Dolores Espinoza por el apoyo incondicional que me dio a lo largo de mi carrera, por siempre creer en mí desde el principio, por luchar para que no me faltara nada. Así que esta tesis de culminación es un triunfo compartido. Muchísima gracias mamá, espero que siempre me apoyes desde el cielo, *ya que tú eres mi ángel.*

RESUMEN

En este trabajo monográfico demuestra los diferentes procesos físicos que han sufrido los pozos productores del Campo Geotérmico Momotombo desde el 2015 al 2021 utilizando tanto el modelo de mezcla entalpía - cloruro y haciendo una comparación de la entalpía medida con las entalpías de los geotermómetros. Los pozos MT-23, MT-26, MT-27, MT-31 y MT-35 presentan un proceso de dilución para el año 2015 al 2016, luego afectados por reinyección en los cuales se demuestra con el modelo de mezcla y el monitoreo del ion cloruro, además en estos años el índice de saturación de calcita disminuye debido al proceso de dilución.

Con el diagrama triangular (Na-K-Mg) se encontró que los pozos MT-23, MT-26 y MT-27 están por debajo de la curva de equilibrio. El pozo MT-4 para los años 2020 y 2021 su entalpía de producción y cloruros se ven afectados por el ingreso al sistema del pozo MT-38. Los pozos productores del campo están insaturados en anhidrita, pero saturados en cuarzo y en calcita por encima 170°C a excepción de los pozos MT-41 y MT-43 con respecto a la calcita.

Palabras Claves: geotermómetro, reinyección, dilución, entalpía, pozos

I. INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país dotado de un alto potencial geotérmico de 1 519 MW, que está ligado a la presencia en su territorio de la cordillera volcánica activa que se extiende desde el Golfo de Fonseca en dirección sureste hasta llegar a la frontera con Costa Rica, con una extensión de 380 Km (ENEL, 2017). Este potencial geotérmico es una oportunidad para que la nación satisfaga una parte importante de su demanda de energía mediante el uso de este recurso limpio y renovable.

La energía geotérmica podría lograr para Nicaragua un cambio significativo y gradual en la matriz energética, así como también contribuir al medio ambiente de manera positiva porque la energía geotérmica es una fuente de energía emisora de dióxido de carbono relativamente baja (Mendieta, 2009).

Actualmente, en Nicaragua existen dos campos geotérmicos en explotación: el campo geotérmico San Jacinto Tizate, ubicado en la comarca de San Jacinto, municipio de Telica, a 20 Km del Departamento de León, y el campo geotérmico Momotombo. Tanto la planta geotérmica de San Jacinto como la planta geotérmica de Momotombo, cuentan con una capacidad instalada de 77 MW.

El campo geotérmico de Momotombo fue explotado inicialmente por el Instituto Nicaragüense de Energía (INE) y luego por la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL) desde 1983, con la instalación de la primera turbina de vapor de 35 MW. La segunda turbina de vapor de igual MW fue instalada en 1989. En este período, la planta llegó a generar 57 MW por unos dos meses, pero luego la producción de vapor inició un descenso paulatino hasta llegar a los 10 MW en 1999. La disminución es debido a la sobreexplotación, manejo inadecuado y bajos volúmenes de reinyección del campo en los años anteriores a 1998, provocando una pérdida de presión en el reservorio. La presión del yacimiento disminuyó a una tasa de 2 bares/año (Porrás E. A., 2005), lo que a su vez facilitó una rápida infiltración de un frente de agua menos caliente (150°C-190°C) desde el este del campo.

Durante la explotación del campo geotérmico Momotombo varios de los pozos productores han cambiado sus condiciones, reduciendo su productividad e inclusive tornándose improductivos debido a varias razones dentro de las cuales se encuentran: daños estructurales, incrustaciones, enfriamiento y otros procesos relacionados con la evolución de un reservorio en condiciones de intensa explotación (Comisión Nacional de Energía, 2001).

El campo geotérmico Momotombo ha sufrido diferentes procesos físicos, por ejemplo, en 1989 en un primer informe parcial (Quijano, 1989), sobre la composición química e isotópica de los fluidos producidos por los pozos geotérmicos, se encontró que el proceso predominante era ebullición a profundidad de 330 m a 500 m y no había indicios de un enfriamiento prematuro, a primer instancia se podría decir que esto era beneficioso para la producción de electricidad (se producía más vapor) pero sin embargo, se estaba sobrexplotando el campo.

En junio de 1999, el Gobierno asignó la operación comercial del recurso a la Empresa Israelí ORMAT Momotombo Power Company, iniciando un proceso de recuperación de vapor, con lo cual la planta geotérmica incrementó la generación hasta 24 MW, instalando en diciembre 2002 una Planta Convertidora de Energía (OEC- Ormat Energy Converter) o planta binaria de 8 MW, con lo cual la planta geotérmica incrementó su generación en 32 MW (Ministerio de Energía y Minas, 2009).

Como parte de la recuperación de vapor, ENEL perforó cuatro pozos profundos, de los cuales tres resultaron productores, aun así, la producción de vapor continuó descendiendo debido al problema de incrustación de carbonato en los pozos productores (Ministerio de Energía y Minas, 2009).

En octubre del 2018 el pozo MT-23 deja de producir vapor y solamente se aprovecha la fase líquida la cual es utilizada para el Ciclo Binario (OEC). Este pozo se encuentra en la parte somera del reservorio (< 850 m de profundidad), en esta parte también se encuentran el MT-26 (profundidad 640 m) y MT-27 (profundidad 442 m) estos pozos son afectados por el mismo proceso físico que perturba al MT-23.

Esta investigación surgió con la necesidad de entender ese cambio químico que ocurre en el reservorio. La variación de la relación Na/K, Na/K/Ca indica cambio en la temperatura del reservorio al igual que las concentraciones de sílice (SiO₂). Estas temperaturas estimadas de los geotermómetros o medidas utilizando un equipo llamado kuster junto a las concentraciones de cloruro se logró identificar los procesos físicos (ebullición, dilución, enfriamiento, etc.) que perturban al reservorio a los diferentes niveles de profundidad. Además, las otras especies químicas proporcionaron información sobre posibles problemas de incrustación.

Por las razones anteriores se requirió desarrollar este estudio el cual hizo uso del historial de temperaturas calculadas con geotermómetros, índice de saturación para cada pozo, concentraciones de cloruros de reservorio con respecto al tiempo, iso contornos (geotermómetros, cloruro de reservorio, entalpia medida), y diagramas triangulares esto con el propósito de brindar información en la toma de decisiones para un mejor manejo del campo y una explotación sostenible.

El trabajo monográfico consistió en identificar los procesos físicos en el reservorio por medio del estudio de la evolución de las especies químicas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Li^+ , Cl^- , B, SO_4^{2-} , HCO_3^- , F^- , NH_4^+ , CO_2 , H_2S , SiO_2) del fluido del reservorio, a través del monitoreo geoquímico de los pozos productores del campo geotérmico Momotombo realizado por la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL). Lo anterior fue para poder tener una visión general de las condiciones que ha presentado el reservorio en su etapa de explotación, por medio de la interpretación geoquímica de los fluidos de cada uno de los pozos conectado a los diferentes niveles de profundidad.

Para la interpretación geoquímica se utilizó herramientas tales como: diagramas triangulares, geotermómetros de fase líquida, modelado de especiación química por medio de programas específicos para especiaciones químicas como WATCH y modelos de mezcla.

Con los diagramas triangulares se elaboró una caracterización de las aguas de cada uno de los pozos en el tiempo; para el cálculo de los geotermómetros se realizó una selección de datos para obtener resultados confiables que ayuden a tener una visión de la situación de los procesos de ebullición y enfriamiento tanto en el líquido separado como en la fase gaseosa.

Por último, se efectuó una simulación con el software WATCH para conocer las condiciones actuales de reservorio acerca de la mineralogía, el índice de saturación para cada uno de los pozos, esto con el objeto de brindar información importante en la toma de decisión del mejor manejo de campo para una explotación sostenible.

II. OBJETIVOS

Se presentan los objetivos que se desarrollaron en este trabajo monográfico.

2.1 Objetivo General

Analizar la evolución química del fluido del reservorio de Momotombo mediante los resultados químicos del año 2015 al 2021 para la mejora de la explotación geotérmica y la producción de energía verde.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar los antecedentes geoquímicos del campo de Momotombo para la determinación de los factores que inciden en la baja producción de energía geotérmica.
- Estimar mediante geotermómetros líquido la temperatura profunda del reservorio geotérmico Momotombo para la evaluación de los procesos físicos que han afectado al reservorio geotérmico.
- Identificar los procesos físicos que ha experimentado el reservorio Geotérmico utilizando el modelo de mezcla (Entalpia vs cloruro de reservorio) para la toma de decisiones hacia una explotación sostenible del campo.
- Evaluar posibles problemas por deposición mineral que puede ocurrir a condiciones de reservorio y/o en superficie durante la explotación y que influyan en la poca productividad del campo geotérmico.

III. MARCO DE REFERENCIA

En este acápite, se presenta una descripción detallada sobre los principales conceptos teóricos necesarios para sustentar los resultados que se obtengan en este estudio. Se presenta la clasificación de las aguas geotérmicas, diagramas de clasificación de aguas geotérmicas, como también geotermómetros acuosos, procesos de mezcla e índice de saturación.

3.1 Estructura Geológica del Campo Geotérmico de Momotombo

El campo geotérmico Momotombo localizado en la zona del graben de Nicaragua se encuentra a unos 80 km de Managua y está ubicado a la orilla septentrional del lago de Xolotlán y el flanco sureste del volcán Momotombo (Perez, 1992).

Tectónicamente, la zona está caracterizada principalmente por tres tipos de sistemas de fallas, cuyas direcciones principales son: NS, NE-SO y NO-SE. Estos sistemas de fallas están relacionados con la tectónica regional del graben, así como el sistema NO-SE está relacionado con la circulación de los fluidos geotérmicos y ubicación de los pozos productores.

La estratigrafía del subsuelo encontrada en los pozos refleja en los primeros 100 m depósitos volcano-sedimentarios, aluviones y coluviones que rellenan el graben, además de abundantes fragmentos arcillosos ricos en diatomeas (horizontes lacustres), tobas cristalinas que contiene una elevada cantidad de inclusiones lávicas y escorias de estructura y composición variable. Los productos volcánicos son productos de los aparatos del eje volcánico reciente de edad Holocénica.

De los 300 m a los 900 m se encuentran tobas palagoníticas amarillas, alternadas con coladas lávicas de composición basálticas en los niveles medios-inferiores a andesítica en los niveles superiores. Esta serie puede relacionarse con la formación Las Sierras reconocida a nivel regional de edad Plioceno-Pleistoceno.

De los 900 m a 2 000 m hay una secuencia de aglomerados volcánicos primarios, coladas de composición básica y andesítica pobre en sílice y tobas de composición andesito-dacítica. Esta secuencia parece corresponder a la Formación Coyol Superior de edad Mioceno superior.

De los 2000 m a 2 300 m se encuentran sedimentos margosos fosilíferos que contienen horizontes conglomeráticos. Esta secuencia es relacionable con la Formación Coyol Inferior de edad Mioceno medio.

3.1.1 Características generales del campo

Existe un primer reservorio ubicado a una profundidad entre los 300 m y 800 m de profundidad, con una temperatura de 220°C, otro reservorio más profundo se localiza entre 1 300 m a 2 300 m con una temperatura de 240°C aproximadamente. El reservorio somero está ubicado en la parte central del campo geotérmico y esta alimentado por un sistema de fracturas que provienen del reservorio profundo el cual se encuentra ubicado en la parte oeste (Perez, 1992). Hasta la fecha en Momotombo se han perforado 48 pozos en un área de 2,5 km², conectados 11 de ellos a una unidad de producción de 35 MW de potencia.

3.1.2 Descripción del proceso geotérmico

La planta geotérmica de Momotombo, cuenta con once pozos productores, de ellos se obtiene un fluido bifásico (agua-vapor) que recorre desde el reservorio hacia la superficie de la tierra (Altamirano, 2015).

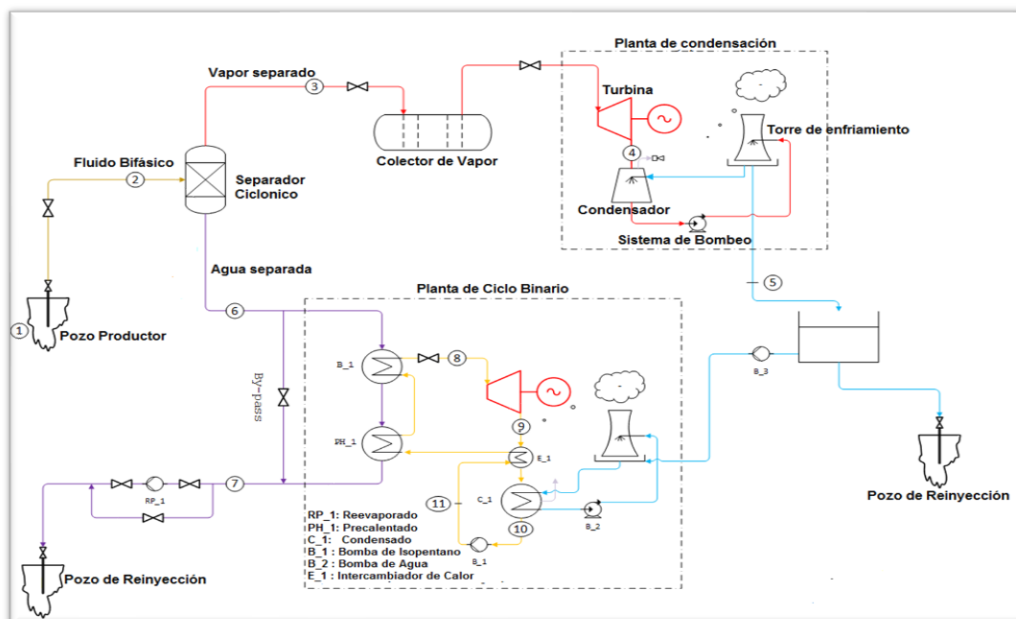


Figura 1: Diagrama de la planta de energía de condensación con ciclo binario acoplado.

Fuente: Acosta, 2015.

Cada pozo productor envía el fluido bifásico a través de tubería hacia un separador ciclónico, en donde el agua y el vapor son separados, el vapor va hacia la turbina para la producción de energía, y el agua hacia una planta de Ciclo Binario que utiliza el calor del agua para evaporar el isopentano mediante intercambiadores de calor, para luego producir energía y después el agua (salmuera) la cual es bombeada hacia los pozos inyectores donde esta salmuera se enfría de 155°C a 105°C antes de reinyectarse (Porras & Bjornsson, 2010).

3.1.3 Modelo conceptual del reservorio geotérmico Momotombo

El modelo conceptual se muestra en la Figura 2. Donde se presenta una sección transversal de temperatura de oeste a este. Esta figura ilustra claramente una zona de flujo ascendente caliente (240°C-320°C) y vertical, así como una capa de reservorio poco profunda (220°C-240°C). La capa poco profunda conduce fluidos profundos hacia el este, que eventualmente serían descargados en la superficie cerca de Punta Salinitas (Porras & Bjornsson, 2010).

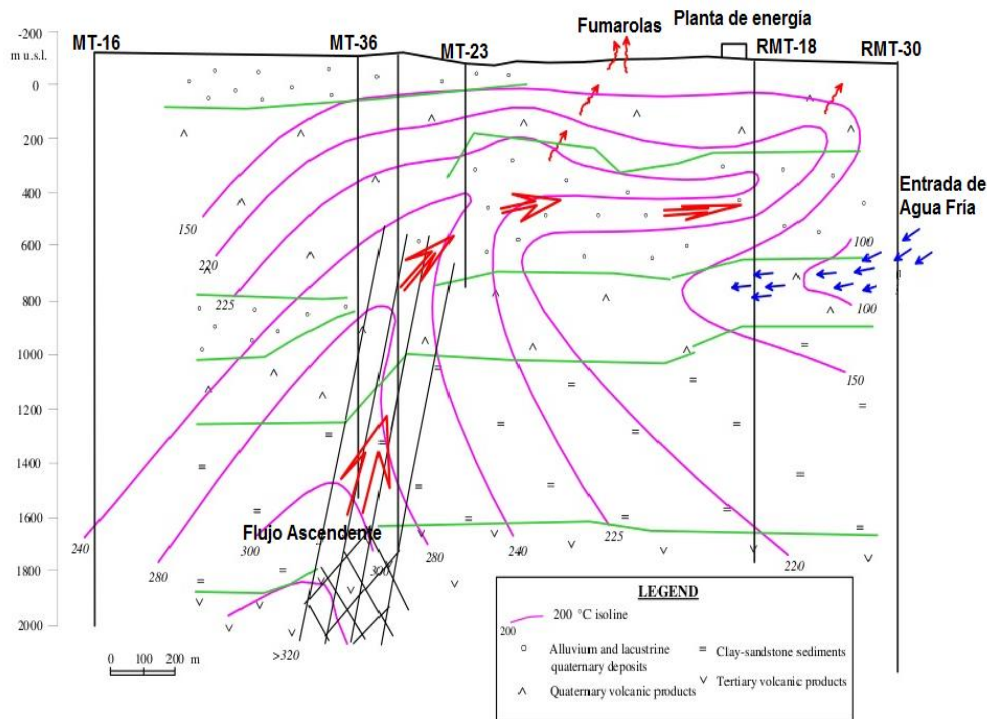


Figura 2: Modelo conceptual del reservorio geotérmico Momotombo.

Fuente: Porras and Bjornsson, 2010.

También debe mencionarse una recarga de fluido frío (100°C-150°C) desde el este, que parece haber estado activo en estado natural (Porrás & Bjornsson, 2010). El origen de la recarga de fluido frío no está claramente definido, pero puede nacer en el Lago de Managua o la incursión de aguas subterráneas meteóricas (Cruz, 2012).

3.2 Clasificación de las Aguas Geotérmicas

Los fluidos geotermales tienen diversa composición química que son consecuencias del marco geológico-geotérmico debido a los procesos de diferenciación geoquímica que tienen lugar durante la evolución del fluido (Márquez, 2017). A continuación, se describe los distintos tipos de composición química de las aguas.

3.2.1 Aguas cloruradas sódicas

La composición de este tipo de agua refleja un origen profundo donde fallas y grietas facilitan su ascenso hacia la superficie. Estas aguas se encuentran a menudo en áreas con manantiales en ebullición y actividad de geiser como también en áreas geotérmicas en desarrollo tanto en rocas volcánicas y sedimentarias; el rango de pH oscila de 5 a 9 (Acosta, 2015).

Aunque predomina el Cl⁻, Na⁺ y K⁺ también existe calcio que usualmente es bajo pero variable, contiene apreciable sílice, una significativa pero variable cantidad de sulfatos, bicarbonatos y cantidad mínima de flúor, amoníaco, arsénico, litio, rubidio y gases disueltos como dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

3.2.2 Aguas ácidas sulfatadas

Bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400°C se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrógeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato.

Las aguas ácidas sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento volcánico solo el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno permanecen en el vapor que sube a través de la roca.

Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas, generalmente tienen pH de 0 a 3, contienen vapor separado y gases no

condensables como dióxido de carbono, metano, amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico usualmente indica origen superficial (Acosta, 2015).

3.2.3 Aguas sulfatadas ácidas cloruradas

Aguas calientes en una gran variedad de ambientes pueden contener una gran cantidad de cloruros y sulfatos, pudiendo ser ácidas (pH 2-5). Estas aguas pueden formarse por muchos procesos (Acosta, 2015), tales como:

- Mezcla de agua cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades
- Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas
- Condensación de vapor magmático en las profundidades
- Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato-soportes (ej.: Evaporitas) o litología que contengan sulfuro nativo

3.2.4 Aguas bicarbonatadas sódicas

Son aguas ricas en bicarbonatos, originadas ya sea por la disolución del dióxido de carbono o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libre de oxígeno relativamente profunda.

Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación del sulfuro de hidrógeno, la acidez de estas soluciones es consecuencia de la disociación de H_2CO_3 . A pesar de ser un ácido débil convierte los feldespatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media a alta. Se debe tener presente que:

- La baja solubilidad de la calcita previene que las soluciones acuosas aumenten su contenido en calcio
- Potasio y magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente
- Concentraciones de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita

Las aguas sodio bicarbonato se encuentran generalmente en la zona de condensación de sistemas vapor dominante y en las partes marginales de sistemas líquido-dominantes. Sin embargo, estas también presentes en yacimientos geotérmicos profundos en rocas metamórficas y/o sedimentarias (Acosta, 2015).

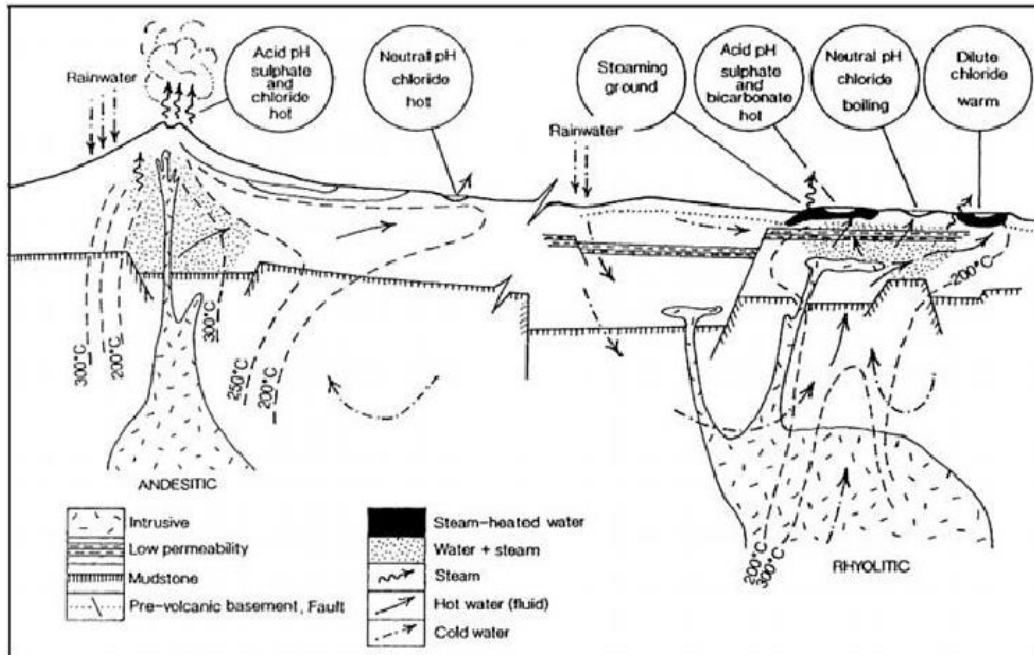


Figura 3: Esquema de tipos de aguas.

Fuente: (Acosta, 2015) Acosta, 2015.

3.3 Diagramas de Clasificación de Aguas Geotérmicas

La clasificación de las aguas es esencial para una correcta utilización de las técnicas geoquímicas, existen diferentes tipos de diagramas empleados en la clasificación (Acosta, 2015), abajo se detalla algunos de ellos:

3.3.1 Diagramas d'Amore y Panichi

A continuación, se presenta los parámetros d'Amore y Panichi.

Tabla 1: Parámetros d'Amore y Panichi.

Parámetros	Interpretación
$A = \frac{100}{\Sigma \text{aniones}} [\text{HCO}_3 - \text{SO}_4]$	Distingue aguas que han circulado a través de rocas calcáreas (con alto contenido de carbonatos y bicarbonatos), de las que han circulado por rocas evaporíticas (alto contenido de sulfato). Para un agua típicamente geotérmica A es nulo (cerca de 0) debido a la cantidad equiparable de bicarbonatos con sulfatos.
$B = 100 \frac{\text{SO}_4}{\Sigma \text{aniones}} - \frac{\text{HCO}_3}{\Sigma \text{cationes}}$	Discrimina aguas que han circulado por rocas evaporíticas (las cuales se han enriquecido de sulfatos) de las aguas que han circulado en rocas

Parámetros	Interpretación
	sedimentarias las cuales se han enriquecido con sodio. Su valor es muy negativo debido a que la cantidad de sodio es mayor que la de sulfato.
$C = 100 \frac{Na}{\Sigma cationes} - \frac{Cl}{\Sigma aniones}$	Distingue aguas derivadas de las lavas de las que pasan por rocas carbonaticas evaporitas o de las que se encuentran en el basamento cuarzítico regional, se espera un valor negativo debido a la mayor concentración de cloruro que de sodio.
$D = 100 \frac{Na - Mg}{\Sigma cationes}$	Individualiza aguas que han circulado por dolomita, su valor debe ser alto debido a la poca cantidad de Mg^{2+} que posee un agua geotérmica (si la temperatura aumenta la solubilidad de Mg disminuye).
$E = 100 \frac{Ca - Mg}{\Sigma cationes} - \frac{HCO_3}{\Sigma aniones}$	Su valor es bajo ya que la concentración de calcio y magnesio es baja. Distingue entre aguas circulantes en reservorios carbonaticos de las que se encuentran en reservorios de sulfatos.
$F = 100 \frac{Ca - Na - K}{\Sigma cationes}$	Revela el incremento del ion potasio en el agua, su valor es negativo ya que el contenido de sodio más el potasio es mayor generalmente que el calcio.

Fuente: Acosta, 2015.

El comportamiento de los diagramas obtenidos puede verse en la siguiente figura, donde: (o) aguas derivadas de la misma serie anhidrita (●) aguas circulando en caliza. (Δ) aguas sometidas a una circulación profunda (□) agua circulando en formación fina (lutita; agua superficial).

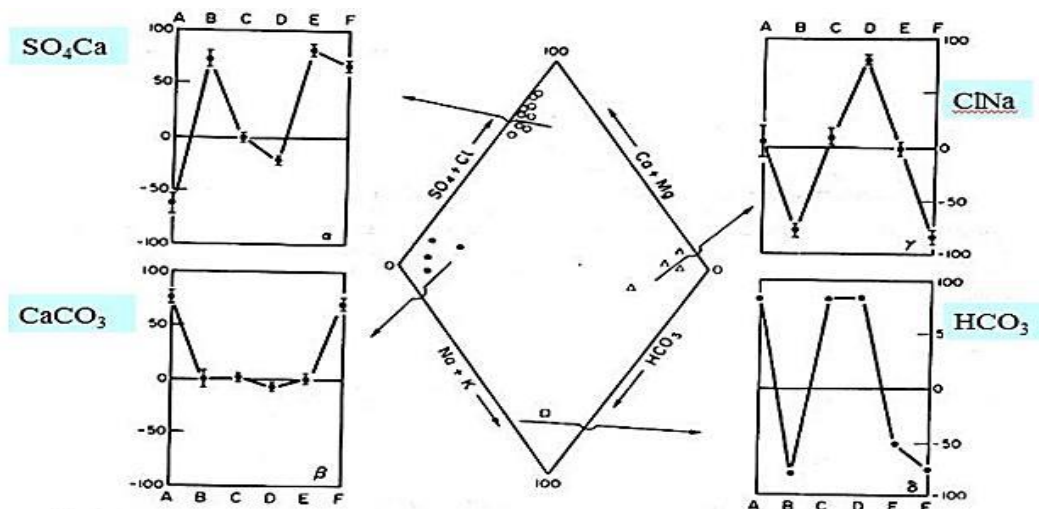


Figura 4: Comparaciones entre las representaciones de los datos químicos en el gráfico de diamante y diagrama rectangular.

Fuente: Acosta, 2015.

3.3.2 Diagrama de Piper-Hill-Langelier

Formado por dos triángulos equiláteros donde se presenta, respectivamente la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario calcular las concentraciones de los iones en porcentaje y solo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones se suele representar a HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- y como cationes a Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} .

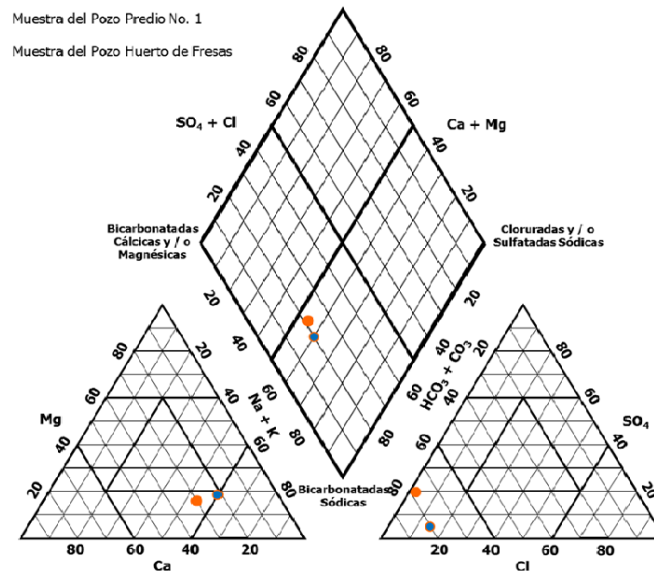


Figura 5: Diagrama de Piper-Hill-Langelier.

Fuente Acosta, 2015.

3.3.3 Diagramas triangulares

Formado por triángulos equiláteros donde se representa, la composición aniónica o catiónica del agua. En cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como cationes se suele utilizar Na-K-Mg y como aniones Cl-SO₄-HCO₃.

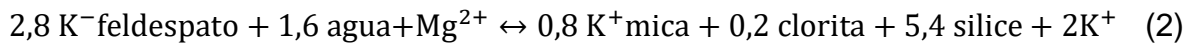
3.3.3.1 Diagrama Na-K-Mg

Giggenbach (1986) propuso la combinación de los geotermómetros de Na/K y K/Mg en un diagrama triangular, a partir del cual se pueden clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura del reservorio, de una manera más sencilla y directa. En este diagrama los dos sistemas están representados por dos conjuntos

de líneas, uno para las razones de Na/K y otro para las razones de K/Mg, donde cada valor representa líneas isotermas.

La intersección de las isotermas de Na/K y K/Mg, referidas a la misma temperatura, corresponden a la composición del agua en equilibrio con las fases minerales controlando ambos geotermómetros y delineando la llamada “curva de equilibrio total” (Acosta, 2015).

El diagrama triangular se basa en la dependencia de la temperatura de las siguientes ecuaciones:



La zona de equilibrio parcial sugiere ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio, o una mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) dilución con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría). Puntos cerca de la esquina de \sqrt{Mg} generalmente sugiere una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente fría, no necesariamente “inmaduras”.

La posición de un punto de datos en el diagrama se obtiene calculando la sumatoria de las concentraciones (en mg/kg) de los tres componentes que intervienen siguiendo la Ecuación 3:

$$S = \frac{Na}{1000} + \frac{K}{100} + \sqrt{Mg} \quad (3)$$

$$\%Na = \frac{Na}{10s} \%K \frac{K}{s} \%Mg = \frac{100\sqrt{Mg}}{s}, D = \%Mg + 0,5\% Na \quad (4)$$

A partir de la sumatoria (S), se obtiene el porcentaje de sodio (%Na) y (D) que son los que se representan como (Y) respectivamente:

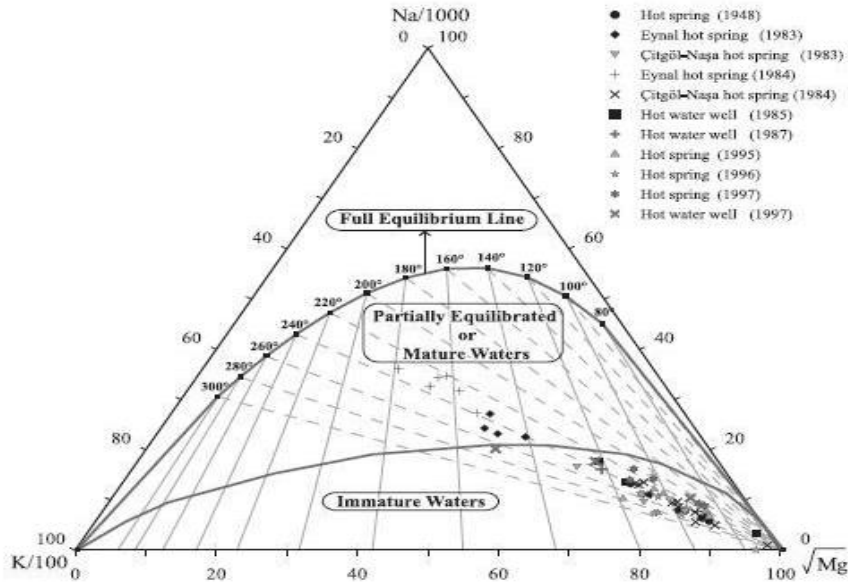


Figura 6: Diagrama Na-K-Mg.

Fuente Acosta, 2015.

3.3.3.2 Diagrama Cl-SO₄-HCO₃

Es una variación del diagrama de Piper, se utiliza un triángulo donde se Gráficán los iones Cl⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻. Es menos preciso que el diagrama de Piper, pero es más fácil de usar y la información proporcionada en muy buena, tiene la ventaja de no prejuzgar los constituyentes y las líneas de mezcla en el diagrama permanecen siempre como líneas rectas.

La posición de los datos en el diagrama se obtiene sumando la concentración de los tres componentes involucrados (mg/Kg) y posteriormente encontrando el % de cada uno de los componentes individuales.

$$S = Cl^- + HCO_3^- + SO_4^{2-} \quad (5)$$

3.4 Geotermómetros Acuosos

En la exploración y monitoreo de un sistema geotérmico, la estimación de las temperaturas ayuda a estimar el potencial geotérmico y la factibilidad de explotar sus recursos para la generación de energía eléctrica. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales

hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados (Rodríguez Santoya, 2008).

La composición de fluidos geotérmicos está controlada por reacciones químicas, que dependen principalmente de la temperatura de equilibrio entre el fluido geotérmico y los minerales a profundidad. Los geotermómetros químicos son herramientas de bajo costo que se usan, tanto para predecir las temperaturas de equilibrio de los sistemas geotérmicos, como para dilucidar los principales procesos geoquímicos que ocurren en el interior de los yacimientos (Arnórsson, 2000), unos están basados en ecuaciones analíticas fundamentadas, en forma empírica, en bases de datos creadas con mediciones de temperatura y de composición química de fluidos muestreados en pozos o manifestaciones termales, también existen otros tipos de geotermómetros que se obtiene a partir de experimentos de solubilidad de minerales o de estudios de interacción roca-agua en condiciones de equilibrio químico y termodinámico (Rodríguez Santoya, 2008).

Los geotermómetros pueden ser aplicados en fase acuosa, gaseosa y mineral, los geotermómetros en fase acuosa asumen la consecución del equilibrio químico en los sistemas geotérmicos, se considera que los geotermómetros de gases corresponden al equilibrio entre los respectivos gases y los buffers minerales (Renderos, 2002). La utilidad de los geotermómetros no consiste solamente en utilizar ecuaciones empíricas derivadas de equilibrios químicos termodinámicos para estimar temperaturas, sino que además se deben verificar la validez de los distintos geotermómetros al aplicarlos en diferentes campos.

Entre las condiciones de aplicabilidad de los geotermómetros están:

- No se deben tener contribuciones significativas de las especies químicas del sistema externo.
- Necesaria fuerte dependencia de relaciones cuantitativas entre especies implicadas en la reacción con la temperatura.

La aplicación e interpretación geotermométricas requiere un buen entendimiento de los procesos involucrados en el sistema geotermal. Actualmente se han desarrollado una amplia variedad de geotermómetros para fases acuosa, destacando las diferentes versiones del geotermómetro de sílice y los geotermómetros de composición catiónica.

3.4.1 Geotermómetros catiónicos

Se basan en la distribución de álcalis entre la fase sólida y la fase líquida, pueden ser: Na/K, Na-K-Ca, Na-Ca-K-Mg, entre otros (Na-Li, K-Mg). Funcionan bien para aguas calientes, por lo que la aplicabilidad podría llegar hasta los 350°C debido a que está basado en relaciones que son menos afectadas por diluciones y separación de vapor, volviendo el equilibrio más lento en comparación a los geotermómetros de sílice.

3.4.2 Geotermómetro de sílice

Su principio básico es la variación de la solubilidad con la temperatura, como la sílice está presente en diferentes formas es posible estimar temperaturas como geotermómetros de cuarzo, cristobalita, calcedonia, sílice amorfa entre otras. La solubilidad de la sílice es controlada por la sílice amorfa a baja temperatura y por el cuarzo a una alta temperatura. Entre las consideraciones al utilizar estos geotermómetros es que su rango de aplicabilidad es hasta los 250°C debido a que la separación de vapor, y el incremento de pH proporciona temperaturas sobreestimadas mientras que la mezcla con agua fría las temperaturas son subestimadas.

Tabla 2: Ecuaciones empíricas de geotermómetros acuosos.

Geotermómetro	Ecuación Empírica	Aplicabilidad
Cuarzo- sin pérdida de vapor (Fournier, 1977)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$ (6)	Hasta 250°C
Cuarzo- con pérdida de vapor (Fournier, 1977)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$ (7)	Hasta 250°C
Calcedonia (Fournier, 1977)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$ (8)	Hasta 250°C
Cristobalita (Fournier, 1977)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1000}{4.78 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$ (9)	Hasta 250°C
Sílice amorfa (Fournier, 1977)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{731}{4.52 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$ (10)	Hasta 250°C
Na/K (Truesdell, 1976)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{856}{0.857 - \log \frac{\text{Na}}{\text{K}}} - 273.15$ (11)	T>250°C
Na-K-Ca (Fournier, 1973)	$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{1047}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} \left(\beta \log \sqrt{\frac{\text{Ca}}{\text{Na}}} + 2.06 \right) + 2.24} - 273.15$ (12)	T>250°C
Na-K-Ca-Mg (Fournier, 1973)	$T(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{Na-K-Ca}} - \Delta T_{\text{Mg}}$ (13)	T>250°C
	$R = \frac{\text{Mg}}{\text{Mg} + 0.61\text{Ca} + 0.31\text{K}} \times 100$ (14)	
	$\Delta T_{\text{Mg}(R 1.5-5)} = \frac{1.03 - 59.971 \log R + 145.05 \log R^2 - 36711 \log R^3}{T - 1.677 \frac{\log R}{T}}$ (15)	
	$\Delta T_{\text{Mg}(R 5-50)} = \frac{10.66 - 4.7415 \log R + 325.87 \log R^2 - 1.032^3 \log R^3}{T - 1.9677 \frac{\log R^2}{T}}$ (16)	

Fuente: Acosta, 2015.

En resumen (Rodriguez Santoya, 2008) mencionan que la aplicación de los geotermómetros de SiO_2 ha presentado diversos problemas en la predicción de temperaturas debido a la presencia de procesos de mezcla de fluidos, re-equilibrio químico y de pérdidas de vapor, así como problemas relacionados con su determinación analítica, los geotermómetros catiónicos no presentan esta dificultad debido a que estos se basan en relaciones iónicas y no en concentraciones de una sola especie química, sin embargo, su aplicación podría verse afectada por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos, proceso de enriquecimiento de algunos cationes o por la falta de equilibrio entre solutos y minerales de alteración presentes en estos sistemas.

3.5 Modelo de Mezcla Entalpía vs Cloruro de Reservorio

La evolución en el tiempo de la concentración de cloruro y de las temperaturas geotermométricas puede ser de gran ayuda para comprender los cambios en el reservorio debidos a la extracción. Es importante recordar que los cambios de presión son los más rápido se difunden a través del reservorio, seguidos por los cambios químicos y, por últimos, los cambios térmicos. Esto se debe a que la roca, que contiene la mayor parte de la energía térmica del reservorio, actúa como un retardador del enfriamiento al ceder calor al fluido. Gracias a ello, es posible prever un enfriamiento brusco, más rápido de lo deseado, en los pozos productores.

El enfriamiento puede deberse a que existe una conexión demasiado directa entre los pozos inyectores y productores o a una entrada másica de fluidos de menor temperatura de acuíferos vecinos del reservorio (León, 2007). Un tipo de gráfica, que puede ser ilustrativo de los procesos en el reservorio, es el de entalpía de producción vs cloruro a descarga total.

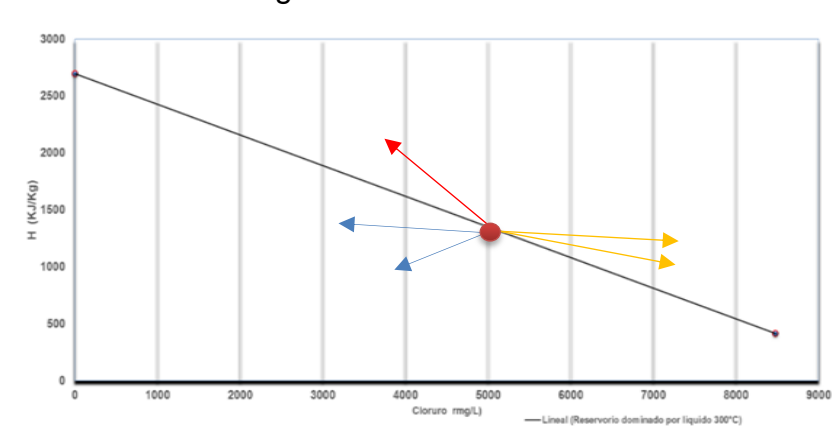


Figura 7: Entalpía de producción vs cloruros calculados a descarga total.

Fuente: León, 2017.

Los puntos rojos representan un pozo hipotético; el punto central corresponde a las condiciones de un reservorio dominado por líquido de 300°C ($H = 1\,344$ KJ/Kg) y una concentración de cloruro de 5 000 mg/L, el punto inferior a la derecha son las condiciones del agua del vertedor ($H = 419$ KJ/Kg, $Cl = 8\,475$ mg/L) y el punto superior izquierdo corresponde al vapor ($H = 2\,700$ KJ/Kg, $Cl = 0$).

Líneas azules: muestran la tendencia en el caso de recarga de agua periféricas de menor temperatura y concentración de cloruros.; la línea horizontal indica que el agua de recarga barre suficiente calor de la roca de tal manera que su entalpia final es la original del reservorio; la otra línea indica que el reservorio se enfría paulatinamente.

Líneas amarillas: representan la influencia de agua de reinyección, enriquecida en cloruros por efecto de la separación del vapor; la línea horizontal correspondería al caso en el que el agua de reinyección se recupera térmicamente antes de llegar al pozo productor, mientras que la otra línea, indicaría un enfriamiento paulatino.

Línea de color rojo: indica la tendencia de enriquecimiento de cloruros por efecto de una ebullición vigorosa en la zona de drene del pozo.

3.6 Modelado de Especiación Química

Para predecir la temperatura del reservorio geotérmico se han desarrollado diversos geotermómetros, sin embargo, se pueden obtener diferentes valores de temperaturas del reservorio, debido a diferentes velocidades de reacción. Se considera entonces para una mejor estimación que la temperatura este en función del equilibrio de los componentes del fluido geotérmico es decir que en el sistema no existan gradiente de energía. Si el líquido que va ascendiendo ha reaccionado químicamente con la roca presenta una convergencia al equilibrio de los minerales a una temperatura en particular, esta temperatura corresponde a la temperatura del yacimiento más probable (Acosta, 2015).

El estado en equilibrio de minerales puede ser estimado por la relación del producto de la actividad (Q) a la constante de equilibrio (k) en un rango de temperaturas. La constante de equilibrio y la actividad producto están relacionadas con la energía libre de Gibbs que es una función de estado por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -RT\ln K + RT\ln Q = RT\ln \frac{Q}{K} \quad (6)$$

Donde:

R: Constante de los gases

T: Temperatura en (Kelvin)

El índice de saturación (IS) es el grado de solubilidad de los minerales a diferentes condiciones de temperatura y presión. Se puede obtener a partir del producto de solubilidad y de la actividad a través de la siguiente ecuación:

$$IS = \log K - \log Q = \log \frac{Q}{K} \quad (7)$$

IS = 0, Se está en equilibrio

IS < 0, Solución insaturada

IS > 0, Solución sobresaturada

La especiación y saturación respecto a las fases minerales de los fluidos geotérmicos se calcula con varias temperaturas predeterminadas para obtener un registro (Q_i/K_i) utilizando el software WATCH, que es un programa utilizado para calcular la especiación acuosa en aguas naturales. Su principal área de aplicación es a los fluidos geotérmicos (Acosta, 2015).

El programa lee los análisis químicos de agua, gas, y las muestras de condensado de vapor recogidos en la superficie y calcula la composición química en la profundidad partiendo de una temperatura de referencia que puede ser arbitraria o medida, el pH y la temperatura a la que se ha hecho la medición de pH.

El modelo toma entonces estos datos medidos y calcula la composición del fluido en equilibrio (incluyendo pH) en el reservorio, la constante de equilibrio (K), los productos de actividad (Q) potenciales redox y las presiones parciales de los gases de la reacción dada a cualquier temperatura.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

Este capítulo presenta los métodos empleados para el desarrollo de la investigación. Se establecen la clasificación general de la investigación (de acuerdo con su finalidad), describe el sitio, los puntos de muestreo, zona u objeto de estudio, además explica las estrategias de obtención y procesamiento de los datos o variables a estudiar.

4.1 Tipo de Estudio

La presente investigación de acuerdo a su finalidad es de tipo Investigativa, debido a que mediante su desarrollo se pretende analizar la evolución química de los fluidos térmicos del depósito de Momotombo.

Según su finalidad es de carácter no experimental porque no se realizan manipulación de variables, ya que no se puede controlar la temperatura, presión y concentración de las especies químicas de un reservorio geotérmico, y sólo se observa el fenómeno tal y como se dan en su contexto natural para analizarlo con posterioridad. El tipo de diseño será longitudinal debido a que el interés es analizar cambios a través del tiempo de las especies químicas.

4.2 Universo

Nicaragua está ubicada en el medio del bloque Chortis, que es una unidad de la corteza continental que pertenece a la placa del caribe. Los recursos geotérmicos de Nicaragua están situados en el sector suroeste del país dentro de una amplia zona de hundimiento conocida como depresión Nicaragüense (Cruz, 2012).

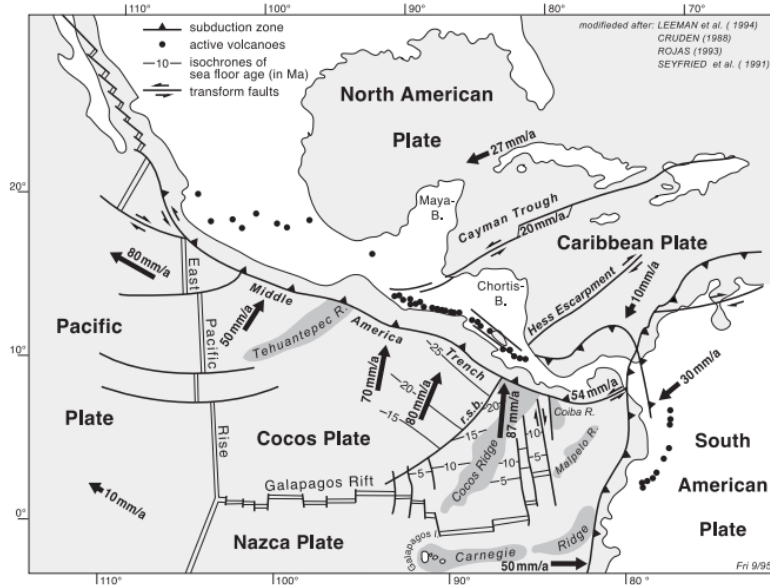


Figura 8: Esquema del escenario geológico regional de Nicaragua.

Fuente: Frischbutter, 2002.

El universo de esta investigación corresponde al campo geotérmico de Momotombo que se encuentra ubicado en el extremo SE de la cordillera de los Marribios, a unos 40 Km de la ciudad de Managua, a orilla del Lago Xolotlán y en la ladera meridional del volcán Momotombo. La extensión actual del campo (incluye pozos y planta de generación) es de 2 Km².

4.3 Evaluación de Antecedentes Geoquímicos

Los datos primarios en esta investigación se obtuvieron a partir de análisis químico de descargas de agua y vapor de pozos productores en el campo geotérmico Momotombo. Estos pozos son: MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-31, MT-35, MT-36, MT-38, MT-41, MT-42, MT-43, OM-53.



Figura 9: Ubicaciones de los pozos del campo geotérmico Momotombo.

Los análisis químicos que se emplearon para este estudio fueron informados por Arnórsson (1996, 1997, 1998) para muestras recolectadas en 1990, 1992, 1996 y por Isaura Porras las muestras fueron recolectadas en 2012. Para 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 se emplean la base de datos del laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL).

En 1990, 1992 y 1996, se recogieron muestras líquidas de la caja de vertedero (es decir, a presión atmosférica), mientras que las muestras de 2012, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 se recogieron usando un separador Webre a diferentes presiones, pero las concentraciones de fase líquida se corregirán de manera que todas correspondan con las concentraciones a presión de separación.

4.4 Clasificación del Fluido Producido en los Pozos Productores del Campo Geotérmico Momotombo

En esta sección se aborda la descripción de la técnica de muestreo, tratamiento de las muestras, técnicas analíticas, y diagramas de clasificación del fluido geotérmico.

4.4.1 Muestreo de fluidos geotérmicos

Al muestrear fluidos geotérmicos se anotó la temperatura de salida a la cual se tomó la muestra de agua con un termómetro, pH con el pH-metro, la conductividad eléctrica con el Conductímetro. La localización por medio de coordenadas con GPS portátil, fecha, hora, y el tipo de análisis que se llevó a cabo con esas muestras.

Las muestras de líquido y vapor geotérmico recogidas para el análisis químico requieren técnicas específicas para la conservación de muestras. A continuación, se brindará una breve descripción de los métodos utilizados para recolectar muestras de agua y vapor.

Los análisis de laboratorio se realizaron a través de los métodos establecidos por el laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL).

4.4.2 Muestreo in-situ

Se ubicaron 11 puntos de muestreo los cuales son pozos que se encuentran conectados a la central geotermoeléctrica. En la tabla de abajo se muestra las coordenadas, profundidad y elevación de los pozos productores del campo geotérmico Momotombo.

Tabla 3: Coordenadas, profundidad y elevación de los pozos productores del campo geotérmico Momotombo.

Pozo	Coordenada Norte	Coordenada Este	Profundidad (m)	Elevación m.s.n.m
MT-04	1370,194	548,762	1435,00	74,00
MT-23	1370,222	549,020	823,00	71,40
MT-26	1370,084	548,929	640,10	48,80
MT-27	1370,286	549,119	720,00	86,70
MT-31	1370,939	549,352	582,30	201,40
MT-35	1370,037	548,682	1295,20	55,90
MT-36	1370,444	548,756	1653,00	97,40
MT-38	1370,247	548,809	1137,00	83,00
MT-41	1370,407	548,475	2138,00	101,00
MT-42	1369,820	548,850	2093,00	45,00
MT-43	1370,625	548,525	2495,68	127,00
OMT-53	1370,395	548,667	2053,00	88,43

Fuente: Informe de Laboratorio de Geoquímica, enero 2018, ENEL.



Figura 10: Puntos de muestreo tanto para agua como para vapor.

Para la toma de muestras de agua se utilizó la línea de agua separada (Figura 10, Punto 5). Las muestras se consideran representativas ya que tienen una conductividad y resultados analíticos característicos de las aguas geotérmicas. Las muestras de gases se tomaron en el cabezal del pozo (Figura 10, Punto 1) con un equipo denominado mini-separador cuya función es separar el agua del vapor. En el caso de los pozos muy húmedos, la muestra se tomó en la línea de vapor (P1) (Figura 10, Punto 2) después del separador ciclónico. En Tabla 4 se detallan los puntos de muestreo tanto para agua como para vapor de pozos geotérmico.

Tabla 4: Punto de toma de muestra tanto para agua como para vapor en el campo geotérmico Momotombo.

Lugar	Punto de Toma de Vapor	Punto de Toma de Agua
MT-4	Cabezal	Línea de Salida del Cabezal
MT-23	P1	Línea de Agua Separada
MT-26	Cabezal	Línea de Agua Separada o Cabezal
MT-27	P1	Línea de Agua Separada
MT-31	P1	Línea de Agua Separada
MT-35	P1	Línea de Agua Separada
MT-36	Cabezal	
MT-41	Cabezal	Línea de Salida del Cabezal

Lugar	Punto de Toma de Vapor	Punto de Toma de Agua
MT-42	P1	Tanque de Nivel
MT-43	Cabezal	Línea de Salida del Cabezal
OMT-53	Cabezal	

Fuente: Informe de Laboratorio de Geoquímica, enero 2018, ENEL.

4.4.3 Muestreo de agua separada

Para análisis de cationes las muestras se recolectaron en botellas de polietileno de 500 mL y acidificadas con ácido nítrico (HNO_3) 8N. Antes de tomar la muestra, la botella se enjuagó con el agua que se muestrea.

El objetivo de la acidificación de la muestra para el análisis de los cationes, es el de prevenir la posible precipitación de sales de calcio, magnesio y otros cationes. También se tomaron una muestra de 500 mL sin acidificar para aniones y una muestra diluida (1:10) con agua destilada para el análisis de sílice (SiO_2). Para el amonio (NH_4^+) en agua se utilizó un frasco ámbar de 75 mL acidificada con ácido clorhídrico (HCl) 6N para eliminar cualquier interferencia.

Muestra de carbonatos y bicarbonato (CO_3^{2-} , HCO_3^-) se recolectaron en frasco de vidrio transparente de 75 mL y se sometió a una temperatura más baja, en nuestro caso la introducimos en un termo con hielo.

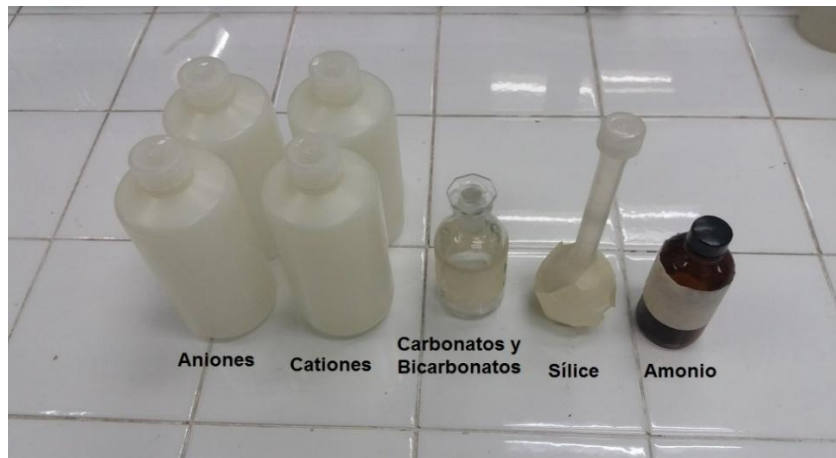


Figura 11: Envases para muestreo de agua en el campo geotérmico Momotombo.

En la tabla que se muestra abajo se presentan las formas de preservación y tipos de envases para los análisis que se efectuaron en este estudio.

Tabla 5: Condiciones de preservación y tipo de envase.

Tipo de Análisis	Tipo de Envase	Preservación
K⁺	P	Acidificada
Na⁺	P	Acidificada
Ca²⁺	P	Acidificada
Mg²⁺	P	Acidificada
Li⁺	P	Acidificada
NH₄⁺ (aguas y vapor)	P,V	Acidificada
Cl⁻	P	No se requiere
SO₄²⁻	P	No se requiere
F⁻	P	No se requiere
HCO₃⁻, CO₃²⁻	V	Refrigerar
B	P	No se requiere
Fe²⁺	P	No se requiere
SiO₂	P	Dilución 1:10
H₂S (aguas y vapor)	P,V	No se requiere
CO₂(vapor)	V	No se requiere
pH	V	No se requiere
Conductividad	P	No se requiere
Solidos Totales Disueltos	P	No se requiere

Nota: P – Plástico (Puede ser Polipropileno, PTFE, PET); V – Vidrio.

4.4.4 Muestreo de vapor geotérmico

Para tomas de muestra de vapor geotérmico para el análisis de gases, el vapor se recolecta en bulbos de Giggenbach de 300 mL de capacidad, con 50 mL de hidróxido de sodio 4N en el interior del bulbo. Previamente al muestreo, estos bulbos se prepararon en el laboratorio tratándose antes y después de añadir la solución de hidróxido de sodio y evacuando el aire en una línea de vacío.



Figura 12: Bulbo de Giggenbach de 300 mL de capacidad para tomas de muestra de vapor.

4.4.5 Métodos analíticos

Los análisis químicos de las muestras se realizaron en el laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL). Estos consistieron en análisis de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma acoplada (ICP-AES) (equipo modelo 2280, Perkin Elmer) para determinar las concentraciones de los cationes. La determinación de sulfato se realizó por el método turbidímetro (modelo HACH 2100 AN) y se empleó la valoración potenciométrica para la determinación de bicarbonatos y carbonatos (Márquez, 2017). Los métodos analíticos utilizados se describen en la Tabla 6.

Tabla 6: Sustancias y su metodología de medición.

Substancia	Metodología	Tratamiento
K ⁺	Espectroscopia de Emisión Atómica	Acidificada con HNO ₃ (1+1)
Na ⁺		
Ca ²⁺		
Mg ²⁺		
Li ⁺		
NH ₄ ⁺	Método Potenciométrico/Electrodo de ion selectivo	Acidificada con HCl (1+1)
Cl ⁻	Valoración Potenciométrico con AgNO ₃	Ninguno
SO ₄ ²⁻	Turbidímetro. Método Nefelométrico	Ninguno
F ⁻	Método Potenciométrico/Electrodo de ion selectivo	Ninguno
HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Valoración Potenciométrico con HCl	Refrigeración
B	Valoración Potenciométrico. Método del Manitol	Ninguno
Fe ²⁺	Espectroscopia UV- Visible	Ninguno
SiO ₂	Espectroscopia UV- Visible	Dilución en campo 1:10
H ₂ S	Titulación por Yodometría	Ninguno
CO ₂ (vapor)	Valoración Potenciométrico	Ninguno
pH	Potenciométrica	Ninguno
Conductividad	Método Electrométrico	Ninguno
Sólidos totales disueltos	Método Gravimétrico	Ninguno

Fuente: Márquez, 2017.

4.4.6 Evaluación de la calidad de los resultados

Para verificar la fiabilidad de los resultados del análisis químico de las muestras se recurrió al balance iónico (B.I) de los componentes disueltos en las aguas (Márquez, 2017). Este balance se define como la diferencia de los elementos de carga positiva con los elementos de carga negativa, en porcentaje.

$$B.I = 100 * \frac{\Sigma \text{cationes} - \Sigma \text{aniones}}{\Sigma \text{cationes} + \Sigma \text{aniones}} \quad (8)$$

Se consideró coherente aquellos análisis químicos que presentan un error de balance menor del 12% aplicable para aguas diluidas, tales como, manantiales termales y fríos; para salmuera geotérmica se utiliza un error menor al 5% (Tello, 2005).

4.4.7 Clasificación de las aguas geotérmicas

Existen diversos gráficos que se utilizan para la clasificación de las aguas, en este estudio se realizaron la evaluación elaborando los siguientes diagramas:

- Diagrama de Piper
- Diagramas triangulares (Na-K-Mg, Cl-SO₄-HCO₃) mediante las hojas de cálculo de Powell y Cumming (2010).

En el Anexo A, se encuentra la guía de uso para las hojas de cálculo propuestas por Powell y Cumming.

4.5 Estimación de Temperaturas Profundas del Reservorio Geotérmico Momotombo

La estimación de temperaturas con geotermómetros químicos es uno de los más importantes métodos para la explotación y desarrollo de los recursos geotérmicos debido a que pueden predecir temperaturas de superficie y en el reservorio durante la explotación. En este estudio se determinaron los geotermómetros de sílice y catiónicos calculados por medio de las hojas de cálculo propuestas por Powell y Cumming (2010).

4.6 Identificación de Procesos Físicos que ha Experimentado el Reservorio Geotérmico Momotombo

Este tipo de Gráfica ilustra los procesos en el reservorio. La entalpía de producción (Hm) se utilizó para calcular las concentraciones de cloruros en el reservorio utilizando las ecuaciones que se muestran en los acápite siguientes:

4.6.1 Cálculo de concentración de especie química en el reservorio

$$C_{\text{reservorio}} = (1 - y) C_1 + y C_v \quad (9)$$

$$x + y = 1 \quad (10)$$

Dónde:

$C_{\text{reservorio}}$: Concentración en reservorio

C_i : Concentración en el líquido

C_v : Concentración en el vapor

X: es la fracción másica del fluido inicial que permanece como líquido

Y: es la fracción de másica que se convierte en vapor a 100°C

$$H_{L,T^{\circ}C} = (1 - y)H_{L,100^{\circ}C} + y H_{V,100^{\circ}C} \quad (11)$$

Dónde:

$H_{L,T^{\circ}C}$: Entalpía de la mezcla

$H_{L,100^{\circ}C}$: Entalpía de líquido a 100 °C

$H_{V,100^{\circ}C}$: Entalpía de vapor a 100 °C

Despejando “y” de la Ecuación 11 se obtiene lo siguiente:

$$H_{L,T^{\circ}C} = H_{L,100^{\circ}C} - yH_{L,100^{\circ}C} + y H_{V,100^{\circ}C}$$

$$H_{L,T^{\circ}C} = H_{L,100^{\circ}C} + y(H_{V,100^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C})$$

$$H_{L,T^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C} = y(H_{V,100^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C})$$

$$y(H_{V,100^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C}) = H_{L,T^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C}$$

$$y = \frac{H_{L,T^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C}}{H_{V,100^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C}} \quad (12)$$

La ecuación anterior se puede simplificar para balance térmico como:

$$H_{L,T^{\circ}C} = H_L + yL \quad (13)$$

Siendo:

L: Calor latente de vaporización

H_v : Entalpía del vapor

H_L : Entalpía del agua del reservorio

$$L = H_v - H_L \quad (14)$$

$$y = \frac{H_{L,T^{\circ}C} - H_{L,100^{\circ}C}}{L} \quad (15)$$

4.7 Modelación de Especiación Química

Para el modelado se utilizó el programa WATCH. Para ejecutar el programa los datos del análisis geoquímico no tienen que estar completos ya que aun así el programa correrá, si muchos de los componentes o los principales faltaran, los resultados pueden ser no representativos, en este estudio se siguió el siguiente procedimiento (Acosta, 2015).

- Se calculó la concentración de CO₂ en agua al multiplicar la concentración de los bicarbonatos (HCO₃⁻) por un factor de 0,72 obtenido de la estequiometria de la reacción química entre estas dos especies.



$$\frac{1 \text{ mol } HCO_3^- * 1 \text{ mol } CO_2 * 44.01 \text{ g } CO_2}{61.018 \text{ g } HCO_3^- * 1 \text{ mol } HCO_3^- * 1 \text{ mol } CO_2} = 0.7212 \approx 0.72 \frac{\text{g } CO_2}{\text{g } HCO_3^-}$$

- Se creo el archivo de entrada (ejemplo.IN), introduciendo en el programa WAIN los parámetros fisicoquímicos (INPUT) para la fase líquida y luego para la fase gaseosa, y se seleccionaron las unidades de concentración.
- Se creo el archivo de salida (ejemplo.OUT), ingresando en el programa WATCH el archivo de entrada obtenido anteriormente. Para una ebullición adiabática la temperatura de referencia y el tipo, el número de pasos varió con respecto a pozos (máximo 10) y los intervalos de temperatura de boiling separados por comas.
- Con los datos obtenidos en el WATCH se calcularon los índices de saturación (IS) para los minerales anhidrita, calcita y cuarzo, abriendo el archivo de salida en EXCEL o WORD y leyendo para cada temperatura la k calculada (log Q) y la K teórica (log K), calculando: IS = logQ – logK.

4.8 Variables de Estudio

Las variables (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Li⁺, Cl⁻, B, SO₄²⁻, HCO₃⁻, F⁻, NH₄⁺, CO₂, H₂S, SiO₂) utilizadas en la presente investigación se definen para cada objetivo

específico los que fueron medidos y se analizaron para la consecución de las variables y elaboración de una conclusión por cada objetivo.

V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la evaluación de los datos químicos de los pozos productores del campo geotérmico Momotombo, en el periodo comprendido entre el año 2015 al 2021. Del mismo modo, se describe los procesos físicos que han ocurrido en el reservorio, temperatura de interacción agua-roca y saturación de minerales de alteración.

5.1 Evaluación de Antecedentes Geoquímicos del Campo Geotérmico Momotombo

En los datos informados por Arnórsson (1996, 1997, 1998), son datos de los análisis de las muestras de agua (Martínez & Sánchez, 1995), e Isaura Porras (2012). Se puede observar en la Tabla 7 varios datos fuera del criterio de aceptación ($\pm 5\%$) del balance iónico (B.I).

Tabla 7: Calidad de los resultados de los antecedentes.

Pozo	Fecha	B.I	Pozo	Fecha	B.I
MT-23	1987	0,11	MT-27	1992	0,68
MT-23	1988	-0,23	MT-27	1994	6,51
MT-23	1989	5,51	MT-27	2012	-0,93
MT-23	1990	8,31	MT-31	1990	5,32
MT-23	1991	1,53	MT-31	1992	0,57
MT-23	1992	-1,26	MT-31	1994	7,27
MT-23	1994	5,67	MT-31	2012	-0,81
MT-23	2012	-0,78	MT-35	1989	9,25
MT-26	1989	6,28	MT-35	1990	5,69
MT-26	1990	9,61	MT-35	1991	3,47
MT-26	1991	1,53	MT-35	1992	0,49
MT-26	1992	-1,01	MT-35	1994	2,24
MT-26	1994	9,07	MT-35	2012	-1,75
MT-26	2012	-3,61	MT-36	1991	2,80
MT-27	1987	0,07	MT-36	1992	-0,55
MT-27	1988	-0,26	MT-36	1994	3,53
MT-27	1989	5,34	MT-36	2012	-2,02
MT-27	1990	9,34	MT-38	1992	-0,79
MT-27	1991	0,92	MT-38	1994	4,04

Se aceptarán estos valores para su posterior análisis debido a que posiblemente estas muestras fueron recolectadas en un tiempo donde el reservorio se encontraba sufriendo pérdida en la presión, además de la posible infiltración de agua con una menor temperatura a causa de que el sistema se encontraba en desequilibrio, ocasionando un desbalance en las cargas iónica. Este desbalance también podría asociarse a cambios de métodos, debido a que el equipo de absorción atómica del laboratorio de geoquímica de la Empresa Nicaragüense de electricidad (ENEL) se encontraba en mal estado, entonces las concentraciones de los iones calcio y magnesio se analizaron por el método de la dureza total.

Se evaluó además la base de datos analíticos (2015 al 2021) de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), donde se encontró más del 92% de los datos dentro del criterio de aceptación ($\pm 5\%$), es decir la información es confiable para la interpretación de los resultados.

Tabla 8: Calidad de los resultados del DLG.

Pozo	Número de muestreo	Desbalance iónico	Porcentaje de Datos Confiables (%)
MT-4	60	3	95
MT-23	54	4	93
MT-26	62	5	92
MT-27	61	4	93
MT-31	62	4	94
MT-35	61	5	92
MT-38	17	0	100
MT-41	58	2	97
MT-42	35	1	97
MT-43	39	2	95

5.1.1 Diagrama de Piper

El contenido catiónico de las aguas de los pozos del campo geotérmico tiene características altamente salinas típicas de los campos geotérmicos, de manera análoga, el contenido aniónico muestra que los cloruros proporcionan indicios de alta salinidad en las aguas. En el campo geotérmico Momotombo la concentración promedio de sólidos totales disueltos (STD) fue de 6 000 mg/L y de iones cloruros (Cl) de 3 000 mg/L.

El diagrama Figura 13. Demuestra que la composición de las aguas geotérmicas de los pozos en estudio presenta alta concentraciones de sales evidenciado gráficamente en el campo romboidal del diagrama, clasificándose las aguas como cloruradas sódicas.

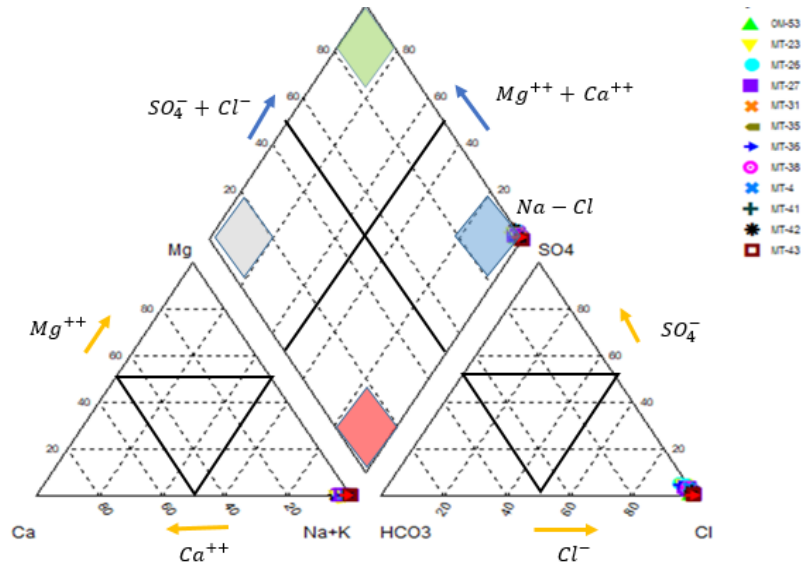


Figura 13: Diagrama de Piper para los pozos productores del campo geotérmico Momotombo.

5.1.2 Diagrama triangular (Na-K-Mg)

Giggenbach (1988) sugirió que se puede usar un diagrama triangular con $Na/1000$, $K/100$ y $Mg^{0.5}$ en los vértices, para clasificar las aguas como completamente equilibradas con la roca a temperaturas dadas, parcialmente equilibradas e inmaduras (disolución de roca con poco o ningún equilibrio químico), en este diagrama se adoptó la ecuación del geotermómetro Na/K y K/Mg (Fournier, 1989). La curva de equilibrio total es para la composición del agua del reservorio corregida por la pérdida de vapor debido a la ebullición descompresiva.

Pozo MT-4

El diagrama triangular (Na-K-Mg) Figura 14. La muestra del pozo productor MT-4 se localiza en la línea de equilibrio total en los años 2015 al 2019. Giggenbach uso los términos agua bien equilibrada o madura para las aguas que han interactuado con las rocas por un tiempo muy largo, estas aguas han llegado al equilibrio con respecto a las reacciones que convierten feldespato de Na a feldespato de K y

feldespatos a silicatos laminares, dependiendo de la composición inicial de la roca (Ecuación 1 y 2).

Para el 2020 y 2021 se observan un poco por debajo de esta línea de equilibrio pero diferente en las temperaturas estimadas Figura 14. Esto posiblemente se debe por el ingreso al sistema en octubre de 2019 del pozo MT-38. La zona de equilibrio parcial sugiere ya sea un mineral que se ha disuelto, pero no ha alcanzado el equilibrio, o una mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio (por ejemplo, agua geotérmica) dilución con agua no equilibrada (por ejemplo, agua subterránea fría).

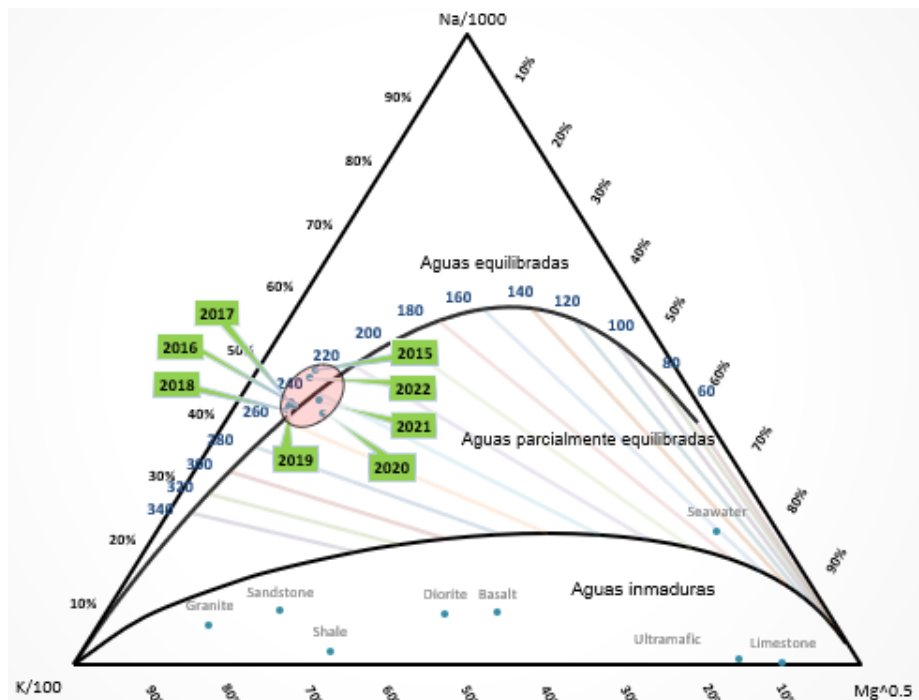


Figura 14: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-4

Con respecto a la temperatura estimada con el diagrama Na-K-Mg (Figura 14), las estimaciones son las siguientes:

- 2016, 2017, 2018 y 2019 la estimación de temperatura fue de 250°C.
- 2020 y 2021 la estimación de temperatura fue aproximadamente 240°C.

Pozo MT-23

El diagrama triangular (Na-K-Mg) Figura 15. Muestra que para el año 2012 y 2019 el pozo MT-23 se encuentra en la línea de equilibrio total es decir se encuentra en equilibrio con las fases minerales ha temperaturas de 230°C y 250°C,

respectivamente. Para el resto de los años, el pozo MT-23 se encuentran un poco por debajo de la línea de equilibrio con temperaturas de 240°C a 260°C posiblemente por la mezcla de agua que ha alcanzado el equilibrio agua geotérmica dilución con agua no equilibrada agua subterránea fría.

También se puede observar datos antes del inicio de la segunda unidad de turbina, la cual entró en operación en 1989; esos datos son de 1987 y 1988, lo cual indica las estimaciones de temperatura más alta 280°C.

Cuando entra en funcionamiento la segunda unidad se observa una disminución en la estimación de temperatura de 280°C a 260°C, pero además se observan los puntos en equilibrio parcial. La tendencia más pronunciada hacia aguas inmadura fue para 1994 posiblemente por entrada de agua fría.

El 18 de octubre de 2018, el vapor ya no fluye a la planta, por lo cual solo se aprovecha la fase líquida para el ciclo binario. Así mismo en el diagrama se nota que para el año 2019, el pozo se encuentra en la línea de equilibrio con una estimación de temperatura de 250°C y para el año 2020 por debajo de esta línea, pero con una disminución en la estimación de temperatura a 240°C.

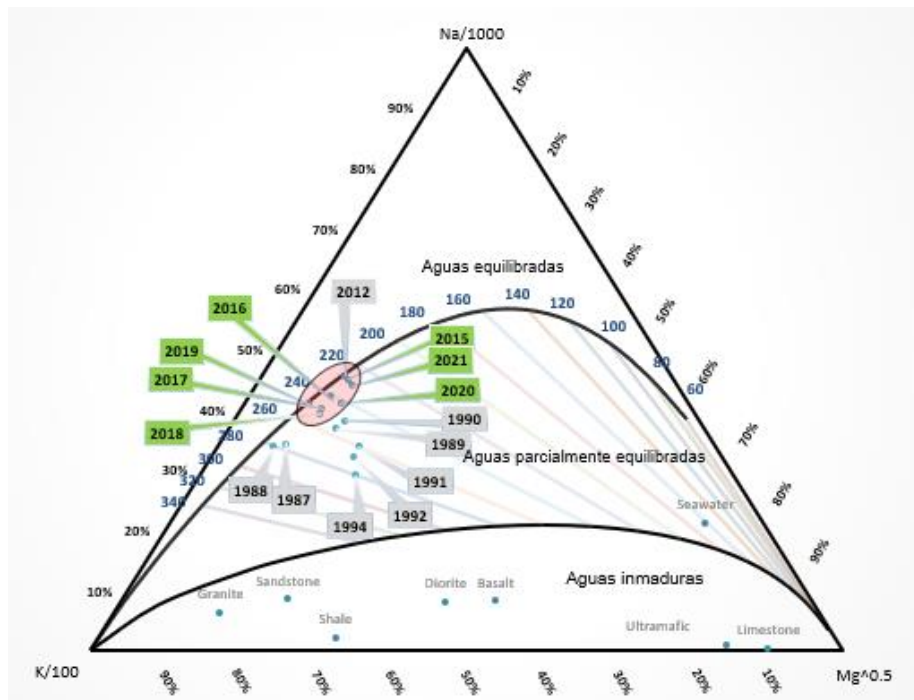


Figura 15: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-23.

Para el mes de junio de 2021, el pozo MT-23 es clausurado con el objetivo de observar una recuperación térmica, según la estimación de temperatura utilizando el diagrama triangular (Na-K-Mg), se aprecia una disminución en la estimación de temperatura hasta los 230°C.

Pozo MT-26

El pozo MT-26 con el diagrama triangular (Na-K-Mg), muestra que este pozo se encuentra en equilibrio en el 2015, 2017, 2018 y 2019, es decir se encuentran en la curva de equilibrio que representa la composición del agua del reservorio somero, pero con la diferencia en la estimación de temperatura del 2015 la cual fue de 230°C.

Además, se puede apreciar que para el 2016, 2020 y 2021 el pozo tiende hacia agua parcialmente equilibrada con estimaciones de temperaturas de 250°C. El desequilibrio del pozo MT-26 para el 2016, podría asociarse a ingreso de agua de menor temperatura, es decir un proceso de dilución en lo cual ocasionó disminución de la concentración del ion cloruro en el reservorio somero de 120 mg/L. Se nota la tendencia hacia agua inmadura para los años 1989, 1990, 1991, 1992 y 1994, siendo este último el más afectado por los procesos que ocurrieron en el reservorio debido a la caída en la presión (entrada de agua de menor temperatura).

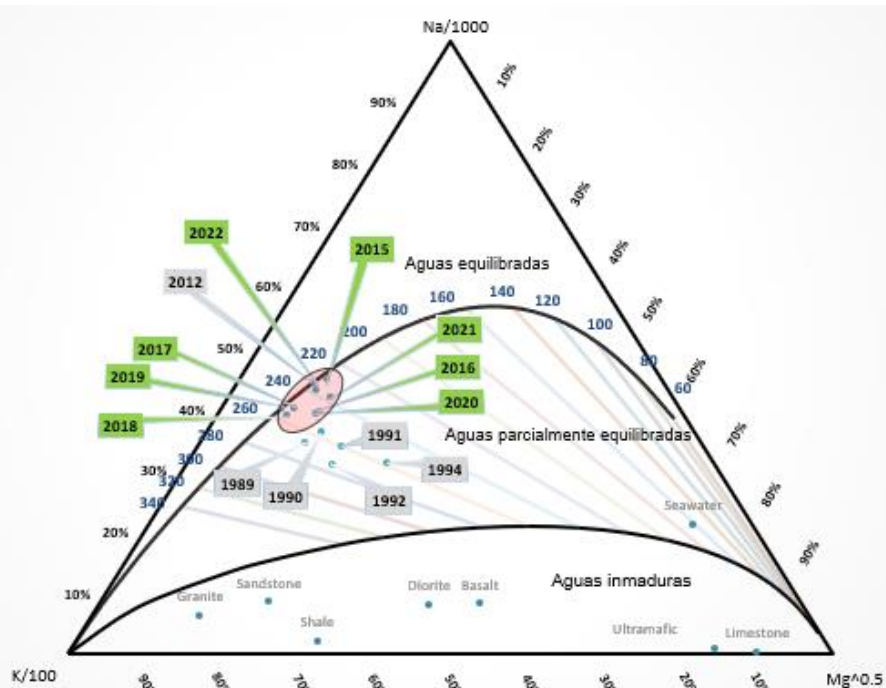


Figura 16: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-26.

Para el muestreo de julio de 2021 se puede ver Figura 17. Una disminución de iones sulfatos para el pozo MT-26 y lo mismo ocurrió para el resto de los meses de ese mismo año, esto es debido a operaciones en el campo (se envía salmuera del pozo OM-53 al separador ciclónico del pozo MT-26)., Es decir que la muestra era la mezcla de salmuera de los pozos MT-26 y OM-53 lo que se analizó el laboratorio y por ende ocurrió una disminución en los iones sulfatos.

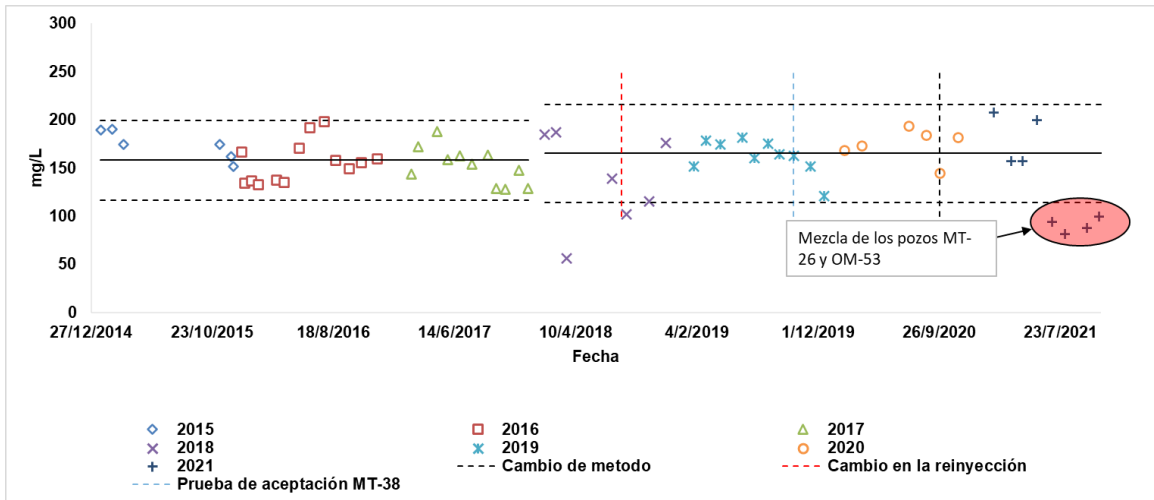


Figura 17: Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-26.

Pozo MT-27

El pozo MT-27 Figura 19. Muestra una estimación de temperatura de 230°C a 250°C y en la línea de equilibrio para los años 2012, 2015, 2016 y 2019. Para el 2017, 2018, 2020 y 2021 se encuentra un poco por debajo de esta línea con estimación de temperatura de 250°C. Cabe mencionar que se esperaba que para 2016 se encontrara por debajo de la línea de equilibrio, debido a que el ion cloruro disminuyo, es decir había entrada de agua de menor temperatura en este pozo, pero posiblemente esto se deba a un equilibrio retardado.

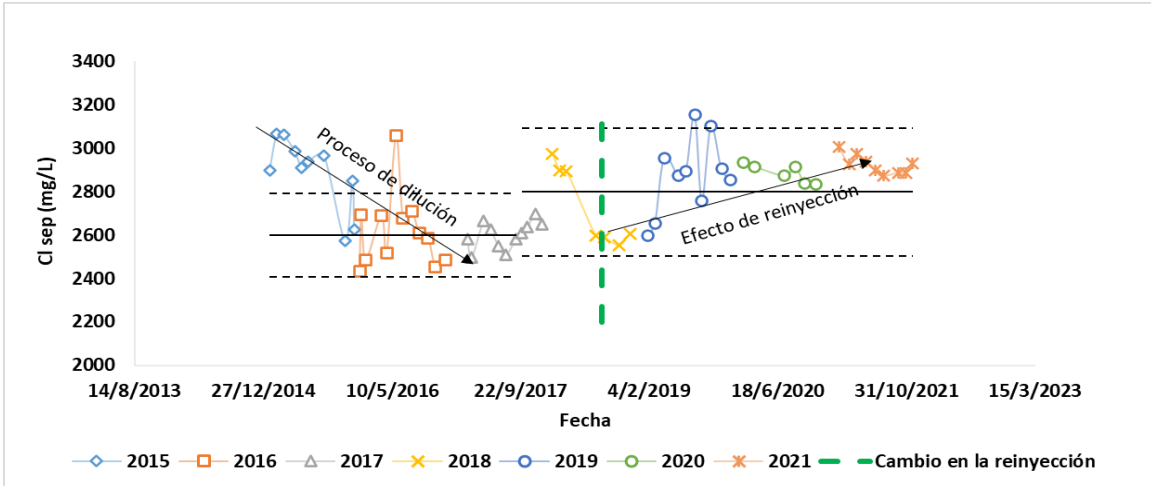


Figura 18: Gráfica del ion Cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-27.

Con lo que respecta a 1988, el pozo MT-27 exhibía una condición de equilibrio total y una estimación de temperatura de 280°C, encontrando además una estimación igual para 1987 pero en equilibrio parcial. Después de la puesta en marcha de la segunda unidad de turbina, en 1989 se observa una disminución en la estimación de temperatura 260°C. El año más afectado por los procesos en el reservorio suceden en 1994, este fluido tiende a aguas inmaduras. Puntos cerca de la esquina de \sqrt{Mg} , generalmente sugiere una alta proporción de las aguas subterráneas relativamente fría, no necesariamente “inmaduras”.

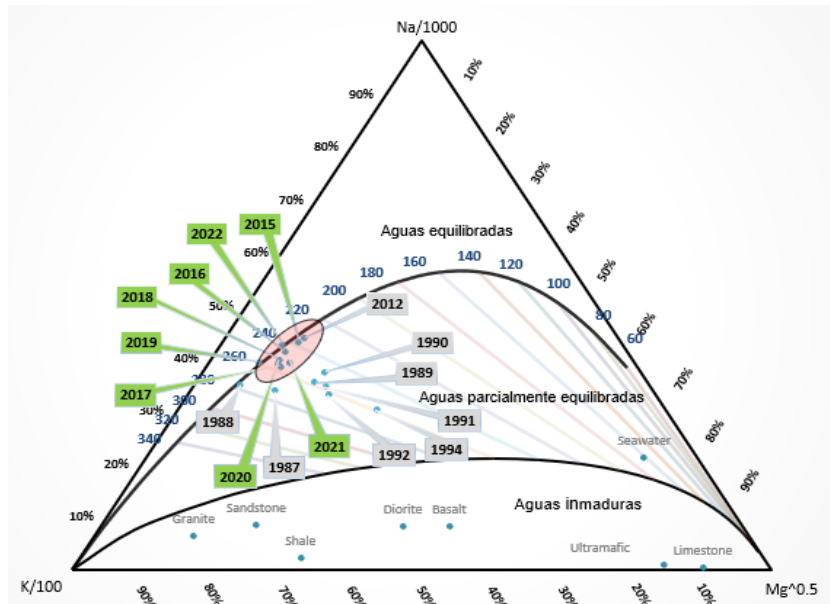


Figura 19: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-27.

Pozo MT-31

El pozo MT-31 Figura 20. Refleja equilibrio en todos los años con las fases mineralógicas ha temperaturas de 260°C a 270°C, desde el 2016 al 2021. En lo que respecta para los años 1990, 1992 y 1994 se tiene una tendencia hacia aguas inmaduras y estimación de temperatura de 220°C.

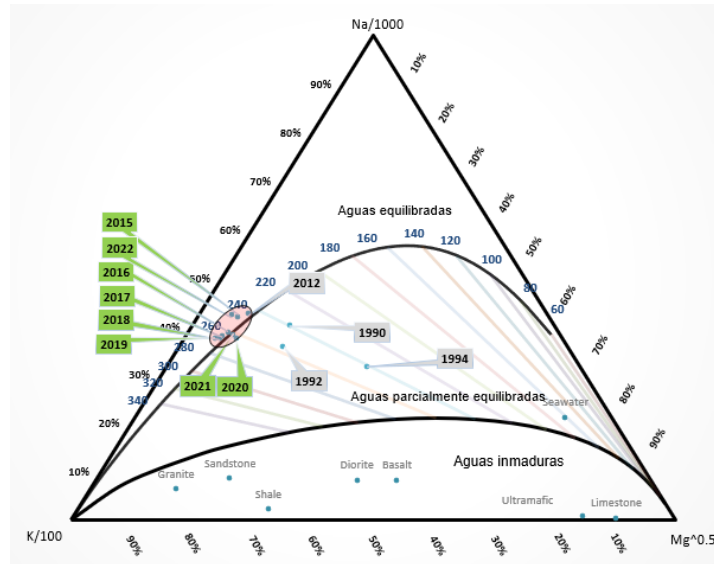


Figura 20: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-31.

Se puede observar Figura 21. Una mayor dispersión de los datos para el ion sulfato del 2018 al 2019, posiblemente ocasionada por el cambio en la reinyección (se cerraron los pozos RMT-15 y RMT-20). Del 2020 al 2021 se observa estabilidad de este ion.

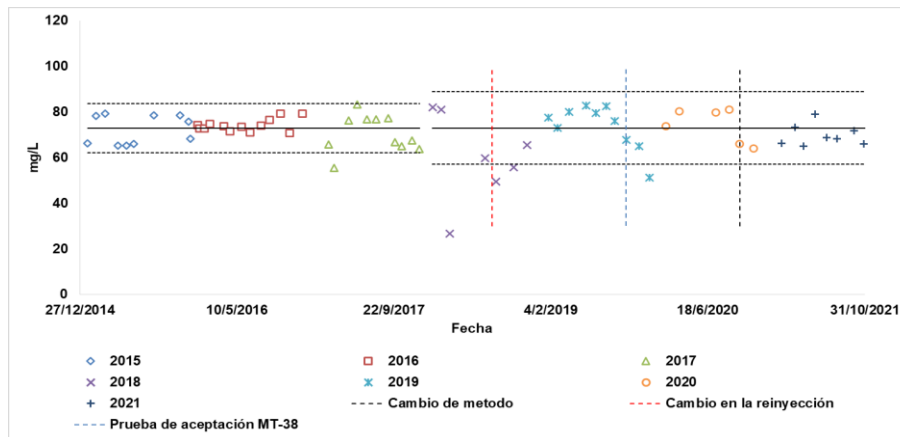


Figura 21: Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-31.

Pozo MT-35

El pozo MT-35 Figura 22. Es un pozo que se encuentra en la línea de equilibrio total con las fases mineralógicas con temperaturas de 240°C a 260°C, presentando desviación para los años 2020 y 2021 en la cual se encuentra un poco por debajo de la línea de equilibrio. En lo que respecta a los años 1989, 1990, 1991, 1992 y 1994, el pozo MT-35 se encuentra por debajo de la línea de equilibrio total es decir en zona de mezcla.

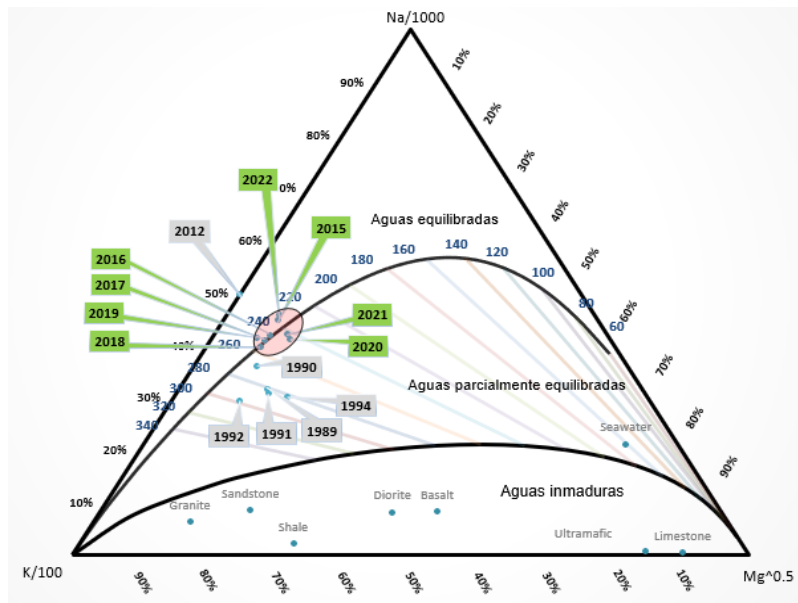


Figura 22: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-35.

Para el pozo MT-35 se observa Figura 23. Dispersión de los datos de las concentraciones del ion sulfato para el 2018, y algo muy en particular, un incremento en la media de los datos, posiblemente por el cambio en los puntos de reinyección.

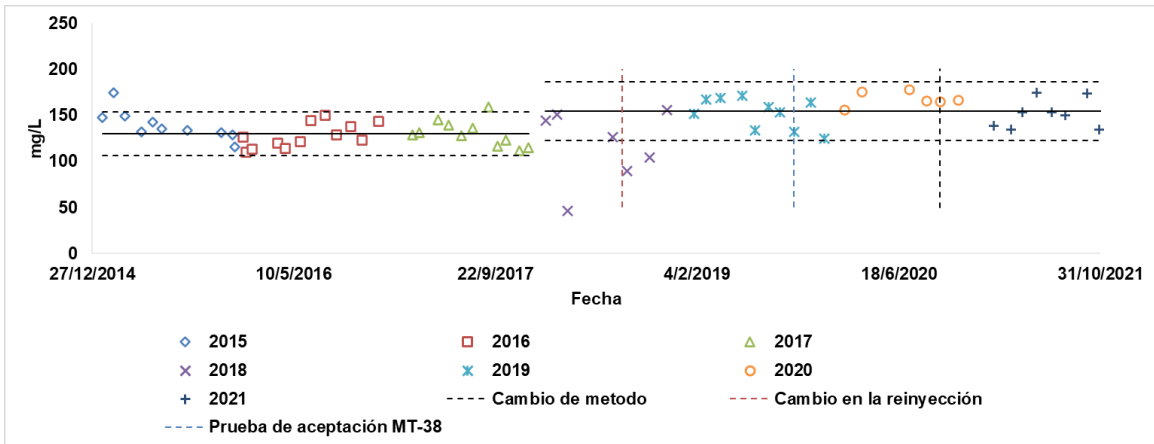


Figura 23: Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-35.

Con lo que respecta al ion cloruro en este pozo se vio afectado por el cambio en la reinyección el cual ocasionó un incremento en la media de la concentración para este pozo Figura 24.

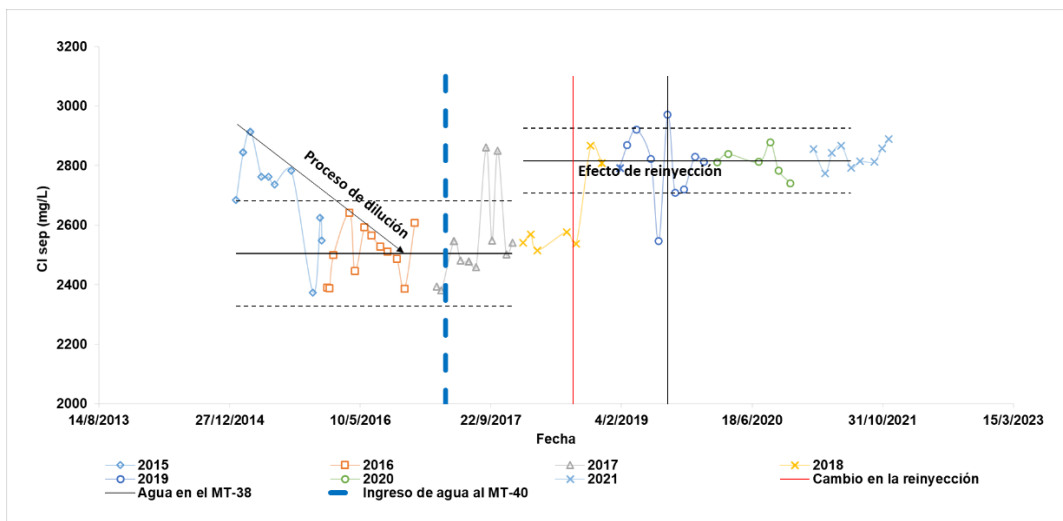


Figura 24: Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-35.

Pozo MT-36

Para el caso del pozo MT-36 Figura 25. La Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL) no lleva un monitoreo químico de la fase líquida como en el resto de los pozos. Esto es debido a que esta entrelazada con otro pozo MT-41, la separación de las fases utilizando el mini separador en el cabezal del pozo se hace un poco tedioso. Sin embargo, se logró muestrear la fase líquida en tres ocasiones para el

2020, como parte de esta investigación y así lograr obtener una interpretación de la evolución química para este pozo.

El 20 de marzo de 2020 se tomó muestra de agua para el MT-36 del cabezal del pozo utilizando el mini-separador (4 barg) y la temperatura de salida fue de 65°C, la información obtenida fue muy buena debido a la conductividad (2 027 $\mu\text{s}/\text{cm}$), lo cual indica que el fluido acarrea un poco de salmuera. Con respecto a la interpretación utilizando el diagrama triangular (Na-K-Mg), indica equilibrio parcial y estimación de temperatura de 280°C.

El 29 de septiembre de 2020 la muestra fue obtenida del cabezal con el mini-separador a una temperatura de salida de 63°C en este caso la conductividad fue baja (190,4 $\mu\text{s}/\text{cm}$) indicando que la muestra obtenida fue vapor condensado. La última muestra recolectada en este pozo fue 13 de noviembre de 2020, donde el punto de muestreo es el mismo con una presión del mini-separador de 4 barg, temperatura de salida de 86°C, y conductividad de 1 017 $\mu\text{s}/\text{cm}$, indica que es fluido parcialmente equilibrado y con una estimación de temperatura de 260°C.

Actualmente la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), tiene proyectado darle seguimiento químico a la fase líquida, y el 20 de julio de 2022 se obtuvo muestra de salmuera con conductividad de 7 643 $\mu\text{s}/\text{cm}$ y estimación de temperatura de 280°C igual que marzo de 2020. Posiblemente las diferencias en las conductividades se deban a la forma de regular el mini-separador, por lo cual se recomendaría validar la técnica de muestreo aplicada por el laboratorio de geoquímica.

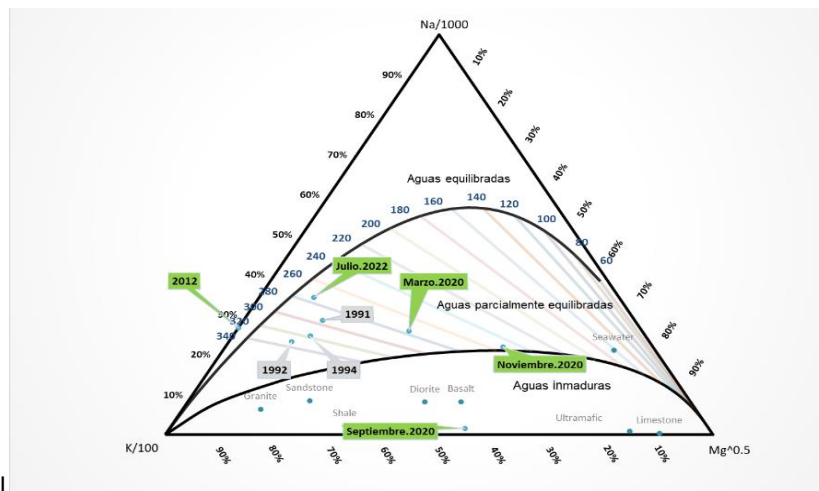


Figura 25: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-36.

Pozo MT-38

El 10 de julio de 2019 inició las pruebas de aceptación de agua para el pozo MT-38 y el 14 de octubre de 2019 se conecta al sistema. Para el año 2019 el pozo MT-38 Figura 26. Da una estimación de temperatura de 260°C y en el 2021 se observa una disminución a 240°C, la disminución en la temperatura estimada posiblemente sucede porque el pozo está tendiendo a estabilizarse.

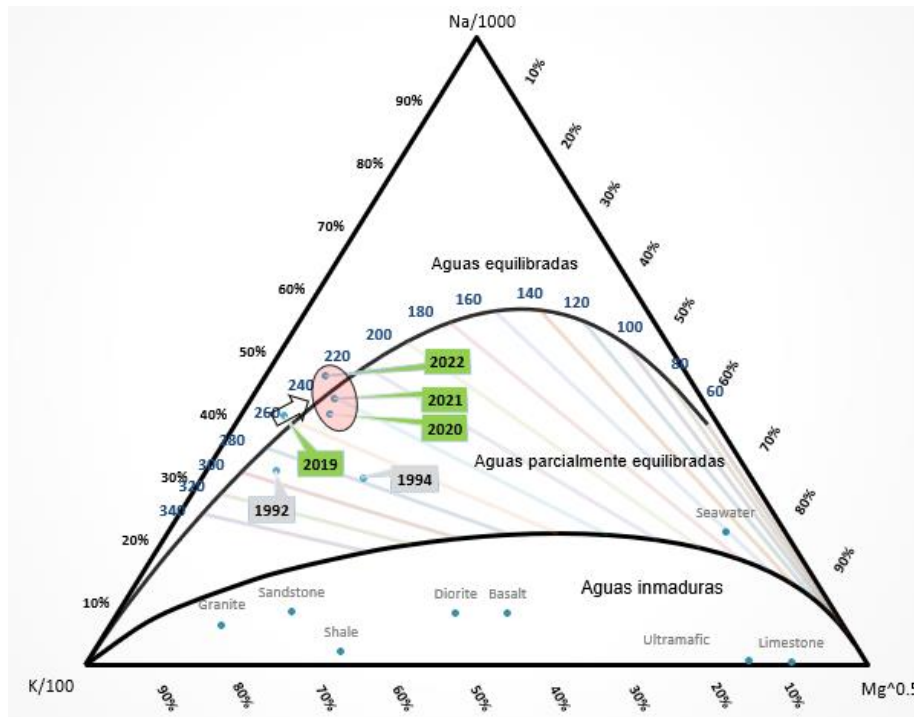


Figura 26: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-38.

Pozo MT-41

El diagrama triangular (Na-K-Mg) Figura 27. Muestra que el pozo MT-41, se encuentra en equilibrio total desde el 2015 al 2021, con excepción del 2020 que se localiza un poco por debajo de la línea de equilibrio. La estimación de la temperatura es 280°C a 320°C. Se puede apreciar también que este pozo disminuyó su temperatura estimada en el 2020 y 2021.

Se puede apreciar en la Figura 28. Que la concentración de cloruro incremento después de la acidificación, practicada el 8 de diciembre de 2016, se estabilizó en 2018 y las concentraciones han permanecido constantes.

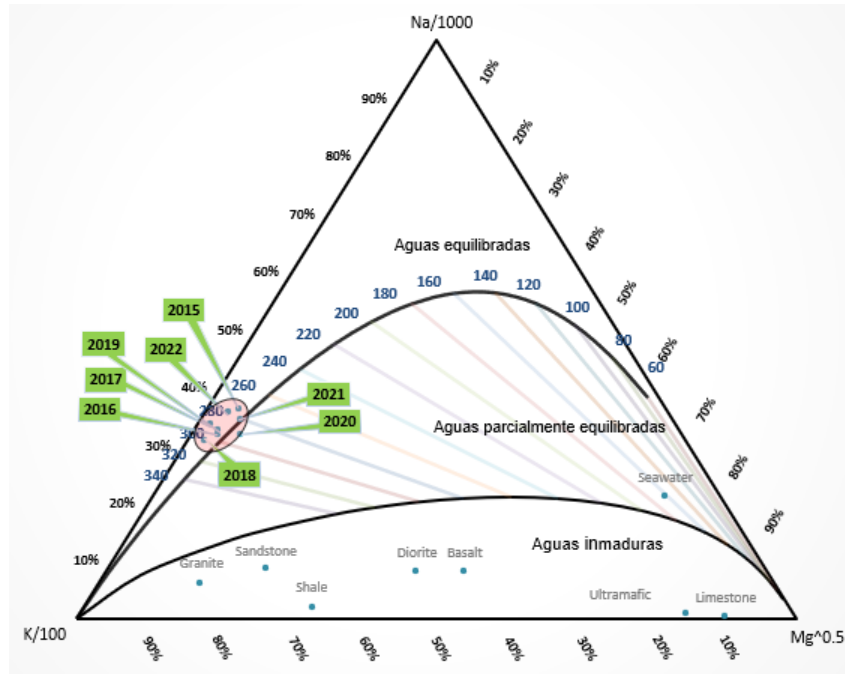


Figura 27: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-41.

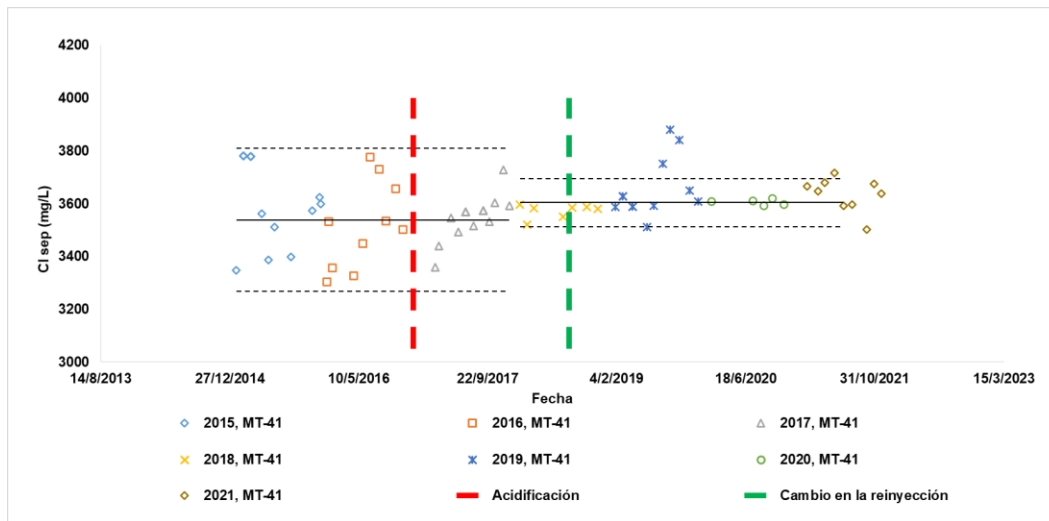


Figura 28: Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 pozo MT-41.

Pozo MT-42

El diagrama triangular (Na-K-Mg) Figura 29. Muestra que el pozo MT-42, se encuentra en la línea de equilibrio total para el año 2017, 2018 y 2019 con temperatura de 270°C. Sin embargo, para el 2021 la estimación de temperatura disminuyó a 260°C.

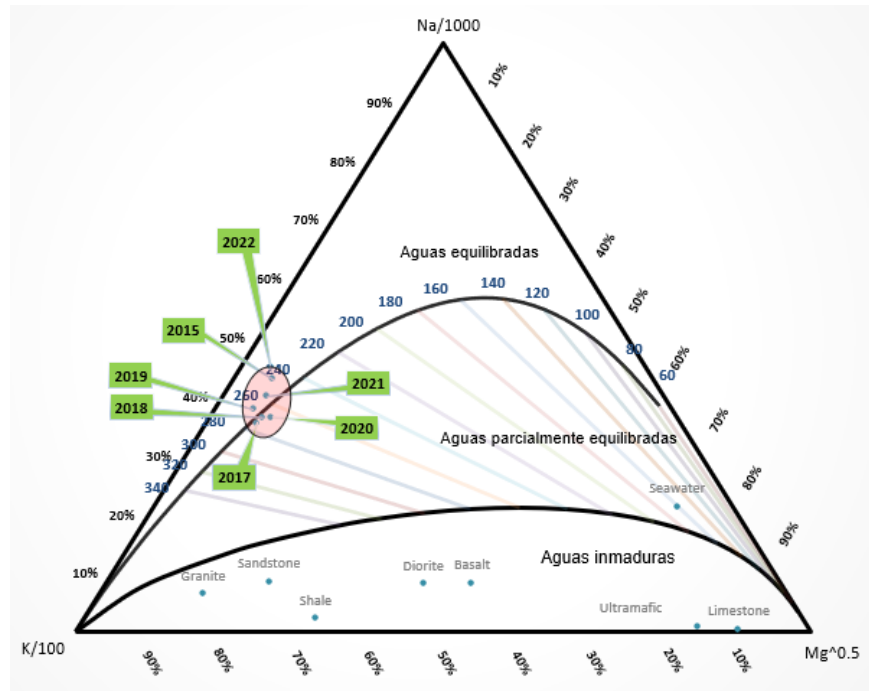


Figura 29: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-42.

La concentración promedio de iones cloruros en el pozo MT-42 fue de 3 000 mg/L. Se puede apreciar Figura 30. El comportamiento de los iones cloruros en los cuales es muy similar a los datos de producción Figura 31. Es decir, cualquier cambio en la producción del pozo afectan a los iones cloruros.

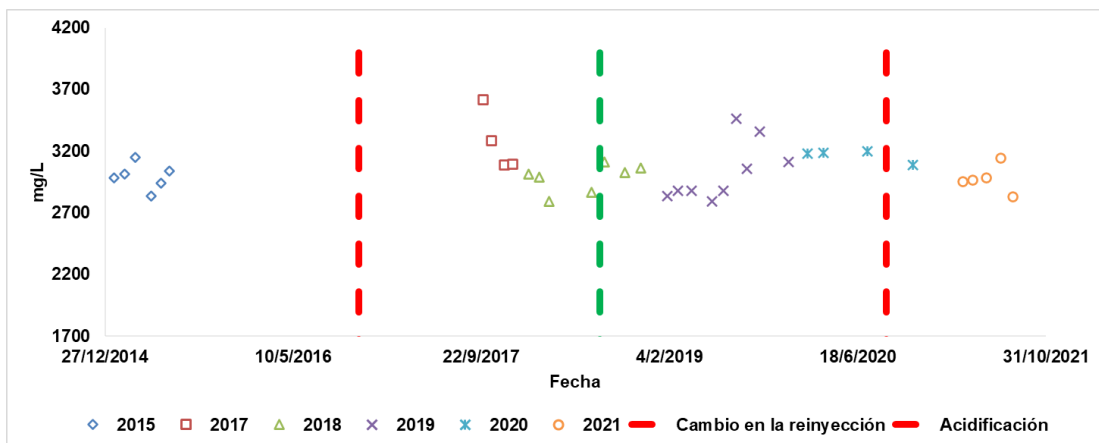


Figura 30: Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 para el pozo MT-42.

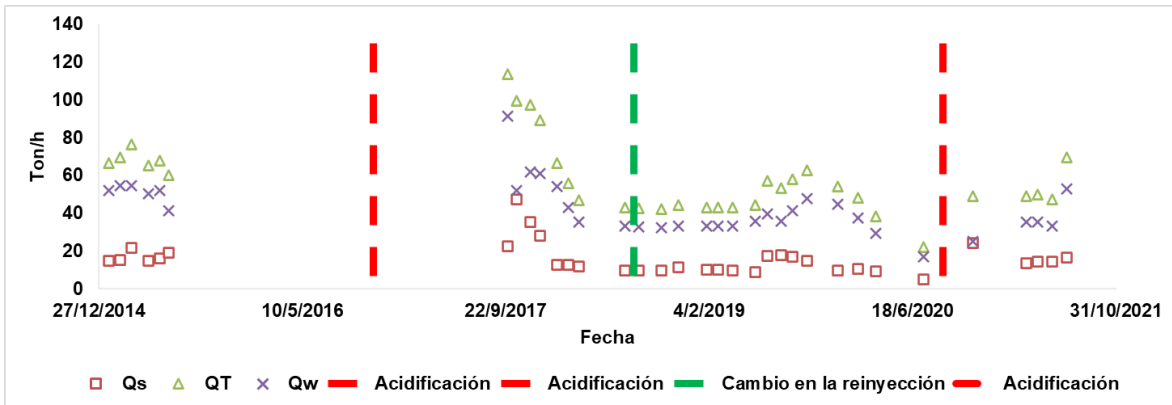


Figura 31: Gráfica de los datos de producción 2015 al 2021 para el pozo MT-42.

Pozo MT-43

El pozo MT-43 se encuentra en equilibrio total para todos los años Figura 32. Con excepción del año 2020, donde está un poco por debajo. La estimación del rango de temperatura es de 320°C a 360°C. Este pozo según el diagrama presenta disminución de temperatura para el periodo del 2016 al 2021 con excepción del año 2018 que dio un estimado de temperatura mucho mayor 360°C.

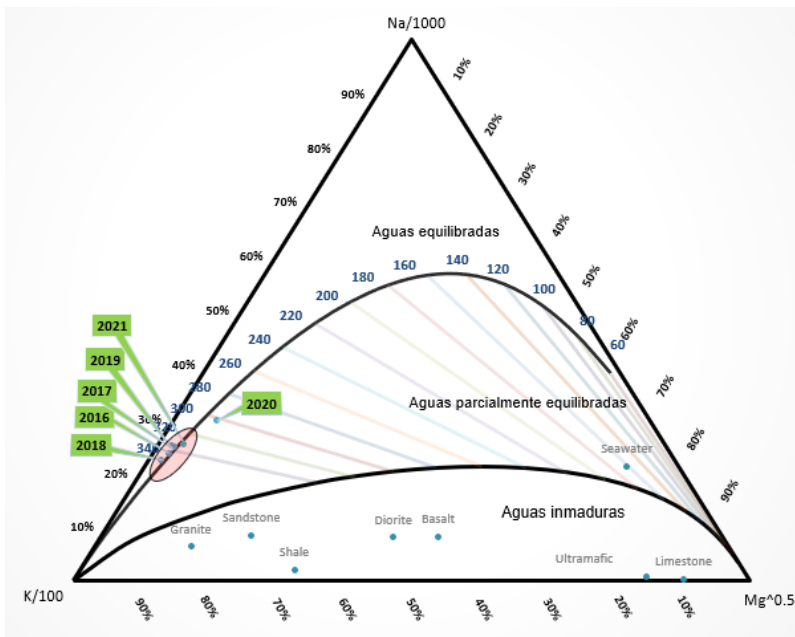


Figura 32: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor MT-43.

El comportamiento de los iones cloruros en el pozo MT-43 Figura 33. Presenta estabilidad en el tiempo al igual que los datos de producción, a pesar del cierre de dos pozos de reinyección.

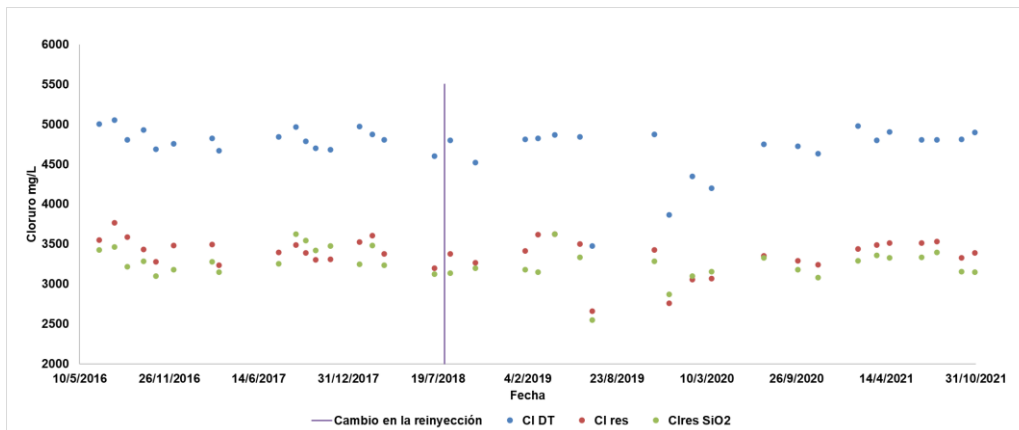


Figura 33: Gráfica del ion cloruro en el tiempo 2015 al 2021 para el pozo MT-43.

Pozo OM-53

El OM-53 es un pozo un poco diferente a los demás, es cíclico es decir sus condiciones son cambiantes. Al igual que al pozo MT-36, la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL) no monitorea la fase líquida de este pozo. Esto es debido a las mismas razones que el pozo MT-36, es decir que es un pozo que está entrelazado. Las condiciones cambiantes de este pozo son particulares, se piensa que en este pozo existen dos zonas de alimentación, una en la cual la fracción de vapor es alta y otra zona dominada por líquido.

Para el año 2020 se obtuvieron tres muestras. Para el mes de septiembre de 2020 se presenta la máxima temperatura estimada con 340°C, con conductividad de 4 947 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para noviembre de 2020 se obtuvo 300°C con conductividad de 7 530 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Figura 34. La muestra del 20 de marzo de 2020 tomada en la trampa de humedad 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La diferencia ocurre posiblemente a las mismas razones que el pozo MT-36, es decir a la metodología empleada para separar las fases en el mini-separador. Actualmente en 2022 se está siguiendo un monitoreo continuo de la fase líquida que inicio en julio de ese mismo año, esto con el fin de recolectar más datos para una futura interpretación geoquímica. Los últimos dos muestreos en este pozo, su promedio de conductividad fue de 11 160 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lo que indica que este pozo es alimentado por una zona de líquido dominante.

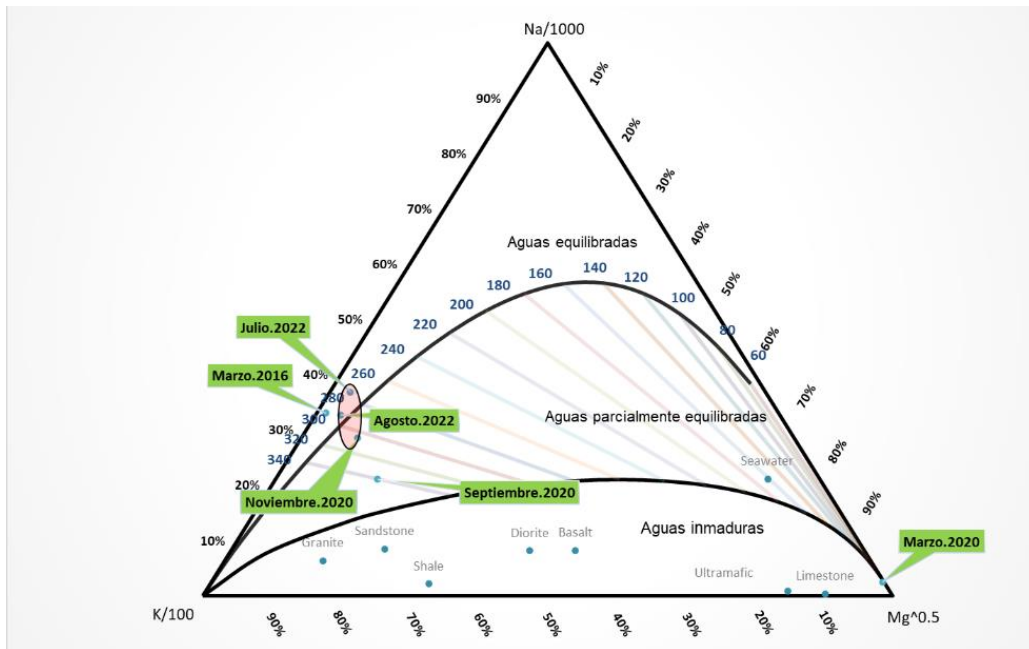


Figura 34: Diagrama triangular Na-K-Mg para el pozo productor OM-53.

5.1.3 Diagrama triangular (Cl-SO₄-HCO₃)

Con el diagrama triangular (Cl-SO₄-HCO₃) Figura 35. Se demuestra que los pozos productores se encuentran en aguas maduras de origen geotérmico (aguas que han interactuado con las rocas por un tiempo muy largo). La muestra obtenida en septiembre de 2020 para el MT-36, cae en aguas periféricas (168 μ S/cm) y para marzo de 2020 para el OM-53 la muestra (211 μ S/cm), estas muestras se colocan en aguas periféricas y volcánicas respectivamente. Estas muestras son el condensado del vapor, lo que indicaría que no son representativas de la fase líquida. Además de eso no son representativas para la interpretación porque el balance iónico es demasiado alto. Posiblemente la metodología de muestreo no fue la adecuada. Sin embargo, es interesante la diferencia en el vapor condensado de estos dos pozos (MT-36 y OM-53).

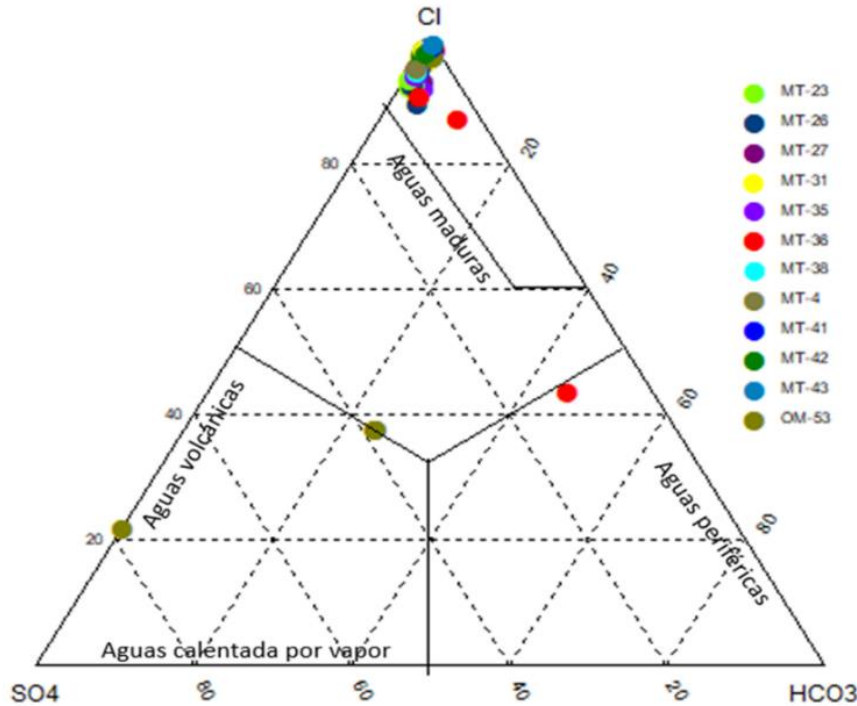


Figura 35: Diagrama triangular (Cl-SO₄-HCO₃) para los pozos productores del campo geotérmico Momotombo.

El diagrama Figura 36. Muestra el aumento en la concentración del ion sulfato en el tiempo para los pozos MT-23, MT-26, MT-27 y MT-35, haciendo la comparación entre 1994 y después de 2015, este aumento posiblemente se deba a la introducción de oxígeno al sistema por medio de agua subterránea fría o efecto de la reinyección.

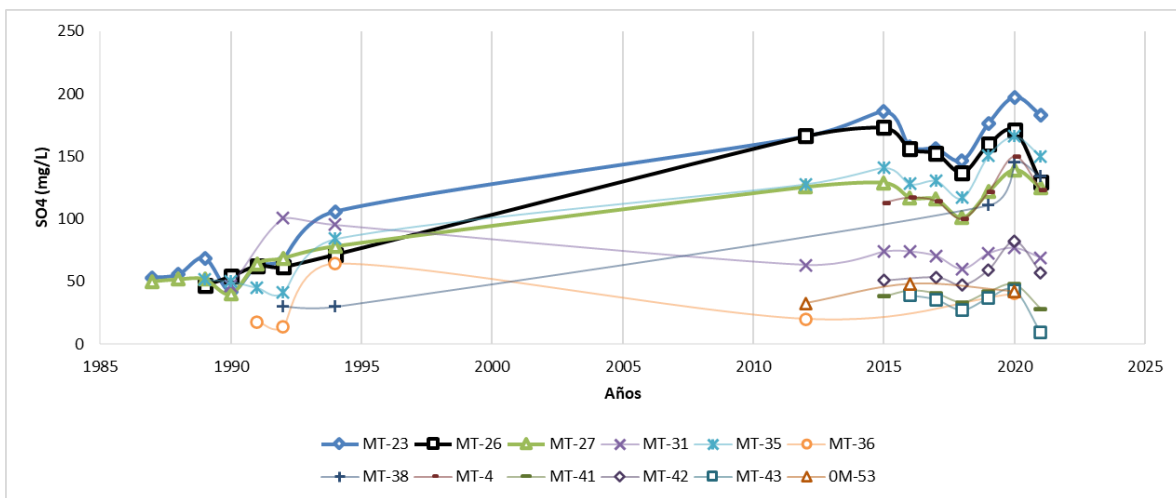


Figura 36: Gráfica del ion sulfato en el tiempo 2015 al 2021 para los pozos productores del campo geotérmico Momotombo.

5.2 Estimación de Temperaturas Profundas del Reservorio Geotérmico Momotombo

La geotermometría constituye uno de los métodos más importantes usados en la determinación indirecta de las temperaturas de fondo. Los geotermómetros que utiliza la Dirección de Estudios Geotérmico (DEG) de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), para el monitoreo del campo geotérmico Momotombo son los de Na-K (Fournier, 1979), Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), SiO₂ (Fournier, 1977). Los cambios característicos de los indicadores geoquímicos con el tiempo proporcionan información de los procesos del reservorio en los pozos en estudio. Los geotermómetros de SiO₂ (Fournier, 1977) y Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) combinando con la entalpía del fluido proporcionan información del estado y de la temperatura del fluido a distancias cercana y lejanas de los pozos (Echeverría & Gámez, 2018).

Pozo MT-4

El pozo MT-4, tiene una profundidad total 1 450 m, y la tubería ranurada (slotted liner) instalada de 734 m a 1 450 m, la máxima temperatura medida fue 327°C, y la temperatura estimada con Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) fue de 305°C (Tonani & Teilman, 1980). Actualmente este pozo presenta estimación de temperatura con el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) de 230°C. En el año 2020 se estimó la máxima temperatura 242°C, además con este geotermómetro se observa incrementos desde 2017 al 2020. En 2021 disminuye hasta 231°C, posiblemente por la entrada al sistema de producción del pozo MT-38 en octubre de 2019. Con el geotermómetro Na-K (Fournier, 1979) hasta el 2018 presentaba el mismo comportamiento que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), luego a partir del 2019 se van observando leves disminuciones en el tiempo.

Con el geotermómetro SiO₂ (Fournier, 1977), se observa disminución de 2015 (227°C) al 2016 (215°C), posiblemente se deba a la entrada de agua de menor temperatura por el este del campo. Para el periodo 2017 al 2019 se mantiene casi constante (aproximadamente a una temperatura de 210°C). Para el 2020 y 2021 disminuye a 206°C. Esta diferencia en los geotermómetros catiónicos y de sílice ocurre debido a que los geotermómetros catiónicos se basan en relaciones iónicas y no en concentración de una sola especie química como los geotermómetros de sílice. Sin embargo, su aplicación podría verse afectada por reacciones de

intercambio iónico con minerales arcillosos, procesos de enriquecimiento de algunos cationes o por falta de equilibrio entre los solutos y minerales de alteración presentes en estos sistemas.

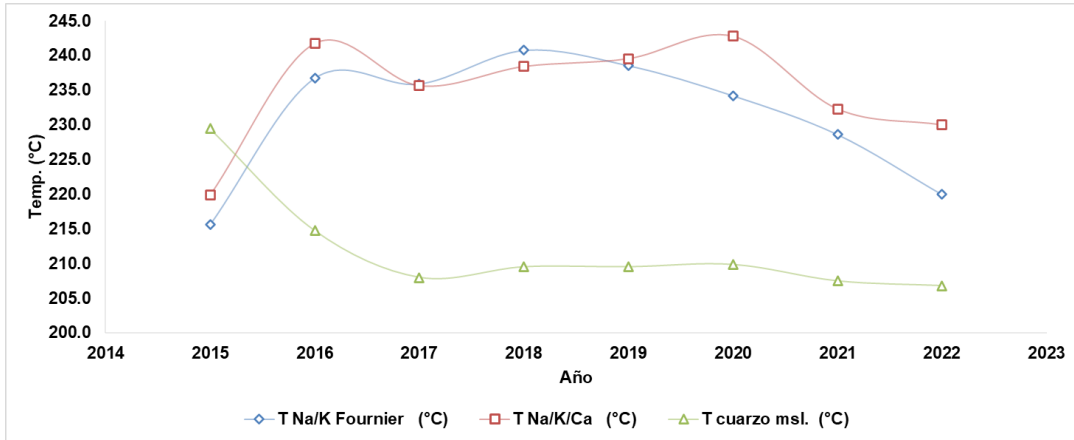


Figura 37: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-4.

Se observa un comportamiento de disminución en el tiempo para la entalpía medida (H_m) y entalpía de sílice (H_{cuarzo}) (Figura 38). Lo contrario ocurre para la entalpía de los geotermómetros catiónico ($H_{\text{Na/K}}$, $H_{\text{Na/K/Ca}}$), porque las estimaciones de temperaturas con estos geotermómetros para el mes de julio de 2020 son altas, 287 °C con Na/K y 282°C con Na/K/Ca. El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-4 ($H_{\text{Na/K/Ca}} > H_m > H_{\text{SiO}_2}$) indica que el pozo está sufriendo entrada de agua más fría, pero a partir del año 2020 la entalpía medida (H_m) es igual (H_{SiO_2}) indicando entrada de agua más fría con reequilibrio de SiO_2 cerca del pozo.

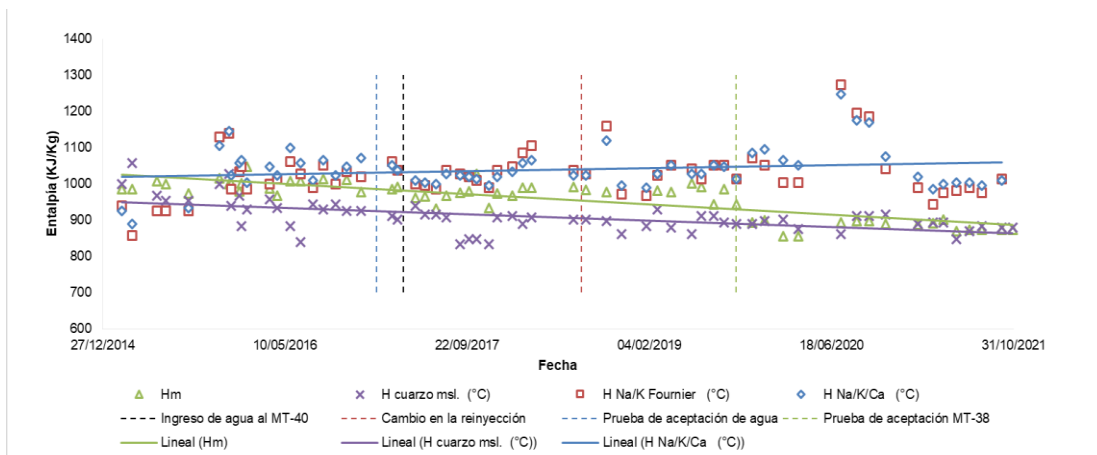


Figura 38: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-4.

Pozo MT-23

El pozo MT-23 tiene una profundidad total de 821 m, y la tubería ranurada (slotted liner) instalada desde los 324 m a 821 m: La temperatura medida a profundidades de 324 m a 600 m fue de 225°C a 240°C y de los 600 m a 810 m fue de 240°C a 245°C (Tonani & Teilman, 1980). En febrero de 2020 se realizó un registro de temperatura a 367 m y fue de 183.41°C, de acuerdo a los informes de MPC (Momotombo Power Company), este pozo venía mostrando un enfriamiento acelerado y después de las modificaciones realizadas en el sistema de reinyección en agosto de 2018, aparentemente la velocidad de enfriamiento ha disminuido en comparación con los años anteriores.

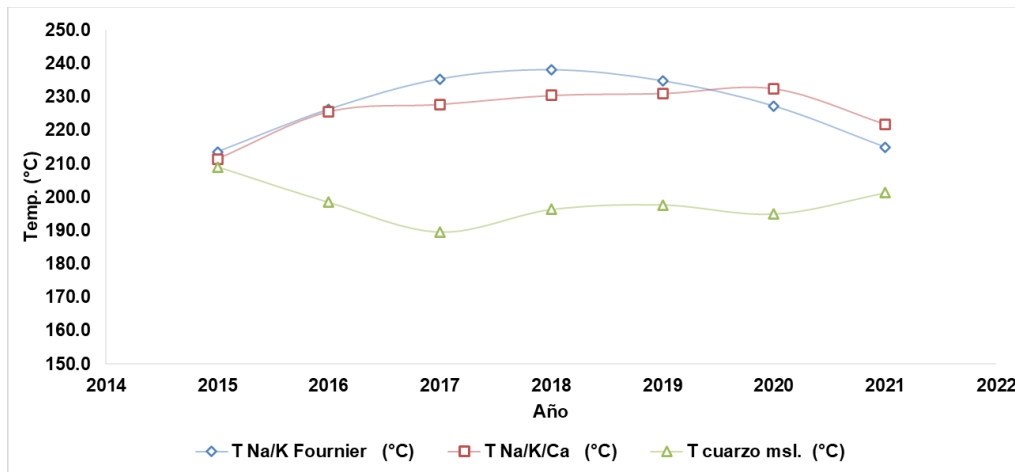


Figura 39: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-23.

La temperatura estimada con Na-K (Fournier, 1979) en promedio fue 227°C y su comportamiento fue el de aumentar en 2015 al 2017, luego del 2018 al 2021 se observan disminuciones en el tiempo, lo contrario ocurre con el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977), que se observa que disminuye de 2015 al 2016 producto de la entrada de agua de menor temperatura. Para fundamentar lo planteado con la entrada de agua de menor temperatura, se aplicó la metodología de Truesdell (1988), que está relacionado a los efectos que causan los procesos físicos, comparando los geotermómetros de SiO₂ (Fournier, 1977) Na-K-Ca (Fournier and Truesdell, 1973) y la temperatura medida. A continuación, en la Tabla 9. Se presenta la comparación de los geotermómetros del año 2016, 2019 y 2020, ya que en esos años se cuenta con datos de medición de temperatura (T_{med}).

Tabla 9: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-23

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2016	186.0	198.4	225.5
2019	183.4	197.6	231.0
2020	183.5	194.9	232.4

El geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición. Este comportamiento de las temperaturas indica entrada de agua fría en la parte somera del reservorio y se mezcla con fluido de éste, hace bajar su entalpía y temperatura SiO₂ (Fournier, 1977) (Martínez & Romero, 2019). El comportamiento del patrón de entalpías ($H_{NaKCa} > H_{SiO_2} > H_m$) (Figura 40), para el pozo MT-23, indica que el pozo está sufriendo entrada de agua más fría. En el 2019 la H_{SiO_2} y H_m tienden a ser iguales lo que resulta de una mezcla de agua fría cerca del pozo con reequilibrio de H_{SiO_2} .

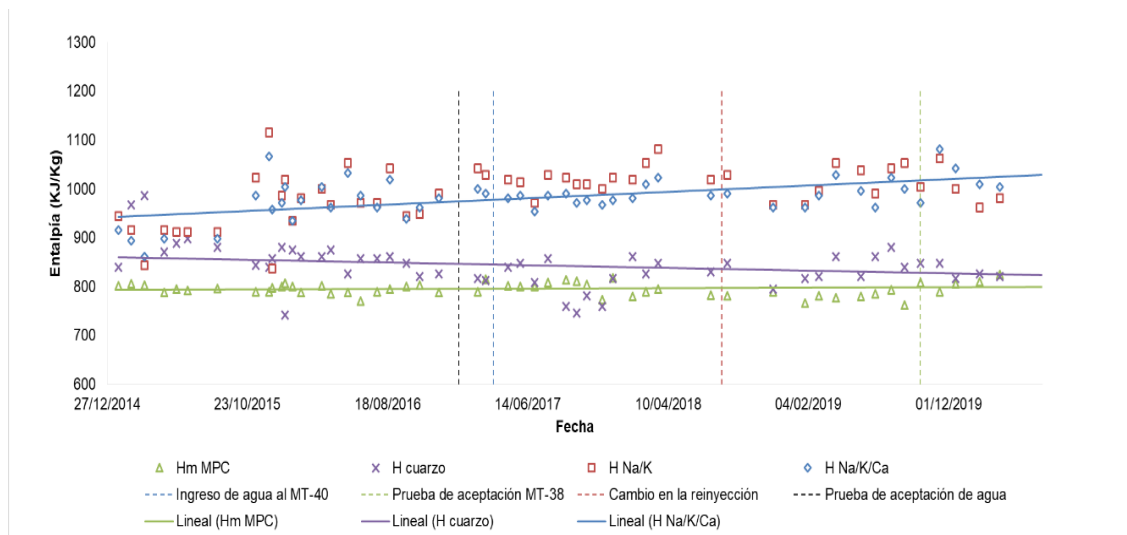


Figura 40: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-23.

Pozo MT-26

El pozo MT-26 tiene una profundidad total 640 m, y la tubería ranurada (slotted liner) se encuentra instalada desde los 365 m a 638 m. La temperatura medida de 365 m a 435 m fue de 235°C a 260 C y de los 435 m a 638 m fue de 260°C a 250°C. La temperatura estimada con Na/K fue de 276°C y para el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977) fue de 324°C para mediado de mayo de 1979 (Tonani & Teilman, 1980).

En mayo de 2019 a 300 m de profundidad se midió una tempera de 187.19°C y en febrero de 2020 a la misma profundidad se observa una temperatura de 187.10°C, la temperatura permanece relativamente estable según información proporcionada por MPC.

Tabla 10: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-26

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2019	187.9	197.8	236.7
2020	187.1	193.5	238.3

Comparando los geotermómetros de SiO₂ (Fournier, 1977), Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) y la temperatura medida se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica que el proceso que predomina es entrada de agua fría. El geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977) (Figura 41), se observa que disminuye de 2015 al 2016 producto de la entrada de agua de menor temperatura y más diluida. El comportamiento de los geotermómetros de Na-K (Fournier, 1979) y Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) es parecido, además en los años en los cuales se cuenta con temperatura medida esta permanece relativamente estable al igual que los datos de medición, pero para el año 2021 presenta disminución.

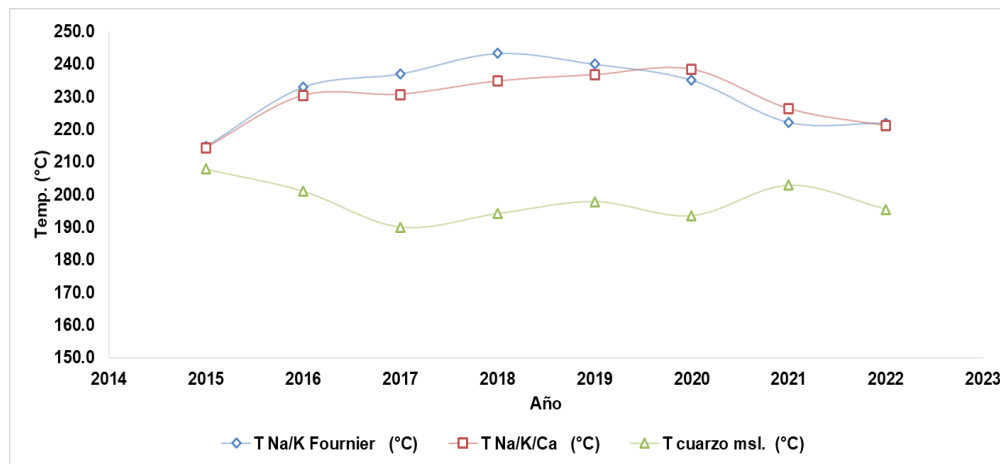


Figura 41: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-26.

El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-26 ($H_{NaKCa} > H_{SiO_2} > H_m$) es igual al del pozo MT-23, indica que el pozo está sufriendo entrada de agua más fría con la diferencia que este pozo no tiene reequilibrio H_{SiO_2} .

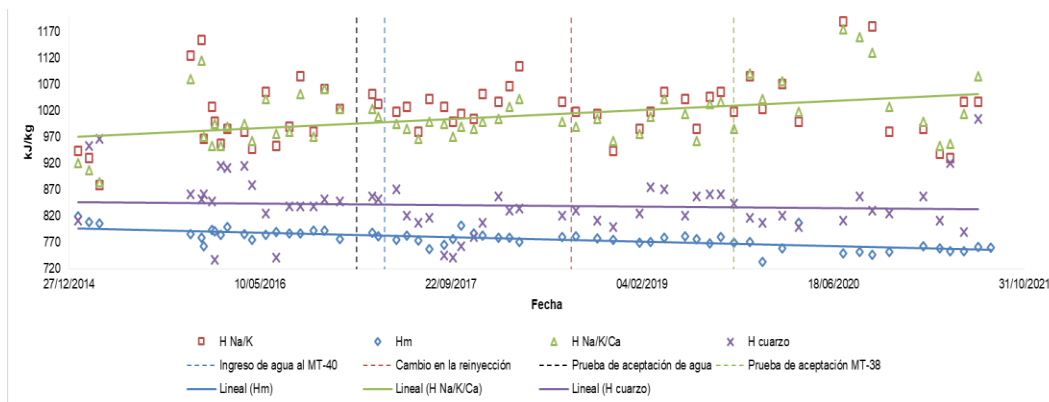


Figura 42: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-26.

Pozo MT-27

El pozo MT-27 tiene una profundidad total de 442 m, y posee la tubería ranurada (slotted liner) instalada desde los 200 m a 430 m, la temperatura medida fue de 240 °C a 249°C. La temperatura estimada con Na/K fue de 281°C y para el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977) fue de 311°C para el año 1979 (Tonani & Teilman, 1980). El 18 de febrero 2020 se observó una temperatura máxima de 198.87°C a 316 m de profundidad; en mayo 2019 a esa misma profundidad se midió una temperatura de 197.86°C, la temperatura muestra un incremento de aproximadamente 1°C. De acuerdo a los perfiles de temperatura de MPC el pozo venía mostrando un enfriamiento acelerado y después de las modificaciones realizadas en el sistema de reinyección en agosto 2018, este enfriamiento se ha frenado.

Tabla 11: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-27

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2016	178.0	207.3	232.9
2019	197.9	209.0	239.9
2020	198.9	208.3	247.3

En la (Tabla 11) se comparan los geotermómetros de SiO₂ (Fournier, 1977), Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) y la temperatura medida, se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica que el proceso que predomina es entrada de agua fría.

Con el geotermómetro de Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) Figura 43. Muestra incremento en la temperatura estimada al igual que la temperatura medida para el año 2020, el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977), después del 2019 permanece relativamente estable, lo que podría sustentar lo observado por medición, se ha frenado el enfriamiento para este pozo.

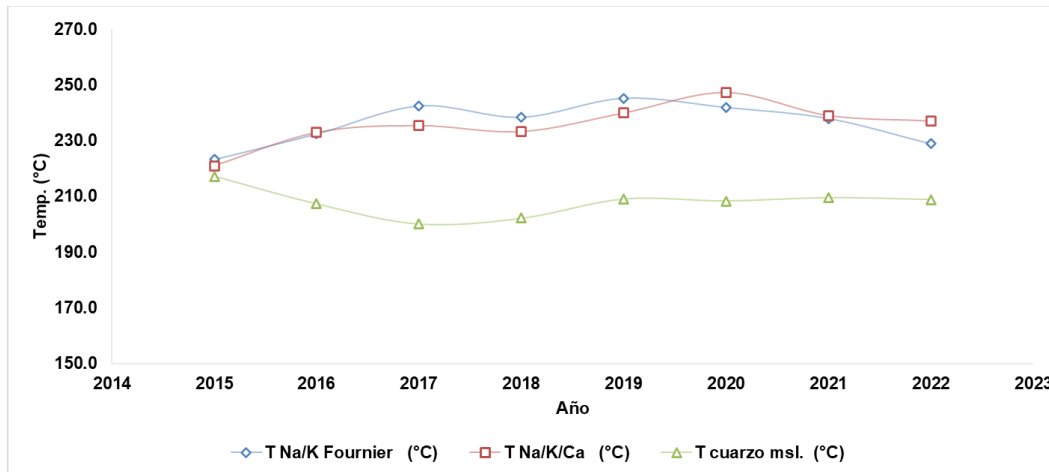


Figura 43: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-27.

El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-27 ($H_{NaKCa} > H_m = H_{SiO_2}$), resulta de una mezcla con agua fría cerca del pozo con reequilibrio H_{SiO_2} .

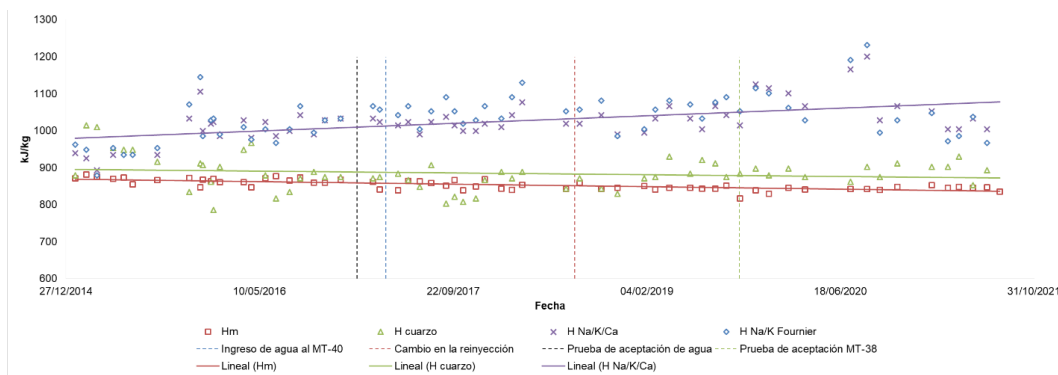


Figura 44: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-27.

Pozo MT-31

En mayo de 2019 y febrero de 2020 a una profundidad de 525 m se midió temperaturas de 220.79°C y 220.8°C respectivamente, la temperatura permanece relativamente estable para este pozo. El geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977) para los años 2019 y 2020 permanece estable al igual que los datos de medición.

El geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) para esos mismos años presenta un leve incremento en la temperatura estimada. En la Tabla 13 se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica que el proceso que predomina es entrada de agua fría.

Tabla 12: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-31

Pozo	T _{med} <T _{SiO₂} <T _{Na/K/Ca}		
2019	220.8	229.7	253.0
2020	220.8	229.9	257.7

Con los geotermómetros SiO₂ (Fournier, 1977) Figura 45. Se observa disminución desde el 2015 (239°C), 2016 (231°C) y 2017 (226°C), posiblemente esto se deba al proceso que predomina entrada de agua fría y más diluida. Los geotermómetros Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) y Na-K (Fournier, 1979) para el 2015 al 2016 aumentan y su comportamiento es similar a excepción del 2020 que el geotermómetro Na-K (Fournier, 1979) aumenta y Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) disminuye.

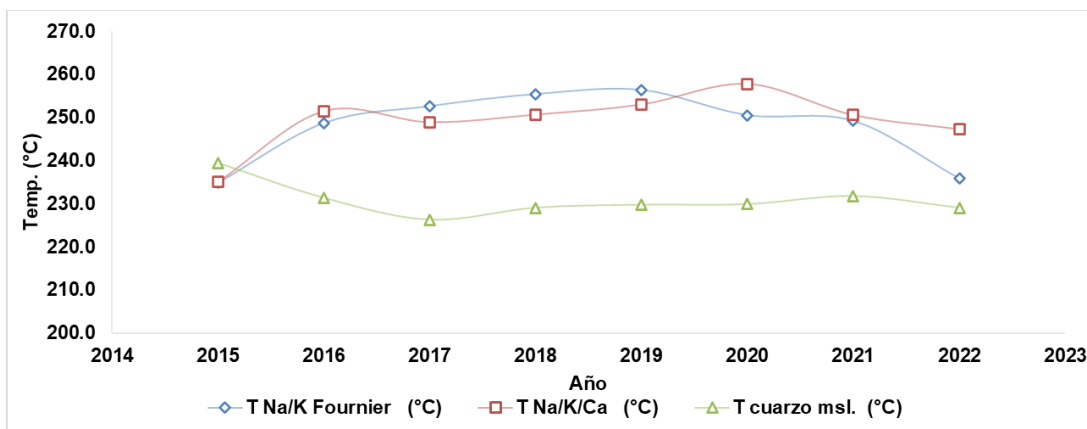


Figura 45: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-31.

Se observa Figura 46. Un aumento en el tiempo para H_m y H_{cuarzo} se observa una disminución. Para la entalpía de los geotermómetros catiónico (H Na/K, H Na/K/Ca) se observa un comportamiento parecido al MT-4, MT-26, MT-27. El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-31 (H_{NaKCa} > H_m = H_{SiO₂}), resulta de una mezcla con agua fría cerca del pozo con reequilibrio H_{SiO₂}.

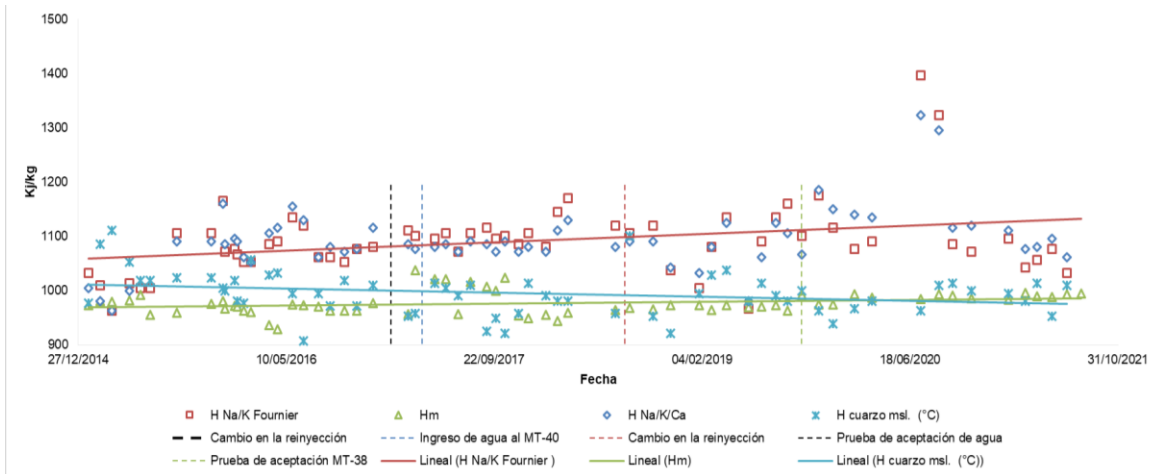


Figura 46: Gráfica de patrón de entalpia del pozo MT-31

Pozo MT-35

En mayo de 2019 y febrero de 2020 Momotombo Power Company (MPC), realizó registro dinámico de presión, temperatura en el pozo MT-35 a 585 m de profundidad donde se midieron temperaturas de 198,56 y 198,15 respectivamente. Al igual que el pozo MT-23 y MT-26, este pozo venía mostrando un enfriamiento rápido y después de las modificaciones realizadas en el sistema de reinyección en agosto de 2018, aparentemente este enfriamiento ha disminuido en comparación a años anteriores. En Tabla 14, se muestra que el geotermómetro SiO₂ (Fournier, 1977) y de Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), para los años 2019 y 2020 no presentan cambios significativos.

Tabla 13: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-35

Pozo	Tmed<TSiO ₂ <TNa/K/Ca		
2019	198.56	203.1	236.4
2020	198.15	203.4	237.7

En la (Tabla 13), se muestra que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica que el proceso que predomina es entrada de agua fría con reequilibrio de sílice.

En la Figura 47. Se observa que el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977) disminuye para el año 2015 (215.8°C), 2016 (204.5°C) y 2017 (198.2°C) producto de la entrada de agua fría por el este del campo. Cabe mencionar que la temperatura medida para el 2019 y 2020 coinciden con la temperatura estimada en el año 2018

(198.6°C), por lo que podríamos concluir que en este pozo existe reequilibrio de sílice y además que a partir del 2019 el enfriamiento se ha detenido.

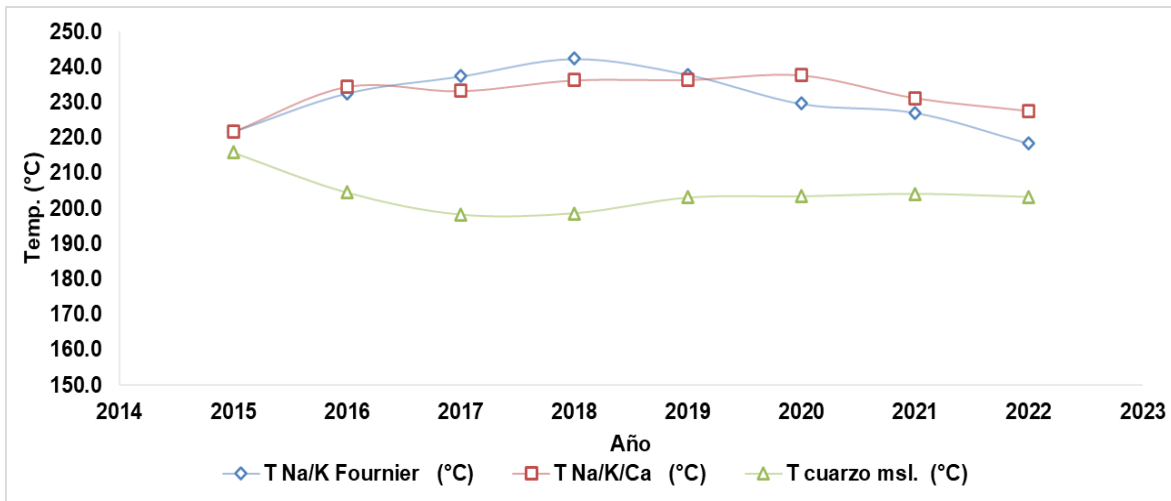


Figura 47: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-35

Según el patrón de entalpía ($H_m > H_{NaKCa} > H_{SiO_2}$), presenta ebullición del líquido durante el flujo al pozo respondiendo a una disminución de presión en el fondo del pozo. La ebullición y la temperatura disminuyen cerca del pozo y causa la transferencia de calor de las rocas para aumentar los valores de H_m . La SiO_2 se equilibra por lo que H_{SiO_2} disminuye. H_{NaKCa} por la lenta reacción no es afectado.

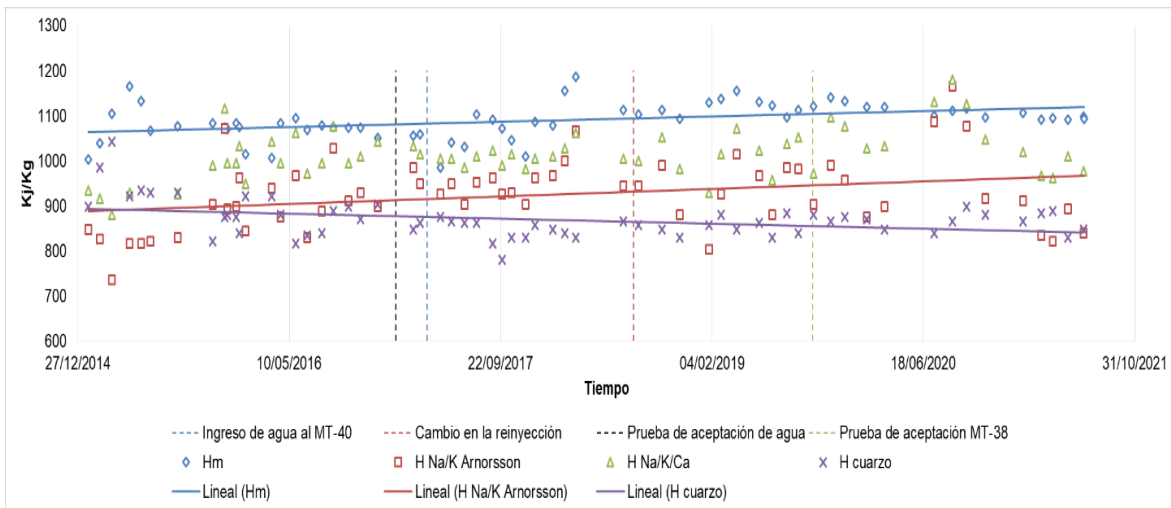


Figura 48: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-35

Pozo MT-36

En junio de 2016, a 630 m de profundidad se midió una temperatura de 175.2°C y en marzo de 2020 a esa misma profundidad 176.3°C, donde la temperatura muestra incremento de 1.1°C. Este pozo no se pudo registrar por casi 4 años, es probable que en el periodo 2016 a 2020, el pozo pudo haber experimentado algún cambio en sus condiciones de fondo. El geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) muestra que para el 20 de marzo de 2020 la estimación de temperatura fue (239°C) y para noviembre de 2020 (205°C). Las estimaciones de temperaturas pueden que no sean muy representativa debido a las diferencias de conductividades (2 027 $\mu\text{S/cm}$ y 1 017 $\mu\text{S/cm}$ respectivamente) y además que estas muestras de agua del 2020 se encuentran en agua parcialmente equilibrada Figura 25.

El 27 de julio de 2022, ENEL estaría retomando el monitoreo de la fase líquida del pozo MT-36, donde la conductividad fue mucho mayor (7 643 $\mu\text{S/cm}$) con estimación de (263°C), es decir esta muestra es más representativa de la fase líquida que las muestras tomadas en 2020. Estas diferencias posiblemente ocurrieron por la forma de tomar las muestras (no se llevó a cabo una buena separación de las fases con el mini separador).

Tabla 14: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-36

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2016	175.2		
2020	176.3	154.5	239.0
2022		223.6	263.7

En la Tabla 14. Se observa que el geotermómetro de SiO₂ (Fournier, 1977), para marzo de 2020 y julio de 2022 da estimaciones de 155°C y 224°C respectivamente. Por la falta de datos no se puede tener una tendencia e interpretación clara.

Pozo MT-38

El pozo MT-38 tiene una profundidad total 1137 m, La temperatura estimada con Na/K fue de 275°C y el geotermómetro SiO₂ (Fournier, 1977) fue de 251°C para el año 1992 (Tonani & Teilman, 1980).

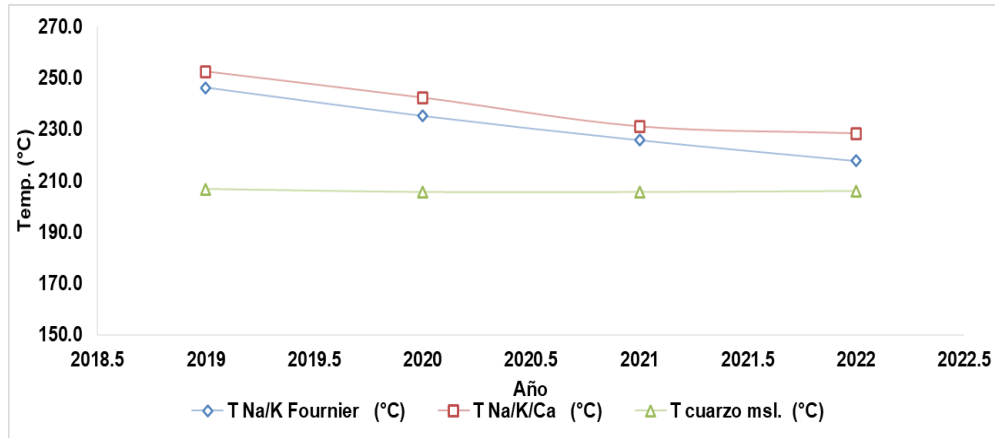


Figura 49: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-38

Actualmente en 2021, este pozo presentó estimación de temperatura con el geotermómetro de Na-K (Fournier, 1979) de 225.8°C y con SiO₂ (Fournier, 1977) fue de 205.7°C.

Tabla 15: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-38

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2019	226.42	206.8	252.6
2020	204.77	205.7	242.4

En la Tabla 15. Se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), para el 2020 es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica que el proceso que predomina es entrada de agua fría con reequilibrio de sílice. El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-38 ($H_{NaKCa} > H_m = H_{SiO_2}$), resulta de una mezcla con agua fría cerca del pozo con reequilibrio H_{SiO₂}.

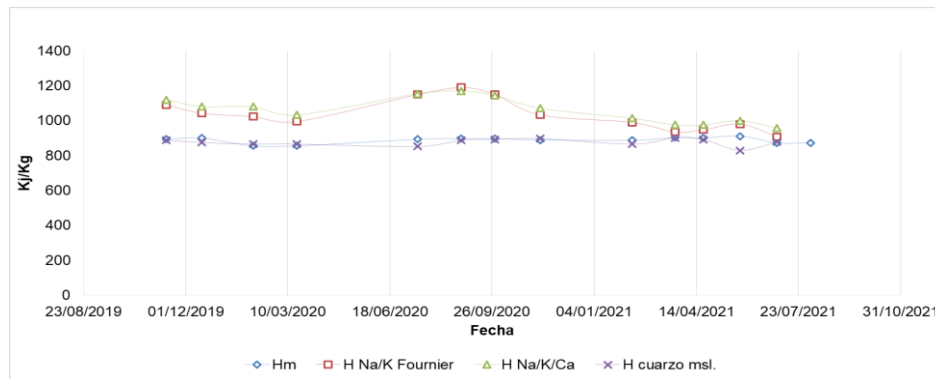


Figura 50: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-38

Pozo MT-41

El pozo MT-41 fue planificado dentro del marco del programa de perforación de seis pozos adicionales con el objeto de recuperar la producción de vapor y por ende el potencial eléctrico de la planta geotermoelectrica Momotombo (ENEL, 1997). Este pozo fue perforado en 1996 y su profundidad total es 2 138 m. para 1997 se contaba únicamente con tres datos sin embargo se observó un enriquecimiento de cloruros y una ganancia de temperatura mostrado por los valores calculados del geotermómetro SiO_2 (Fournier, 1977).

Las estimaciones de temperaturas fueron con Na-K (Fournier, 1979) de 247°C , Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) de 279°C y SiO_2 (Fournier, 1977) de 270°C . Las estimaciones de temperaturas actualmente fueron con Na-K (Fournier, 1979) de 270°C , Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) de 289°C y SiO_2 (Fournier, 1977) de 263°C .

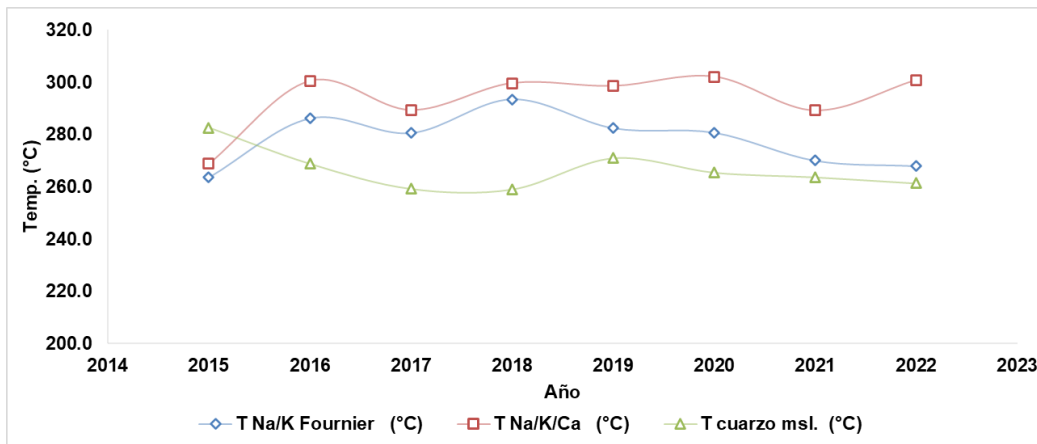


Figura 51: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-41

El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-41 ($H_m > H_{\text{NaKCa}} = H_{\text{SiO}_2}$), indica mezcla de líquido equilibrado con vapor formado por ebullición lejos del pozo.

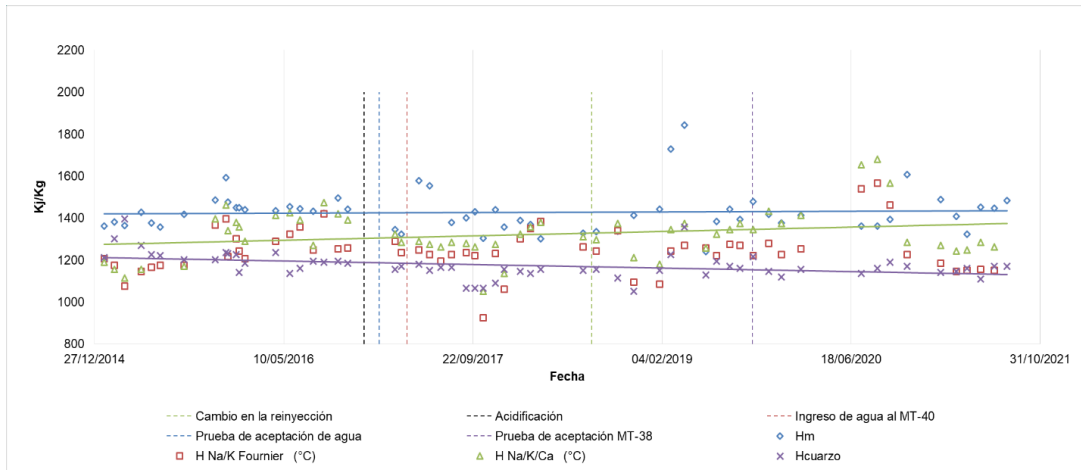


Figura 52: Gráfica de patrón de entalpía del Pozo MT-41.

Pozo MT-42

Este pozo fue perforado en 1997 y su profundidad total es 2 093 m. Los resultados de los geotermómetros catiónicos y de sílice son: con Na-K (Fournier, 1979) de 283°C, Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) de 276°C y SiO₂ (Fournier, 1977) de 262°C. Actualmente con estos geotermómetros las estimaciones son las siguiente Na-K (Fournier, 1979) de 244°C, Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) de 251.3°C y SiO₂ (Fournier, 1977) de 230.7°C.

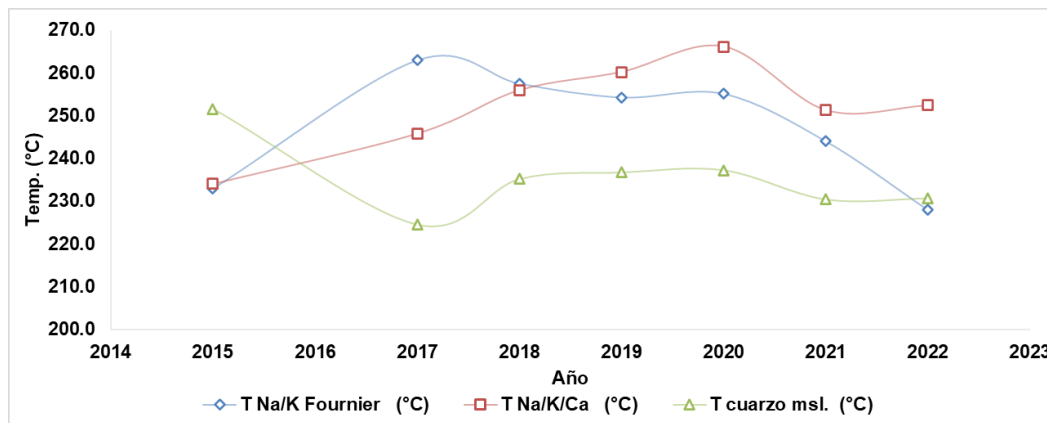


Figura 53: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo MT-42

Según el comportamiento de las entalpías para el pozo MT-42 ($H_m = H_{NaKCa} < H_{SiO_2}$), 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 H_{SiO_2} es baja por lo que la ebullición y la temperatura decrecen.

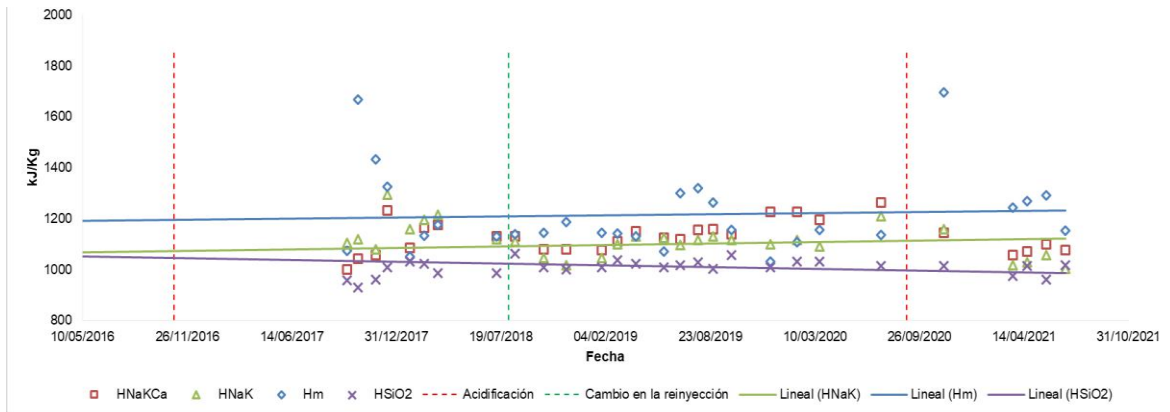


Figura 54: Gráfica de patrón de entalpía del pozo MT-42

Pozo MT-43

Al igual que el MT-41 Y MT-42, el pozo MT-43 fue planificado dentro del marco del programa de perforación de seis pozos adicionales con el objeto de recuperar la producción de vapor. Una muestra fue recolectada en el cual se trataba de vapor condensado o agua fría, por tal razón no fue posible calcular los geotermómetros catiónicos para conocer la temperatura a profundidad, cuando aplicaron el geotermómetro de sílice el valor reportado fue de 173°C. Este valor tiene correspondencia con los valores de temperatura medidos en el pozo 12/03/1997, a una profundidad de 700 m, esto podría implicar que el fluido descargado correspondería a la parte superficial del pozo. En enero de 2016 y marzo de 2020 se realizó registro dinámico de presión y temperatura, en donde se observan en los perfiles incremento en la temperatura 208.08°C y 209.95°C respectivamente.

Tabla 16: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición MT-43

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2016	208.08	297.8	350.8
2020	209.95	288.8	321.1

En la Tabla 16. Se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973), para el 2020 es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y a su vez que la temperatura de medición (T_m), este comportamiento de las temperaturas indica mezcla de agua más fría con líquido equilibrado. Los valores más bajos SiO₂ (Fournier, 1977) resulta de la dilución de reequilibrio y geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) no es afectado. Podría ser un pozo con múltiples entradas. El comportamiento del patrón de entalpías para el pozo MT-43

($H_{NaKCa} > H_{SiO_2} > H_m$), es parecido al mostrado por la comparación de temperatura es decir su interpretación es la misma.

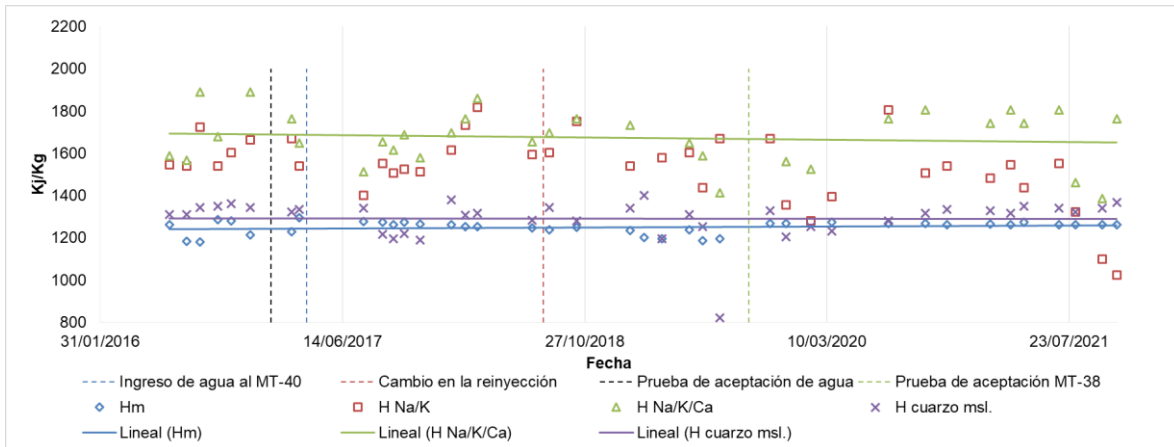


Figura 55: Gráfica de patrón de entalpia del pozo MT-43

Pozo OM-53

El 26 de febrero 2020, se realizó un registro dinámico de presión y temperatura en donde según los perfiles se observa una temperatura de 225.22°C a 1 720 m de profundidad, en abril 2017, a esa misma profundidad se midió una temperatura de 223.96°C, es decir la temperatura permanece estable.

Tabla 17: Comparación de temperaturas geotermométrica y de medición OM-53

Pozo	Tmed<TSiO2<TNa/K/Ca		
2017	223.96	278.5	309.5
2020	225.22	225.5	298.8
2022		243.7	290

En la Tabla 17. Se observa que el geotermómetro Na-K-Ca (Fournier and Trousdell, 1973) para el 2020 es mayor que el SiO₂ (Fournier, 1977) y la temperatura de medición (T_m) es igual a la de SiO₂ (Fournier, 1977), este comportamiento de las temperaturas indica mezcla con agua fría cerca del pozo con reequilibrio de sílice. Por la poca información de los pozos OM-53 y MT-36, no se podrá hacer más interpretación.

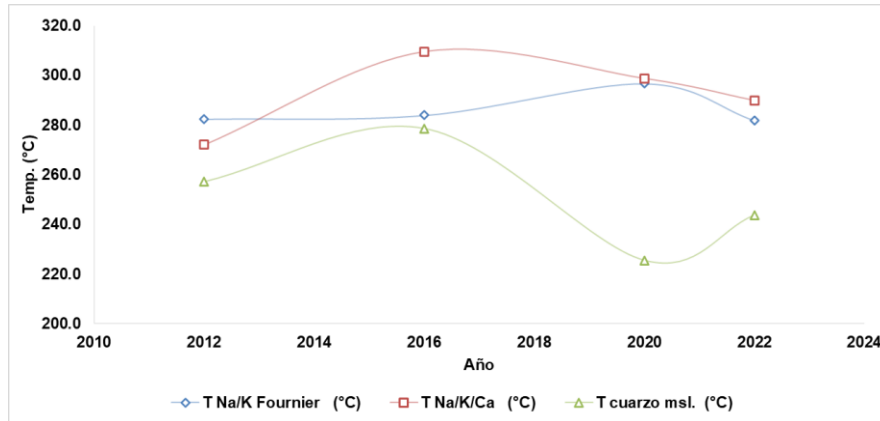


Figura 56: Gráfica de diferentes geotermómetros para el pozo OM-53

5.3 Identificación de los Procesos Físicos que ha Experimentado el Reservorio Geotérmico utilizando el Modelo de Mezcla

Ellis y Mahon (1977), propusieron un método para determinar los procesos físicos que ocurren en yacimientos geotérmicos en explotación. El procedimiento está sustentado en los cambios que sufren los cloruros, debido a procesos físico que ocurren en el yacimiento, los cuales se Gráficán contra la temperatura obtenida por el geotermómetro de sílice. En este estudio se utilizó la entalpía de producción (H_m) a excepción de los pozos MT-41 y MT-43 que los modelos se elaboraron con base a la entalpía de sílice. Este tipo de interpretación ayuda considerablemente a entender los patrones y tendencia de flujo durante la producción del campo. Dependiendo de la pendiente de la línea se puede interpretar varios procesos tales como, evaporación, ebullición dilución condensación, perdida y ganancia de vapor.

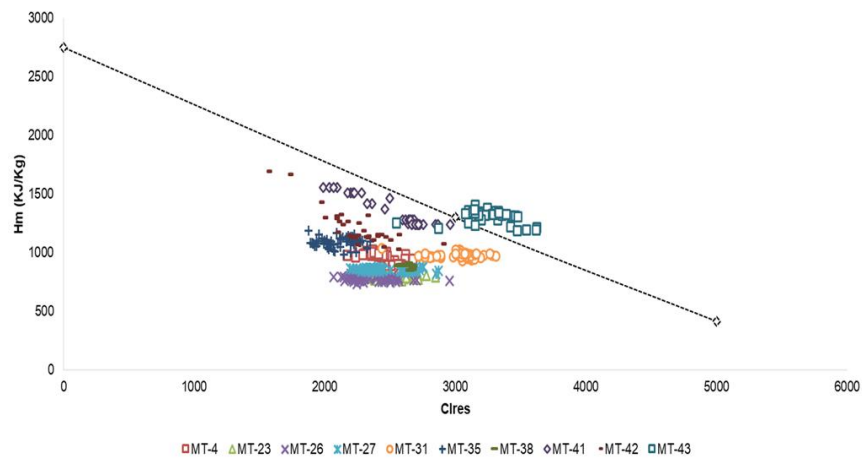


Figura 57: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del campo geotérmico Momotombo.

Pozo MT-4

Se muestra en la Figura 58. El modelo de mezcla cloruro de reservorio-entalpía para el Pozo MT-4, donde se observa que para el 2015 y 2016 una leve disminución en la concentración de cloruro de reservorio manteniendo por tanto su energía, cuando los cloruros disminuyen indican entrada de agua con menor temperatura (Arnórsson S. , 1996) en este caso la concentración de los cloruros pero en su transcurso esta agua de menor temperatura adquiere energía de la roca y no produce cambio en la entalpía de producción del pozo MT-4. Cuando los cloruros aumentan posiblemente sea, por una recarga de un fluido caliente profundo o por efecto de la reinyección de salmuera (Arnórsson S. , 1996). Para 2017, 2018, 2019 existe un aumento en la concentración de cloruro posiblemente a la influencia de agua de reinyección que se recupera térmicamente antes de llegar al pozo productor, mientras que para 2020 y 2021 existe un aumento en los cloruros y una disminución de la entalpía posiblemente producto de interferencia entre los pozos por el ingreso al sistema del Pozo MT-38 ya que estos se encuentran 60 m de distancia.

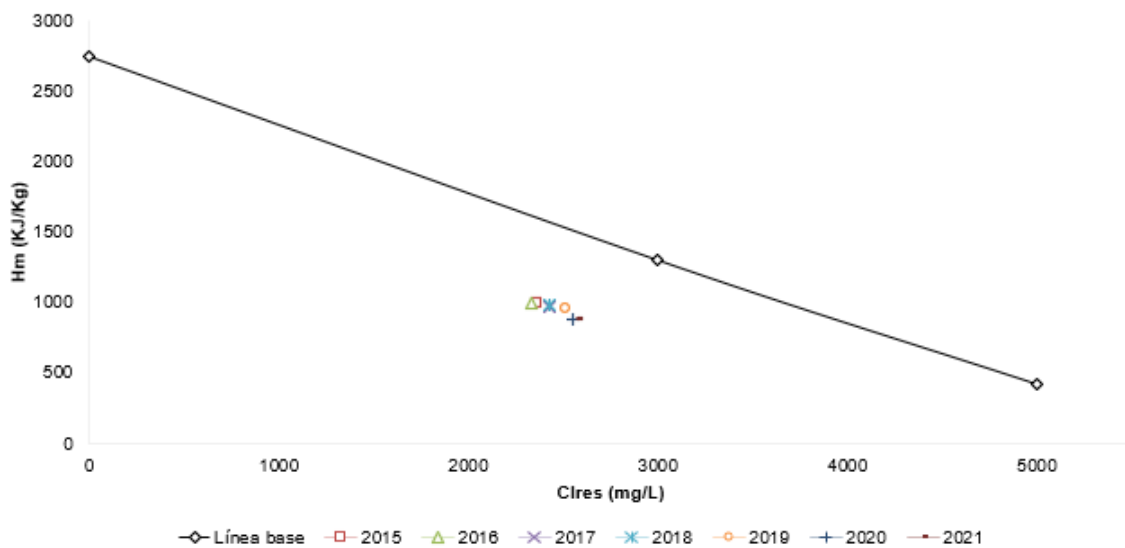


Figura 58: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-4.

Se puede observar Figura 59. El comportamiento del cloruro tanto de la separación como los cloruros de reservorio. Mostrando una disminución 2015-2016. Para luego incrementar 200 ppm y ser menos disperso.

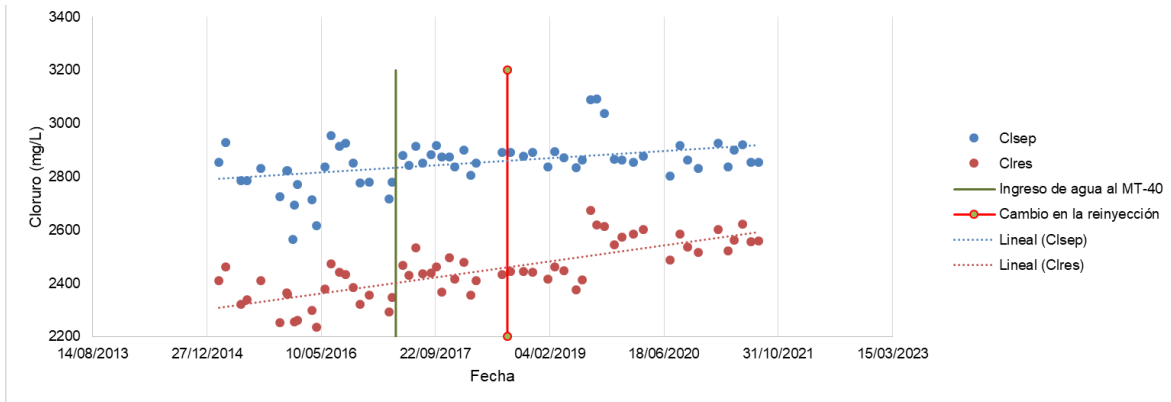


Figura 59: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-4.

Pozo MT-23

En el modelo de mezcla cloruro de reservorio-entalpía del pozo MT-23 se observa una disminución en la concentración de cloruro de reservorio lo que ocasiona que mantenga su energía en los años 2015 y 2016. Pero para 2017 y 2018 existe un aumento en la concentración de cloruro posiblemente a la influencia de agua de reinyección, pero esta se recupera térmicamente Figura 60.

Para 2019, 2020, 2021 no se observan cambios en la concentración de cloruro ni de la entalpía esto es debido posiblemente a que el Pozo MT-23 dejó de producir vapor y solo se aprovechaba la fase líquida. En 2021 este pozo es cerrado.

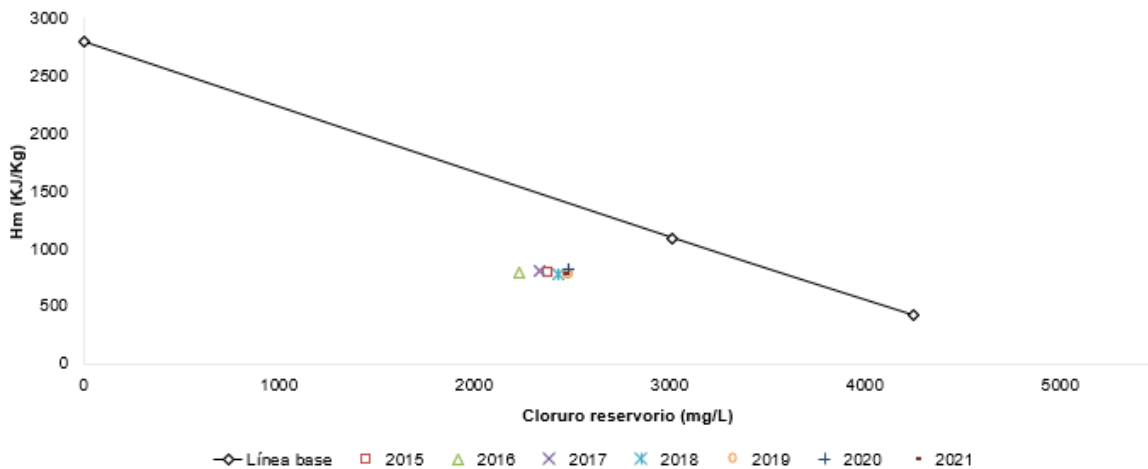


Figura 60: Gráfica de modelo de mezcla cloruro–entalpía del Pozo MT-23.

El comportamiento del cloruro tanto de la separación como los cloruros de reservorio para el pozo MT-23 exhibe una disminución en el periodo 2015 al 2016. Las

concentraciones de iones cloruros incrementan en los años 2017 y 2018. En el 2019, 2020 y 2021 no se observan cambios significativos en la concentración de cloruros Figura 57.

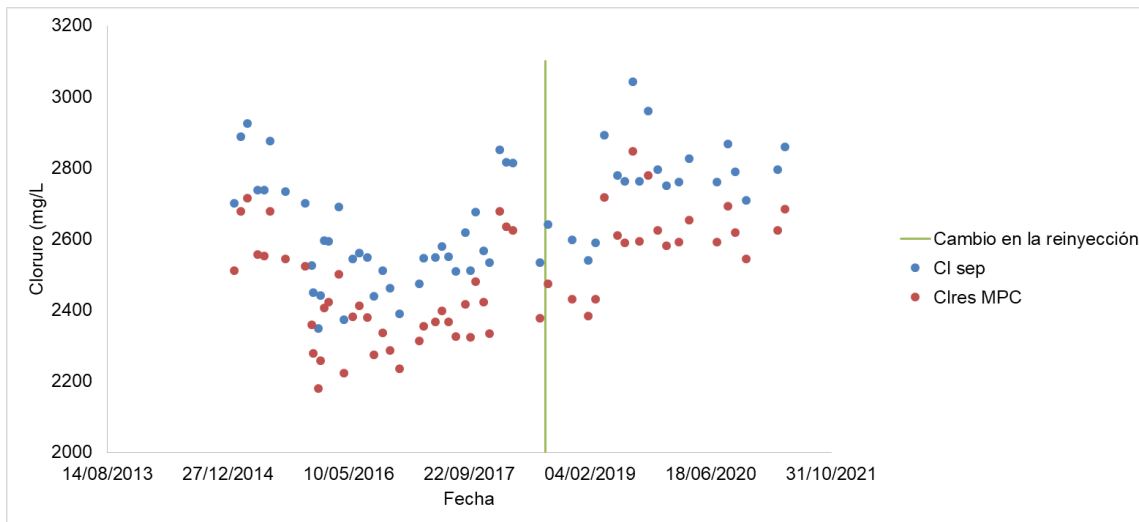


Figura 61: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-23.

Pozo MT-26

En la Figura 62. Se explicita que para el 2015 y 2016 ocurrió una disminución en la concentración de cloruro, pero sin cambios en la entalpía. No obstante, se produce aumento en la concentración de cloruro posiblemente por la influencia de agua de reinyección y recuperándose térmicamente para los años 2017 y 2018. En 2019 no se observan cambios en los cloruros ni en la entalpía y para 2020 vuelve a incrementar la concentración de cloruros y se observa un drástico aumento en la concentración de cloruro para el año 2021 debido a operaciones del campo (se envía salmuera del Pozo OM-53 al separador ciclónico del Pozo MT-26

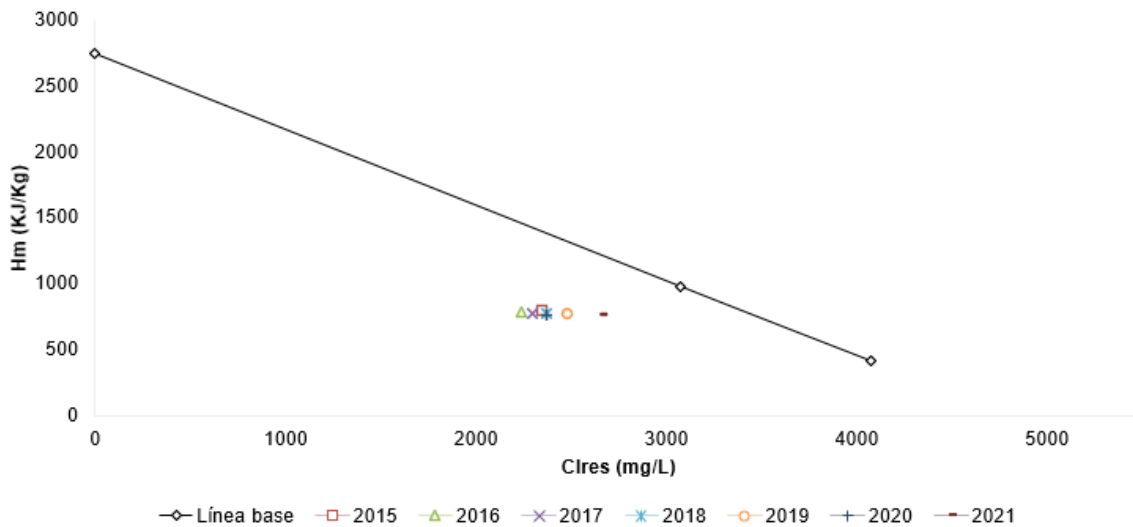


Figura 62: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-26.

Se puede observar en la Figura 63. El comportamiento del cloruro tanto de la separación como los cloruros de reservorio.

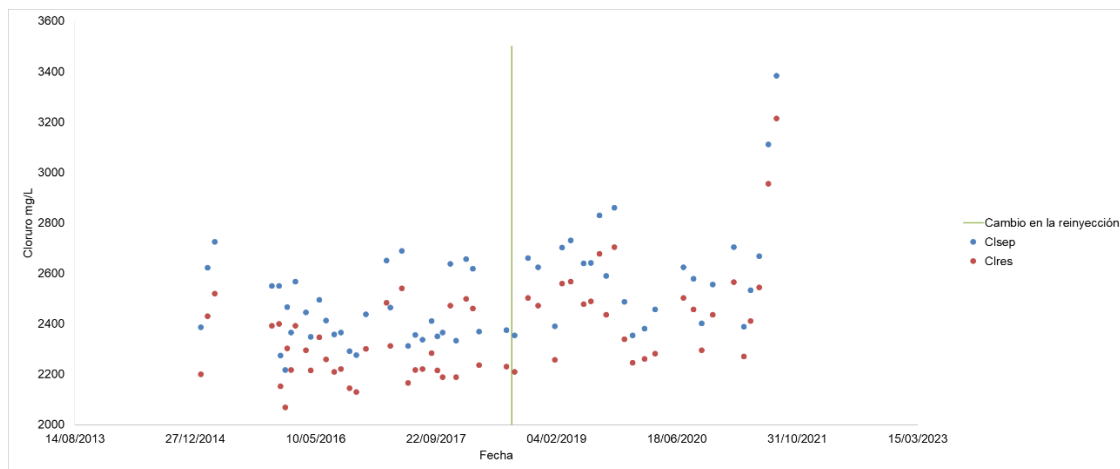


Figura 63: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-26.

Pozo MT-27

En el Pozo MT-27 se tiene un comportamiento irregular, disminución en la concentración de cloruro de reservorio manteniendo la entalpía para el periodo 2015-2016, sin cambios para el año 2017. En el 2018 y 2019 existe un aumento en la concentración de cloruro posiblemente por la influencia de agua de reinyección y esta se recupera térmicamente. Del 2019 al 2020 no se observan cambios en los

cloruros ni en la entalpía y en el 2021 vuelve a incrementar la concentración de los cloruros.

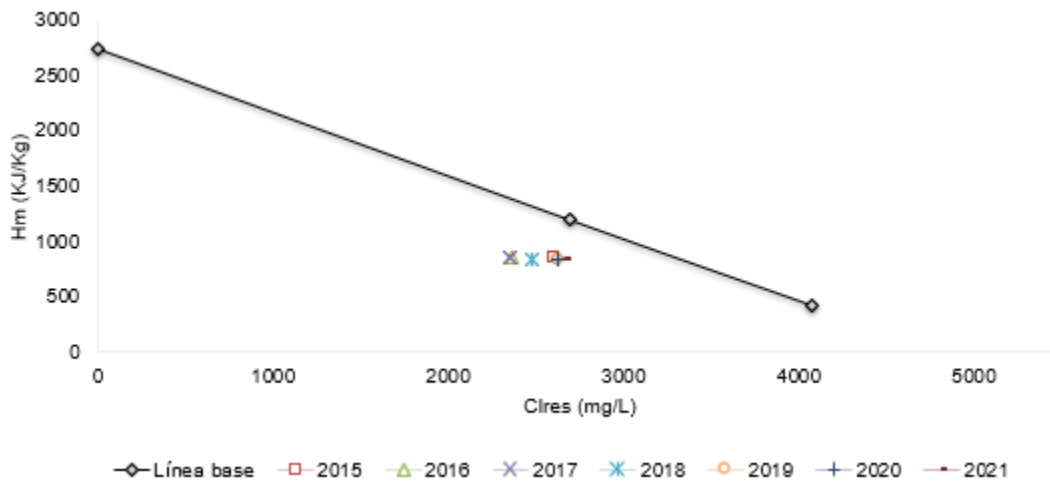


Figura 64: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-27.

Un informe de Quijano (1989) indico que el proceso que predominaba era una ebullición en los niveles más somero del reservorio (300 m – 500 m de profundidad) en repuesta a la explotación, pero la ebullición también ocurrió en los niveles más profundo del reservorio donde la permeabilidad es menor (MT-31 y MT-35).

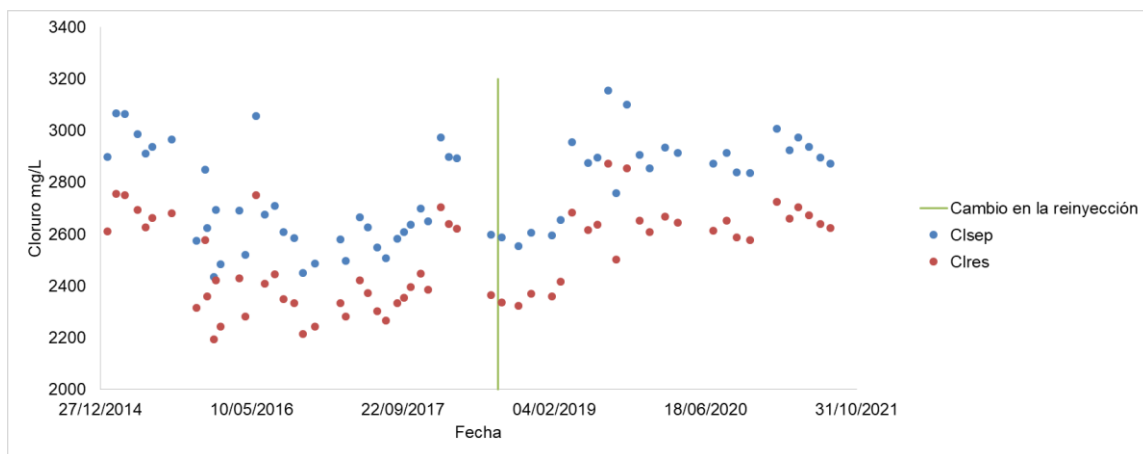


Figura 65: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-27.

Pozo MT-31

El comportamiento del cloruro en el MT-31 de 1990 a 1992 evidencia una drástica disminución de cloruro y aumento en la entalpía producto de la ebullición. Desde el

2006 la concentración de cloruro en este pozo alcanzo alrededor de 3 000 ppm y se ha mantenido esa concentración Figura 67.

El modelo de mezcla representado en la Figura 66. Presenta pequeñas variaciones en el comportamiento de los cloruros. Del 2020 al 2021 se observa un pequeño aumento en la concentración de esos iones.

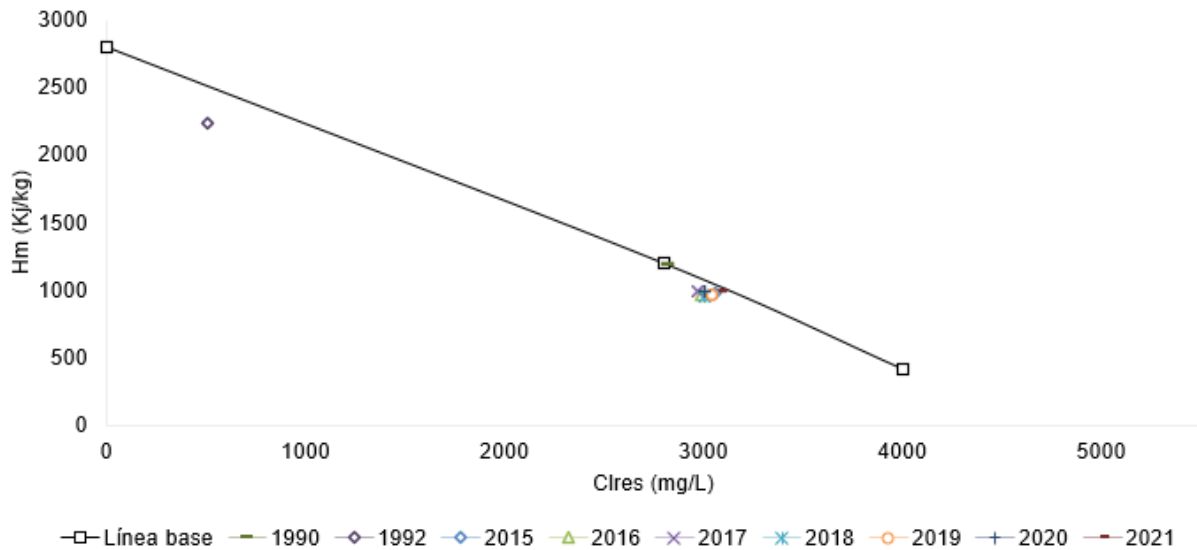


Figura 66: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-31.

Como se puede observar en la Figura 67. El cloruro en este pozo es casi constante y solo presenta pequeños cambios.

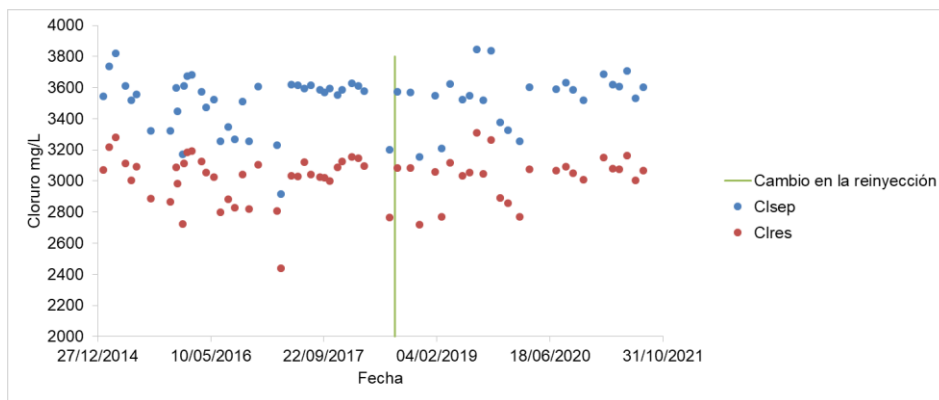


Figura 67: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-31.

Pozo MT-35

Este pozo exhibe una disminución en la concentración de cloruro en el reservorio con disminución en la entalpía para el año 2015-2016 y aumento en los cloruros y la entalpía en el 2017. En el 2018 se presenta una ganancia de calor, para luego presentar un proceso de evaporación en el 2019. En el 2020 y 2021 ocurre un aumento en los cloruros y disminución en la entalpía, producto de la ebullición Figura 68.

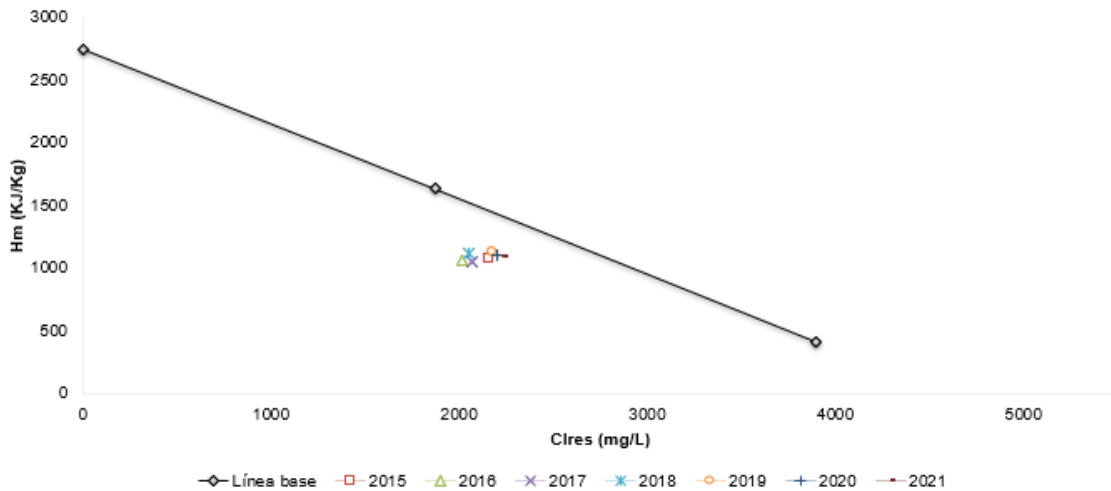


Figura 68: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-35.

Como se puede observar en la Figura 69. La concentración de iones cloruro disminuye, pero cuando se realizó el cambio en la reinyección el pozo respondió con un aumento en los cloruros de 3 000 ppm y para así mantenerse hasta el 2021.

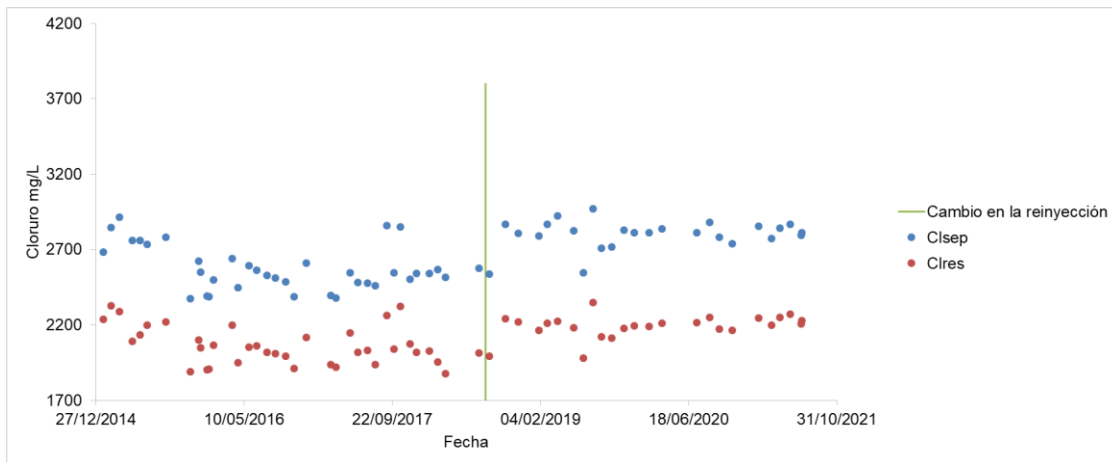


Figura 69: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-35.

Pozo MT-41

Para el MT-41 el modelo de mezcla fue construido con la entalpía del geotermómetro de sílice debido a que este pozo este entrelazado con el OM-53. Se muestra que en el pozo MT-41 para los años 2015, 2016 y 2017 un incremento en la concentración de iones cloruros y disminución de la entalpía lo que se traduce en un proceso de ebullición para esos años. Del 2017 al 2020 no se observan cambios en los cloruros ni en la entalpía. Para el 2021 se observa un aumento en los cloruros, pero manteniendo la misma entalpía.

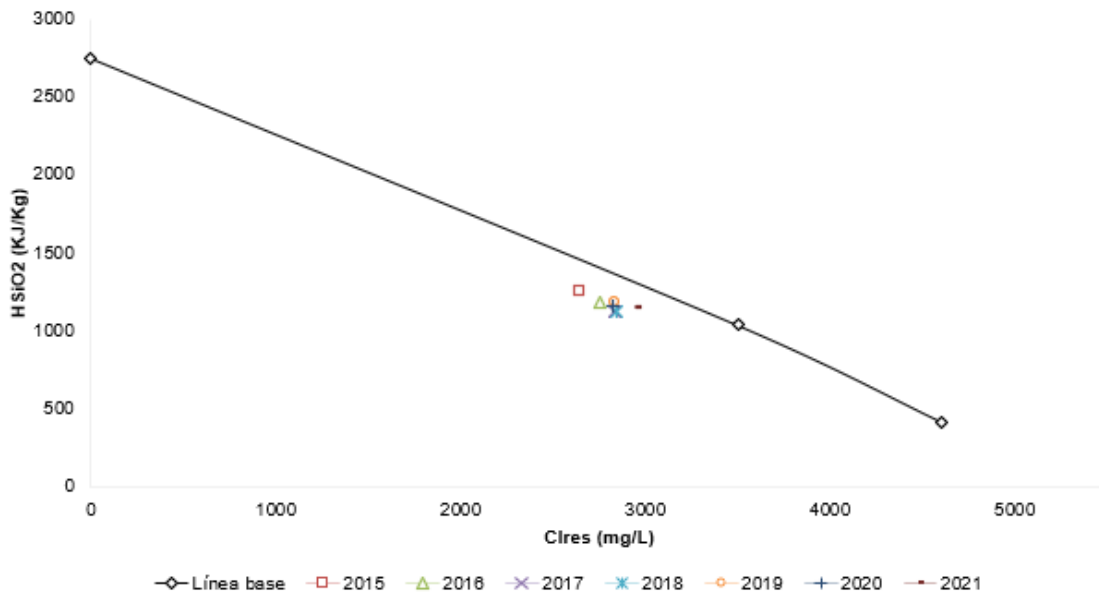


Figura 70: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del pozo MT-41.

Como se puede observar Figura 71. El cloruro para el 2015 al 2016 aumenta. Después de la acidificación, para el 2017 comienza a aumentar levemente, para el 2018 se mantiene casi constante en 3 600 mg/L en la línea bifásica. Del 2018 al 2021 se observa que los datos son menos dispersos.

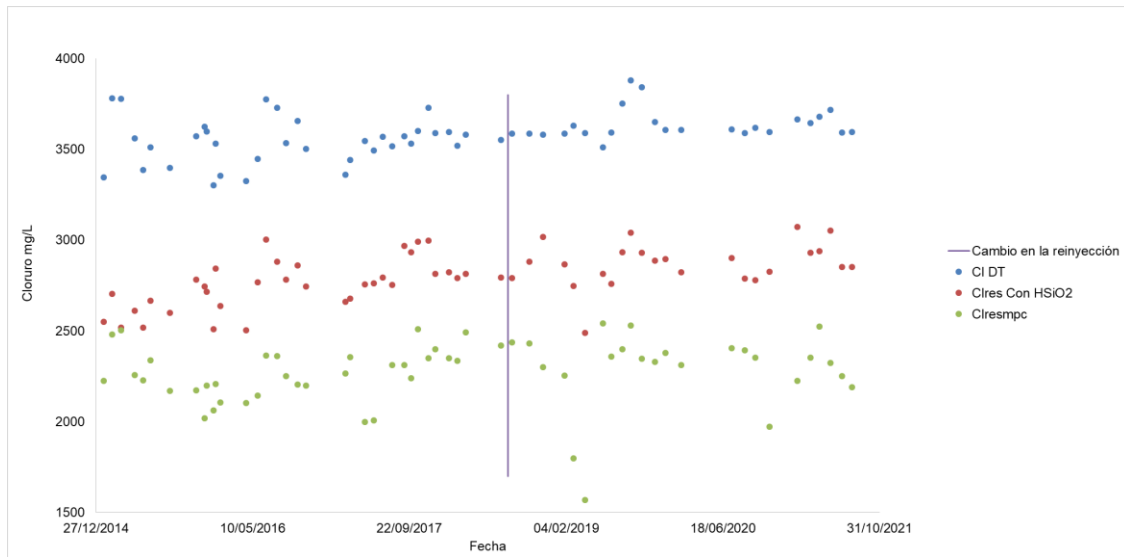


Figura 71: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-41.

Pozo MT-42

En el 2016 no se disponía de datos para este pozo porque se encontraba incrustado de calcita por lo que en noviembre de 2016 se le practicó un tratamiento químico. Por consiguiente, cuando se muestrea en el 2017 se observa una disminución en los cloruros y un aumento en la entalpía concluyendo que el proceso que se da es ganancia de vapor. Para el 2018 el cloruro aumenta y disminuye entalpía por lo que el proceso que se da es ebullición. Luego en 2019 y 2020 vuelve una ganancia de vapor. Para en 2021 disminuir el cloruro y entalpía por lo que el proceso sería una dilución en esa parte del reservorio.

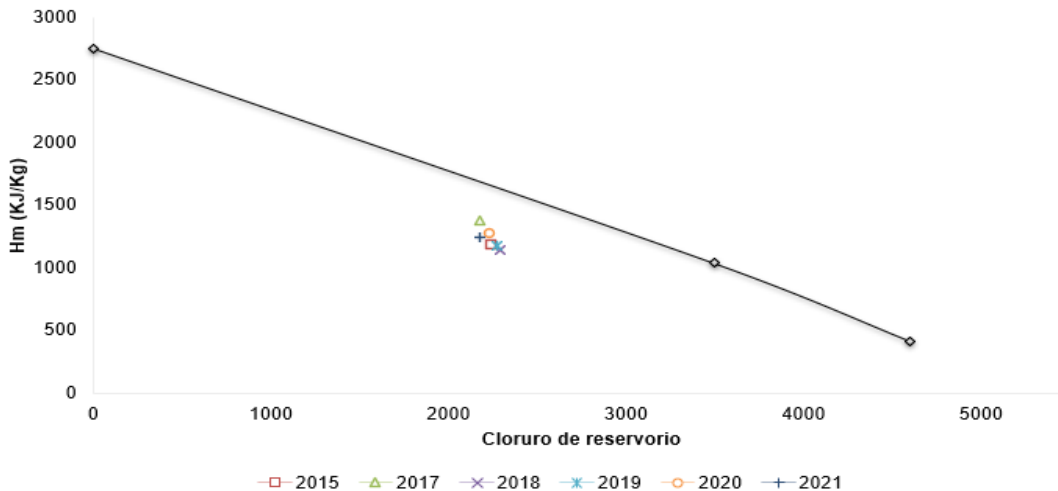


Figura 72: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-42.

Como se puede observar el cloruro de reservorio disminuye y después de la acidificación en el 2017 comienza a aumentar levemente. Del 2019 al 2021 se observa disminución en el cloruro para este pozo.

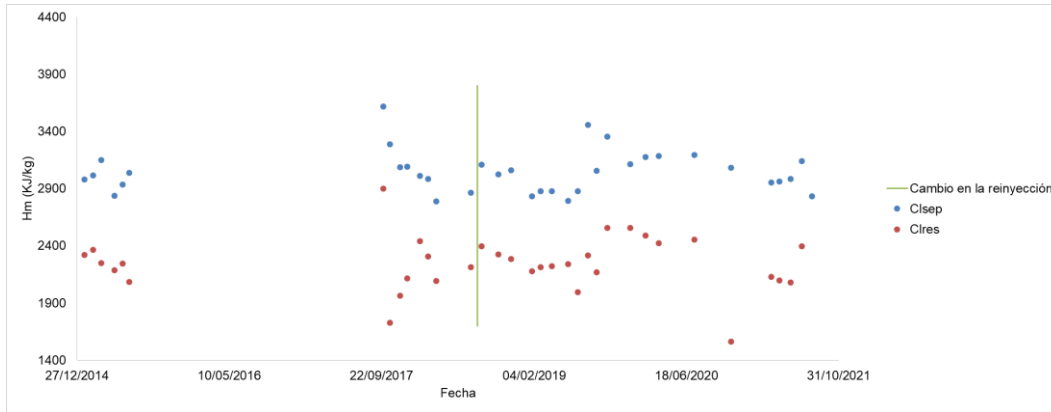


Figura 73: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del pozo MT-42.

Pozo MT-43

El modelo de mezcla fue construido con la entalpía del geotermómetro de sílice por lo que este pozo comparte separador con otro pozo.

En este pozo se observa que para el 2016 al 2017 un incremento en la concentración de cloruro y disminución en la entalpía en lo que se traduce en un proceso de ebullición, para el 2018 se presenta ganancia de vapor. En el 2019 se da un proceso de dilución por la disminución en los cloruros y entalpía. Para el 2021, el proceso es ganancia de calor por conducción.

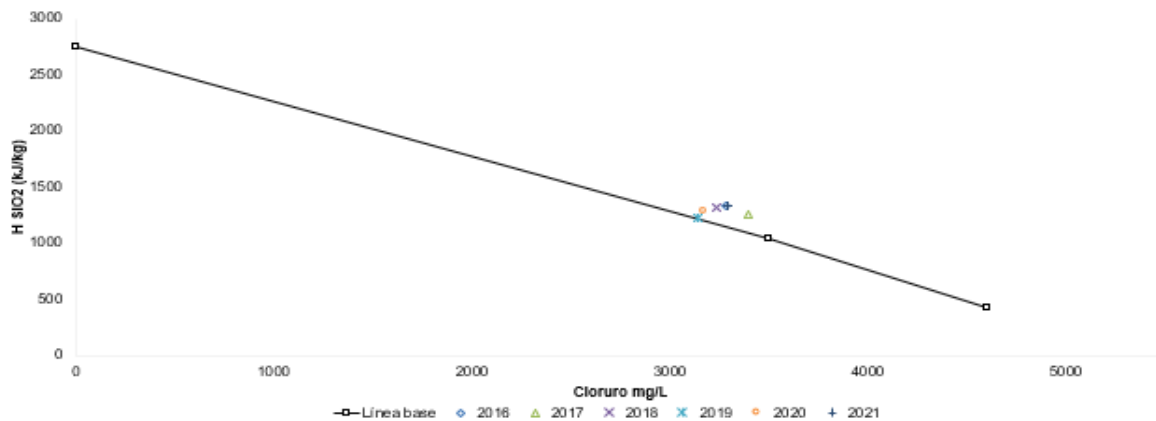


Figura 74: Gráfica de modelo de mezcla cloruro-entalpía del Pozo MT-43.

La Figura 75. Representa el comportamiento de los iones cloruros que se mantiene casi constante. Del 2018 al 2020 se observa que los datos son más dispersos. En el 2021, el cloruro aumenta.

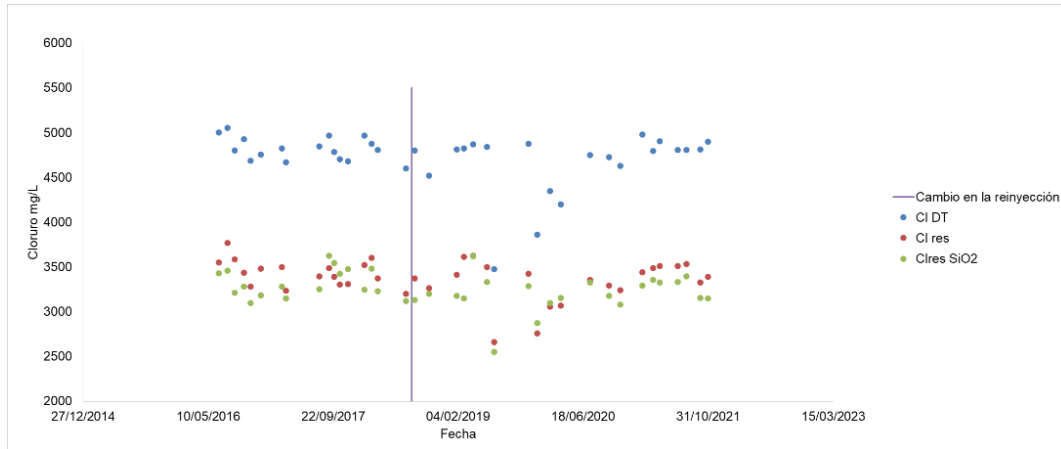


Figura 75: Gráfica de cloruro en reservorio y separación del Pozo MT-43.

5.4 Evaluación de Posibles Problemas por Deposición Mineral que puede Ocurrir a Condiciones de Reservorio y/o en Superficie durante la Explotación y que Influyan en la poca Productividad del Campo Geotérmico

La deposición mineral, corrosión, e incrustación, puede causar problemas en la explotación de campos geotérmicos. La incrustación más común se debe a óxidos de hierro, sílice amorfa, calcita y aragonita. La deposición mineral está directamente asociada con la temperatura, y depende del equilibrio mineral/soluto. La deposición mineral, como regla general ocurre cuando el fluido (agua), alcanza un estado sobresaturado con algún mineral en particular, y esto ocurre cuando hay una ebullición intensa, posteriormente un enfriamiento.

Pozo MT-4

Se determinaron los índices de saturación ($\log Q/K$) de los minerales anhidrita, calcita y cuarzo para el Pozo MT-4, a partir de los resultados químicos reportados en 2015 hasta 2021 en un rango de temperatura de 130°C a 220°C, utilizando el programa WATCH.

El caudal de salmuera que descarga este Pozo MT-4, Figura 76. Presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir en 2016, aparentemente a temperatura por debajo a 220°C, el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190C.

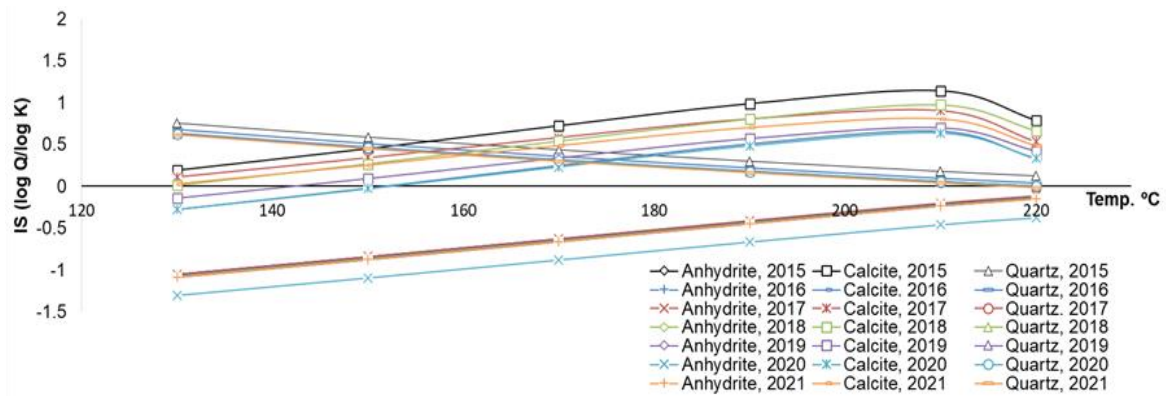


Figura 76: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del Pozo MT-4.

Pozo MT-23

El caudal de salmuera que descarga este pozo MT-23, Figura 77. Presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir en 2016 y 2020. Aparentemente a temperatura por debajo a 200°C, el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C. Además, se observa una tendencia a disminuir para el cuarzo hasta el 2018 donde el índice no varía para los próximos años.

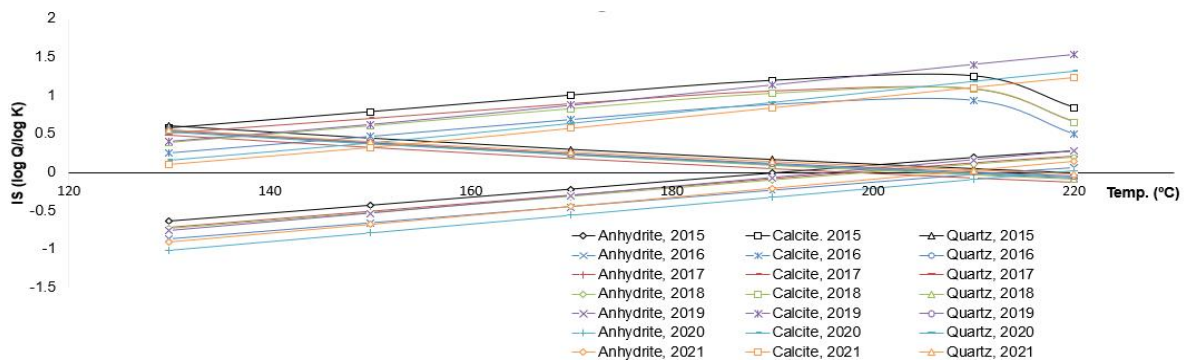


Figura 77: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-23.

Pozo MT-26

El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-26 presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir. A temperatura por debajo a 200 °C, el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C. Además, se observa una tendencia a disminuir para el cuarzo hasta el 2018 donde el índice no varía para los próximos años con excepción de 2021 donde aumenta, debido a la mezcla producido por compartir separador ciclónico con el OM-53.

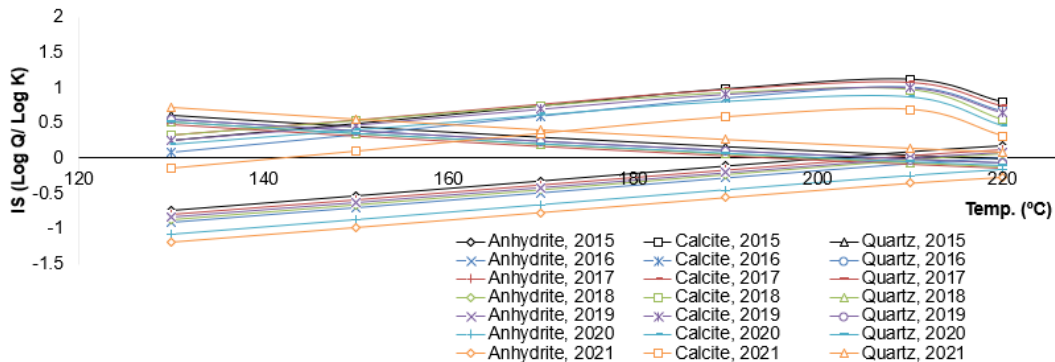


Figura 78: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del Pozo MT-26.

Pozo MT-27

El caudal de salmuera que descarga el Pozo MT-27, presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir, en el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 220°C, además se observa una tendencia a disminuir para el cuarzo hasta el 2018 donde el índice no varía para los próximos años, Figura 79.

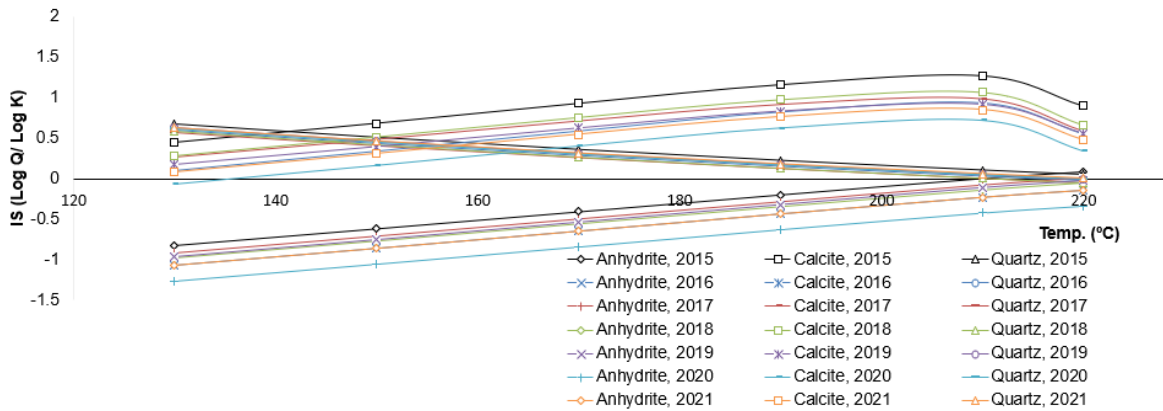


Figura 79: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) Pozo del MT-27.

Pozo MT-31

Para el MT-31 se determinaron los índices de saturación (log Q/K) de los minerales anhidrita, calcita y cuarzo, a partir de los resultados químicos reportados en 2015 hasta 2021 en un rango de temperatura de 130°C a 240°C Figura 77.

El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-31 presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir en 2016 y 2020, aparentemente a temperatura por debajo a 240°C, el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C.

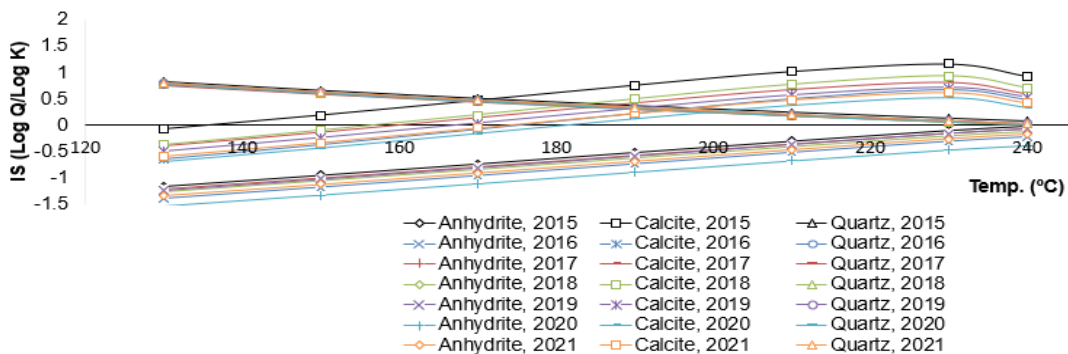


Figura 80: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del Pozo MT-31.

Pozo MT-35

El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-35 presenta un estado sobresaturado de calcita con tendencia a disminuir en 2016 y 2020, aparentemente

a temperatura por debajo a 220°C, el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C.

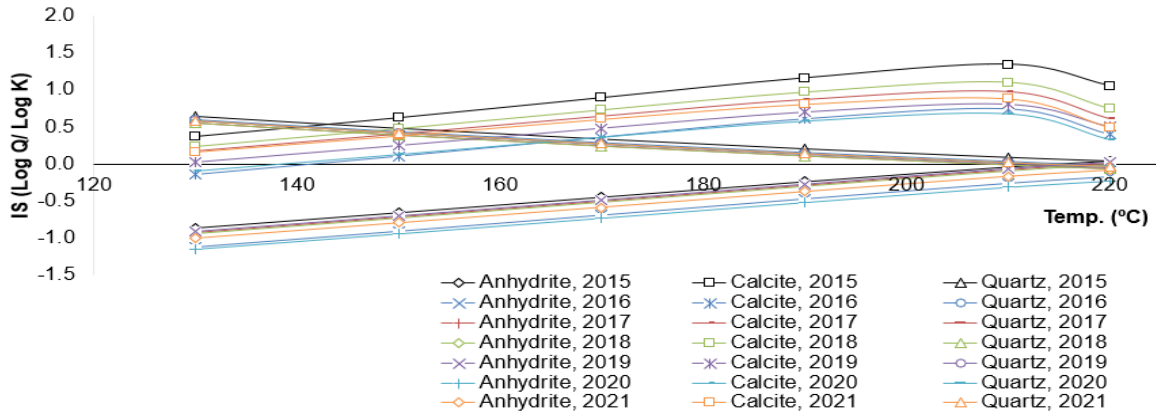


Figura 81: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) Pozo MT-35

Pozo MT-38

El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-38, Figura 82. Presenta un estado de sobresaturado de calcita con tendencia a incrementar en 2020 y 2021, aparentemente a temperatura por debajo a 220°C, el estado de la anhidrita es insaturado, pero con tendencia a incrementar. El cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C.

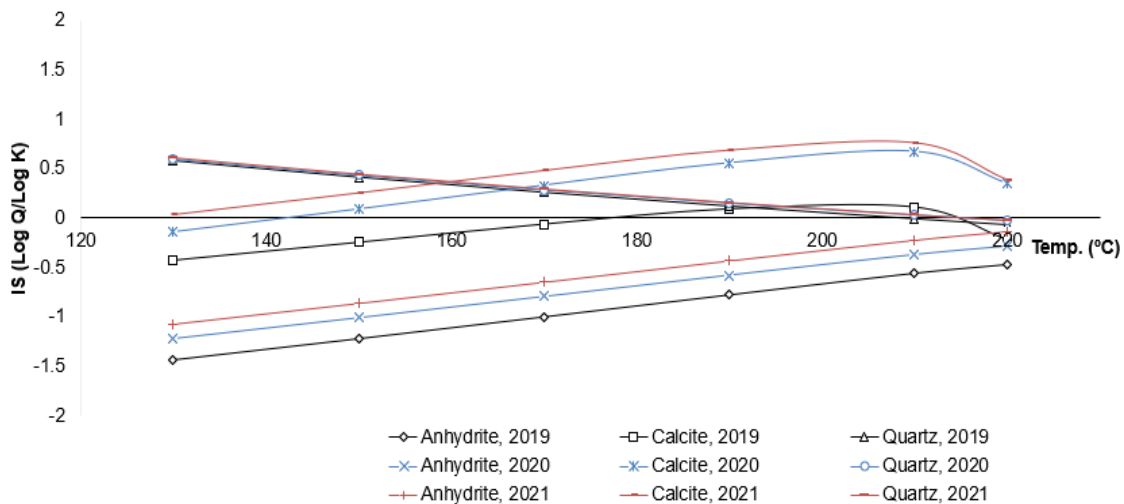


Figura 82: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) Pozo del MT-38

Pozo MT-41

Se determinaron los índices de saturación ($\log Q/K$) de los minerales anhidrita, calcita y cuarzo para el pozo MT-41, a partir de los resultados químicos reportados en 2015 hasta 2021 en un rango de temperatura de 120 °C a 270 °C.

El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-41, Figura 83. Presenta un estado de sobresaturado de calcita en 2015 para el 2016 la tendencia es disminuir y presentar un estado insaturado por debajo de los 210°C. El estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 250°C.

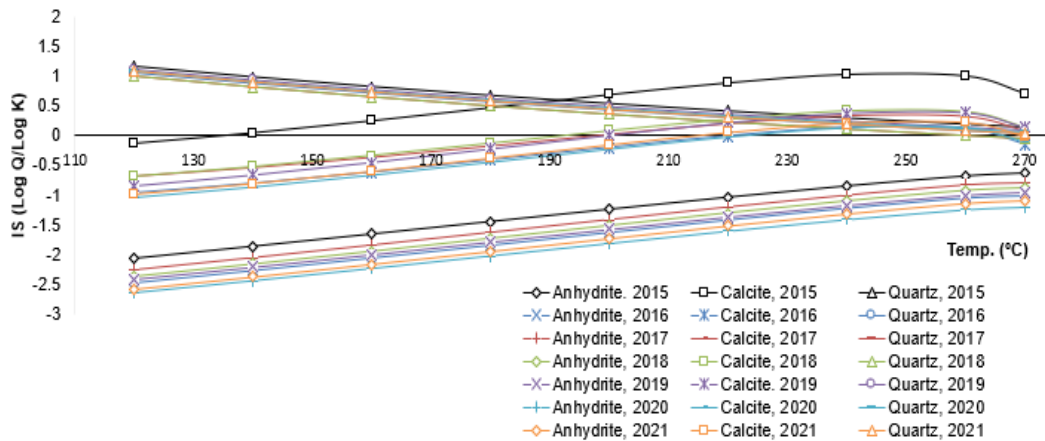


Figura 83: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-41

Pozo MT-42

El rango de temperatura para el pozo MT-42 es de 120°C a 250°C. El caudal de salmuera que descarga el pozo MT-42, presenta un estado sobresaturado de calcita de por encima de los 200°C y su comportamiento es a disminuir en 2015 al 2020, para el 2021 incrementa, aparentemente a temperatura por debajo a 220°C, el estado de la anhidrita es insaturado y el cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 190°C.

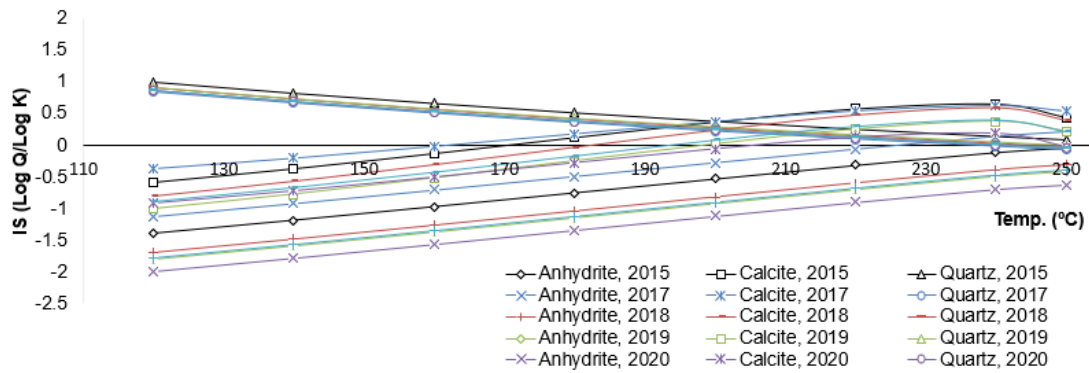


Figura 84: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-42

Pozo MT-43

El rango de temperatura para el pozo MT-43 es de 120°C a 310°C. El caudal de salmuera que descarga el pozo presenta un estado de insaturación de calcita por debajo de los 300°C, a temperatura por debajo de los 310°C el estado de la anhidrita es insaturado, a diferencia del cuarzo el estado es sobresaturado en la fase líquida a temperatura por debajo de los 240°C.

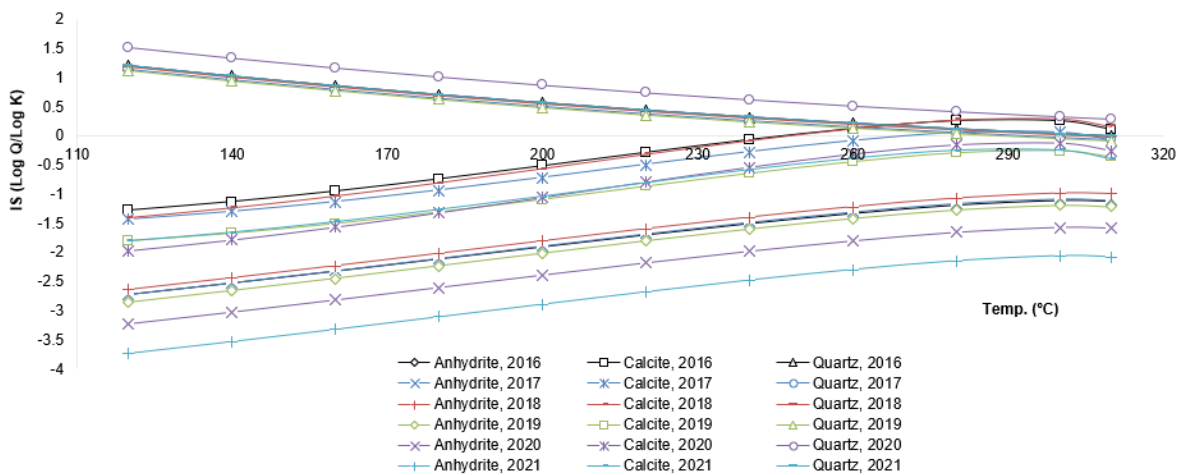


Figura 85: Gráfica de índice de saturación (anhidrita, calcita y cuarzo) del pozo MT-43

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo con las características químicas de los fluidos geotérmicos, las aguas del campo Momotombo son sódicas cloruradas, ligeramente alcalinas, lo que es típico de aguas profundas de reservorios geotérmicos en zonas volcánicas.

Con el diagrama propuesto por Ginggenbach (1988) para el año 2020 los pozos productores que se ubican en aguas parcialmente equilibradas son: MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-31, MT-35, MT-38, MT-41, MT-42 y MT-43, posiblemente esto se deba al cambio en la reinyección en lo cual ocasionaría desequilibrio en el sistema, sin embargo, en el año 2021 tienden hacia la línea de equilibrio total, pero en la mayoría de los pozos con disminución en la temperatura estimada.

Del 2015 al 2017 se observó en los pozos MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-31, MT-35, MT-41 y MT-42, disminución de la temperatura estimada con el geotermómetro SiO_2 (Fournier, 1977), posiblemente se deba a la entrada de agua de menor temperatura y más diluida por el este del campo ya que los iones cloruros también presentaron disminución. Con el comportamiento en la entalpía de los geotermómetros catiónico, de sílice y entalpía medida, se concluye que los pozos están sufriendo entrada de agua más fría a excepción de los pozos MT-35 y MT-42 que el proceso que presentaron fue ebullición.

Con el modelo de mezcla se concluye que se dio un proceso de dilución en los pozos MT-23, MT-26, MT-27, MT-31 y MT-35 en el año 2015 al 2016. Existió aumento en la concentración del ion cloruro posiblemente a la influencia de agua de reinyección en los pozos MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-35 y MT-41 para los años 2017 al 2019.

Los pozos productores MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-31, MT-35, MT-38 se encuentran saturado de calcita por encima $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los pozos MT-41 y MT-43 se encuentra insaturado en calcita en el rango de temperatura establecida. El pozo MT-42 se encuentra saturado en calcita a temperaturas superiores a $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, solo para el año 2020 se encuentra insaturado a la temperatura establecida ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los pozos productores MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-35 y MT-38, se encuentran saturado de cuarzo por debajo $170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los pozos productores MT-31, MT-41, MT-42 y MT-43 se encuentran saturado de cuarzo por debajo $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todos los pozos productores (MT-4, MT-23, MT-26, MT-27, MT-31, MT-35, MT-38, MT-41, MT-42 y MT-43) se encuentran insaturado en anhidrita.

VII. RECOMENDACIONES

- Mantener el monitoreo continuo de los pozos en producción, con el objetivo de conocer la evolución del campo geotérmico Momotombo.
- Añadir al monitoreo del campo los pozos MT-36 y OM-53 para recompilar información para la interpretación geoquímica.
- Actualizar los datos isotópicos para realizar modelo de mezcla (oxígeno 18 vs cloruros) para cada pozo.
- Realizar un monitoreo de las manifestaciones superficiales de las zonas aledañas de la central geotérmica con el fin de evaluar un estudio completo actualizado del comportamiento de escape de vapor y variaciones químicas.
- Se recomienda validar la técnica de muestreo aplicada por el laboratorio de geoquímica para disminuir el error en esta etapa muy importante del proceso del monitoreo geoquímico.

VIII. LISTA DE REFERENCIAS

- Acosta, M. P. (30 de Octubre de 2015). *Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermales*. LaGeo.
- Altamirano, G. E. (2015). *Evaluación de Inhibidores para control de incrustaciones de sílice en el separador ciclónico N°3 de la planta San Jacinto Tizate*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Amado, I. R. (2016). *Lineamientos Técnicos básicos para el control y vigilancia de la exploración de un yacimiento geotérmico*. San Salvador: La Geo.
- Arnórsson. (2000). *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. sampling methods, data handling, interpretation international atomic energy agency*. viena.
- Arnórsson, S. (1996). Interpretation of geochemical and isotopic data from well discharges in the Momotombo geothermal field, Nicaragua, with recommendations on monitoring studies STUDIES.
- cagnacci, P. (s.f.). *Paolo cagnacci*. Obtenido de http://paolocagnacci.it/?page_id=835
- Comisión Nacional de Energía. (2001). *Evaluación del área de Momotombo*.
- Cruz, I. A. (2012). *Chemical Evolution of the Momotombo reservoir and silica and calcite scaling potential of the fluid*. Reykjavik, Iceland: GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME.
- Echeverría, E., & Gámez, G. (2018). *Evaluación geoquímica del campo geotérmico San Jacinto Tizate*. San Salvador.
- ENEL. (1997). *Informe geoquímico semestral*. Managua.
- ENEL. (2017). *Empresa Nicaragüense de Electricidad*. Obtenido de http://www.enel.gob.ni/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=16&Itemid=2
- Flores, C. R. (1982). *Control químico de pozos productores en el campo geotérmico de los azufres michoacan*. Morelia, Mexico: Universidad michoacan de san nicolas de hidalgo.
- Fournier, R. O. (1989). *Water geothermometers applied to geothermal energy*. Iceland.
- Lenores S. Clesceri, A. E. (1989). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC 20005: American Public Health Association.
- León, J. L. (2007). Manual de Geotermia. En J. L. León, *ciencias de la tierra e ingeniería de reservorios* (pág. 89).

- Márquez, G. A. (2017). *Geoquímica preliminar del prospecto geotérmico volcán Mombacho*. El Salvador: Diplomado de especialización en geotermia.
- Martínez, E., & Sánchez, M. (1995). *Características químicas e isotópicas del campo Geotérmico Momotombo*. Cuernavaca.
- Martínez, M., & Romero, R. (2019). *Evolución geoquímica de la zona Nor-Oeste de la parte somera del reservorio en los pozos MT-23, MT-26 y MT-27 del campo geotérmico Momotombo*. Managua.
- Mendieta, J. R. (2009). *Reassessment of the Production Capacity of Two Geothermal Fields in Nicaragua*. Reykjavík, Iceland: GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME.
- Ministerio de Energía y Minas. (Junio de 2009). *STUDYLIB*. Obtenido de <http://studylib.es/doc/5007005/campo-geot%C3%A9rmico-momotombo>
- Miranda, K. (1992). *Geochemistry model preliminary of the Momotombo geothermal field. Nicaragua*.
- Perez, M. (1992). *Estudio de inclusiones fluidas en pozo MT-35 y MT-36 del campo geotérmico Momotombo*. Managua.
- Porras, E. A. (2005). *Numerical Modeling of the Momotombo Geothermal System, Nicaragua*. Fukuoka, Japan: Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering.
- Porras, E. A. (2006). *The Momotombo reservoir performance upon 23 years of exploitation and its future potential*. Managua, Nicaragua: ORMAT Momotombo Power Company.
- Porras, E. A., & Bjornsson, G. (2010). *The Momotombo Reservoir Performance upon 27 Years of Exploitation*.
- Pravia, I. A. (2013). *Volumetric, Lumped and 2-D numerical models of the Momotombo reservoir*. Reykjavik, Iceland: GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME.
- Quijano, J. L. (1989). *Primer informe parcial sobre la composición química e isotópica de los fluidos producidos en el campo geotérmico del Momotombo*.
- Renderos, R. (2002). *Chemical characterization of the thermal fluid discharge from well production tests in the Berlin geothermal field*. El Salvador, C.A: UNU-GTP.
- Rodríguez Santoya, R. J. (2008). Geothermometers using computation and Geochemiometrical tools: application to the Temperature prediction of geothermal systems. *Revista mexicana ciencia geología* 25, 3.

- Tello, E. (2005). *Estado de equilibrio soluto - mineral y saturación de minerales de alteración en fluidos geotérmicos de alta temperatura de México*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tonani, F., & Teilmann, M. (1980). *Geochemistry at Momotombo, Nicaragua: one aspect in a geothermal field case history*. San Francisco, California: International Engineering Company.

ANEXO A

Manual de uso de las hojas de cálculo geoquímicas para agua y gas geotérmico. Powell y Cumming (2010)

A. 1. Introducción

Este manual es una guía para el uso de las dos hojas de cálculo en Excel propuestas por Powell y Cumming con el fin de proporcionar una herramienta de interpretación en la exploración y desarrollo geotérmico, que incluye varias metodologías geoquímicas para aguas y gases geotérmico, para muestras obtenidas de manantiales calientes, fumarolas y pozos geotérmicos. Los diagramas se generan a partir de las concentraciones medidas de las especies químicas, utilizando fórmulas basadas en reacciones de equilibrio y relaciones empíricas. Las hojas de cálculo son compatibles con todas las versiones de Excel desde 1997 hasta la 2013. Estas hojas de cálculo se ofrecen como freeware y están bajo la Licencia Pública General de la GNU.

La mayoría de las metodologías incluidas en estas hojas de cálculo se desarrollaron en la década de los 80 y principios de los 90 por el fallecido Werner Giggenbach así como Arnórsson (2000) y Fournier (1989). Las hojas de cálculo omiten algunas metodologías que pueden ser fáciles de personalizar para satisfacer relaciones particulares, utilizando herramientas gráficas básicas de Excel, como, por ejemplo, gráficos donde una cantidad se Gráfica frente a otra sobre ejes lineales. Además, mediante la eliminación de la protección de la hoja de cálculo, los usuarios pueden adaptar los gráficos para crear gráficas similares utilizando otras especies químicas.

Estas hojas de cálculo pueden ser utilizados para analizar datos químicos de agua y gases de pozos y manifestaciones superficiales. Sin embargo, no es posible el cálculo de las correcciones químicas de líquidos para la pérdida de la fracción de vapor durante las descargas, Por lo tanto, estos ajustes deben calcularse por separado. Los análisis de las herramientas en las hojas de cálculo se dirigen a entender las propiedades del equilibrio natural de los reservorios geotérmicos que son relevantes tanto a la exploración y al desarrollo geotérmico. Sin embargo, no se incluyen gráficos que relacionen los cambios con respecto al tiempo en los reservorios geotérmicos en producción.

La hoja de cálculo Liquid_Analysis_v1_Powell-2010-StanfordGW.xls toma datos geoquímicos tabulados para agua que deben ser colocados en el input con unidades

de mg/L, para el caso de los isotopos estables O18 y D para garantizar la precisión y la exactitud de los parámetros calculados. La hoja de cálculo Gas_Analysis_v1_Powell-2010-StanfordGW.xls toma muestras de análisis de gases, hace correcciones de aire si es necesario.

Liquid chemistry plotting spreadsheet version 3													CFB Ternary		CLB Ternary		LRC Ternary		CSH Ternary		NKM Ternary		XYZ Ternary			
Powell Geoscience Ltd. 3 September 2012													factor		factor		factor		factor		factor		column	element		
Copy water chemistry data into data field below. Use negative numbers to indicate detection limit. Data will be plotted at detection. Cut & paste or move data but do not delete lines or columns.													Ternary plot multiplier factors:		Cl	1	Cl	1	Li	1	Cl	1	Na	1	K	
													F	25	Li	100	Rb	4	SO4	1	K	10	Y			
													B	25	B	25	Cs	10	HCO3	1	Mg	1000	Z			
													mg/kg													
Sample Name	Lab Number	Date	Sample Label	UTM east	UTM north	Elevation	Temp C	Steam Fraction	pH	Li	Na	K	Ca	Mg	SiO2	B	Cl	F	SO4	HCO3	CO3	NH4	As	Rb	Cs	

Es probable que uno de los errores más comunes al utilizar estas hojas de cálculo esté relacionado a las unidades con las que se quieren ingresar los datos, es necesario convertir los datos que no estén en las unidades especificadas en cada hoja de cálculo.

Para llenar la hoja del input de las hojas de cálculo se realiza el siguiente procedimiento:

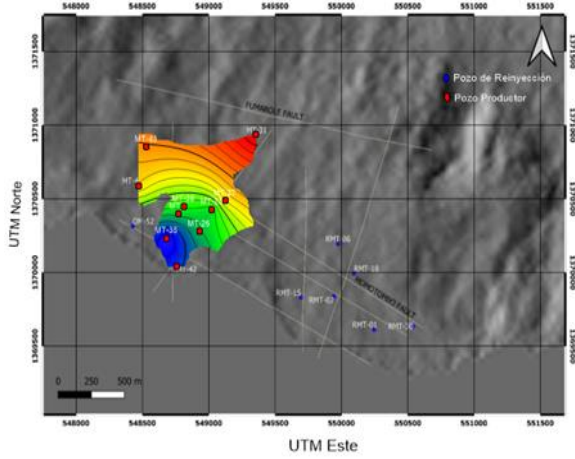
La hoja de entrada de datos permite 30 datos de agua y/o isotopos estables (Dd y $\delta^{18}O$). Los datos facilitados pueden ser eliminados o sobrescritos sin perturbar el cálculo en la hoja de cálculo. Hacer celdas de interpretación, análisis químicos de datos e introducir o copiado en filas de datos y la hoja de cálculo calcula sus geotermómetros y parámetros de la trama en columnas ocultas a la derecha.

En las columnas ocultas AG a BJ, se leen las filas de entrada de dirección de cada celda fija para evitar movimientos accidentales de datos en el campo de entrada que puede mezclar direcciones de celdas; un problema común con hojas de cálculo.

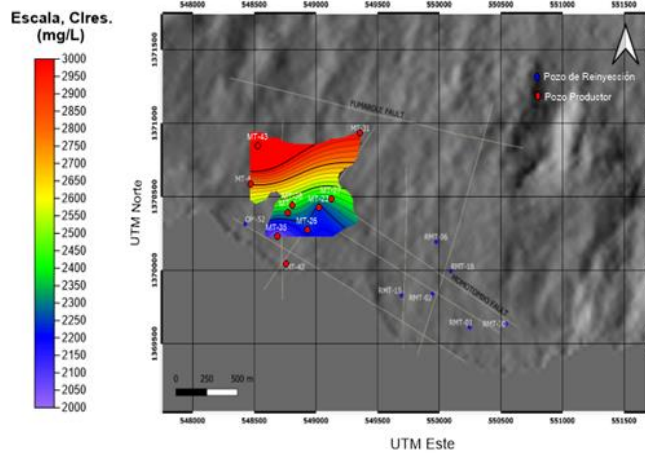
Los parámetros químicos introducidos deben estar en ppm y se debe ingresar a cada celda el respectivo valor de cada especie química. Automáticamente muestra los resultados la hoja de cálculo.

ANEXO B

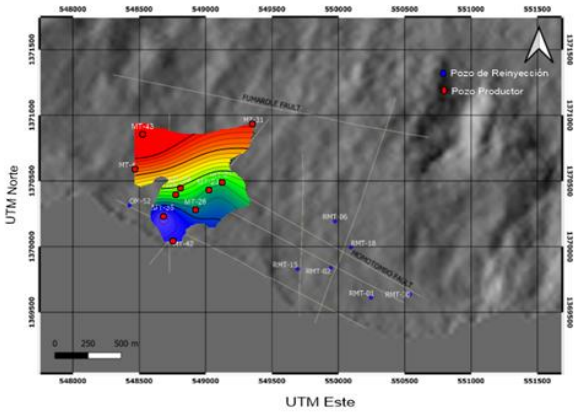
Isovalares de cloruro de reservorio 2015 al 2021



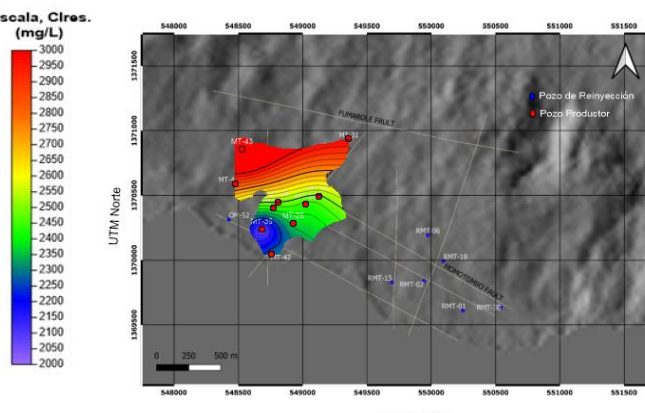
Cloruro de reservorio 2015



Cloruro de reservorio 2016



Cloruro de reservorio 2017



Cloruro de reservorio 2018

ANEXO C
Fotografías del muestreo de agua y gases en la OEC y MT-31
respectivamente del campo geotérmico Momotombo



ANEXO D

Cálculo del balance iónico en los resultados obtenidos para el pozo productor MT-31

En la siguiente tabla se muestran los resultados químicos obtenidos en mayo de 2021, para el pozo productor MT-31, por parte del Departamento de Laboratorio geoquímico (DLG) de la Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL).

Pozo	MT-31		
FECHA	26/5/2021	Cl ⁻ (mg/L)	3705.20
Punto de Toma	Línea de Agua Separada	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	78.89
Temp. De salida (°C)	80	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	21.23
P. Cab (barg)	5.5	B (mg/L)	37.07
P. Sep (barg)	5.1	NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.70
pH	8.11	SiO ₂ (mg/L)	473.16
Cond (mS/cm)	10.86	S.T.D (mg/L)	7198.00
Na ⁺ (mg/L)	2289.65	F ⁻ (mg/L)	1.89
K ⁺ (mg/L)	322.83	Fe ²⁺ (mg/L)	0.64
Ca ²⁺ (mg/L)	30.00	Li ⁺ (mg/L)	6.49
Mg ²⁺ (mg/L)	0.18	As ⁺ (mg/L)	4.37

Para convertir miligramos (mg) en miliequivalentes (mEq) se utiliza la siguiente fórmula:

$$mEq = \frac{mg}{\text{peso atómico}} * \text{valencia}$$

	Peso molecular (o atómico)	Valencia		Peso molecular (o atómico)	Valencia
Na ⁺ (mg)	22.9	1	Cl ⁻ (mg)	35.45	1
K ⁺ (mg)	39.1	1	SO ₄ ²⁻ (mg)	96.06	2
Ca ²⁺ (mg)	40.08	2	HCO ₃ ⁻ (mg)	61.02	1
Mg ²⁺ (mg)	24.3	2	F ⁻ (mg)	19	1
Li ⁺ (mg)	6.94	1			

$$mEq Na^+ = \frac{2289.65 \text{ mg/L}}{23} * 1 = 99.55 \text{ mEq/L}$$

$$mEq K^+ = \frac{322.83 \text{ mg/L}}{39.1} * 1 = 8.257 \text{ mEq/L}$$

$$mEq Ca^{2+} = \frac{30 \text{ mg/L}}{40.08} * 2 = 1.497 \text{ mEq/L}$$

$$mEq Mg^{2+} = \frac{0.18 \text{ mg/L}}{24.3} * 2 = 0.0148 \text{ mEq/L}$$

$$mEq Li^+ = \frac{6.49 \text{ mg/L}}{6.94} * 1 = 0.9351 \text{ mEq/L}$$

$$\begin{aligned} \Sigma Cationes &= mEq Na^+ + mEq K^+ + mEq Ca^{2+} + mEq Mg^{2+} + 0.9351 mEq Li^+ \\ \Sigma Cationes &= 99.55 \frac{mEq}{L} + 8.257 \frac{mEq}{L} + 1.497 \frac{mEq}{L} + 0.0148 \frac{mEq}{L} + 0.9351 \frac{mEq}{L} \end{aligned}$$

$$\boxed{\Sigma Cationes = 110.2539 \frac{mEq}{L}}$$

$$mEq Cl^- = \frac{3705.2 \text{ mg/L}}{35.45} * 1 = 104.52 \text{ mEq/L}$$

$$mEq SO_4^{2-} = \frac{78.89 \text{ mg/L}}{96.06} * 2 = 1.643 \text{ mEq/L}$$

$$mEq HCO_3^- = \frac{21.23 \text{ mg/L}}{61.02} * 1 = 0.3478 \text{ mEq/L}$$

$$mEq F^- = \frac{1.89 \text{ mg/L}}{19} * 1 = 0.09948 \text{ mEq/L}$$

$$\begin{aligned} \Sigma Aniones &= mEq Cl^- + mEq SO_4^{2-} + mEq HCO_3^- + mEq F^- \\ \Sigma Aniones &= 104.52 \frac{mEq}{L} + 1.643 \frac{mEq}{L} + 0.3478 \frac{mEq}{L} + 0.09948 \frac{mEq}{L} \end{aligned}$$

$$\boxed{\Sigma Aniones = 106.61 \frac{mEq}{L}}$$

Para calcular el balance iónico (B.I) se utiliza la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} B.I &= \frac{\Sigma Cationes - \Sigma Aniones}{\Sigma Cationes + \Sigma Aniones} * 100 \\ B.I &= \frac{110.2539 \frac{mEq}{L} - 106.61 \frac{mEq}{L}}{110.2539 \frac{mEq}{L} + 106.61 \frac{mEq}{L}} * 100 = \mathbf{1.68\%} \end{aligned}$$

El error está dentro del criterio de aceptación $\pm 5\%$.

ANEXO E

Diagrama de piper en los resultados obtenidos en mayo de 2021 para el pozo productor MT-31

La suma de los tres componentes debe ser 100% de la composición (de los elementos que se consideran) y además se utiliza un triangulo para los cationes y otro para aniones.

$$\Sigma \text{Cationes} = mEq Na^+ + mEq K^+ + mEq Ca^{2+} + mEq Mg^{2+}$$

$$\Sigma \text{Cationes} = 99.55 \frac{mEq}{L} + 8.257 \frac{mEq}{L} + 1.497 \frac{mEq}{L} + 0.0148 \frac{mEq}{L} = 109.31$$

$$\%(Na^+ + K^+) = \frac{mEq Na^+ + mEq K^+}{\Sigma \text{Cationes}} * 100 = \frac{99.55 + 8.257}{109.31} * 100 = 98.62 \%$$

$$\%(Ca^{2+}) = \frac{mEq Ca^{2+}}{\Sigma \text{Cationes}} * 100 = \frac{1.497}{109.31} * 100 = 1.37 \%$$

$$\%(Mg^{2+}) = \frac{mEq Mg^{2+}}{\Sigma \text{Cationes}} * 100 = \frac{0.0148}{109.31} * 100 = 0.0135 \%$$

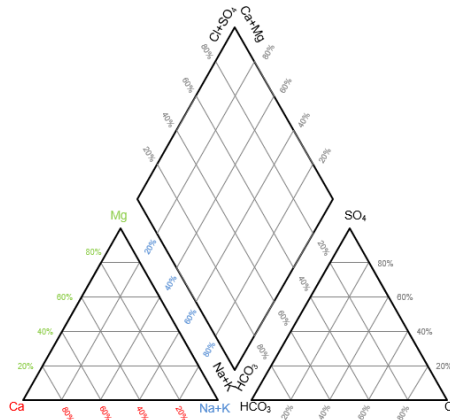
$$\Sigma \text{Aniones} = mEq Cl^- + mEq SO_4^{2-} + mEq HCO_3^-$$

$$\Sigma \text{Aniones} = 104.52 \frac{mEq}{L} + 1.643 \frac{mEq}{L} + 0.3478 \frac{mEq}{L} = 106.51$$

$$\%(Cl^-) = \frac{mEq Cl^-}{\Sigma \text{Aniones}} * 100 = \frac{104.52}{106.51} * 100 = 98.13 \%$$

$$\%(SO_4^{2-}) = \frac{mEq SO_4^{2-}}{\Sigma \text{Aniones}} * 100 = \frac{1.643}{106.51} * 100 = 1.5 \%$$

$$\%(HCO_3^-) = \frac{mEq HCO_3^-}{\Sigma \text{Aniones}} * 100 = \frac{0.3478}{106.51} * 100 = 0.33 \%$$



ANEXO F

Estimación de temperatura profunda con los resultados obtenidos en mayo de 2021 para el pozo productor MT-31

$$T \frac{Na}{K} \text{ Fournier (1979)} = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.485} - 273.15$$

$$T \frac{Na}{K} \text{ Fournier} = \frac{1217}{\log \frac{2289.65}{322.83} + 1.485} - 273.15 = 247.87^{\circ}\text{C}$$

$$T_{NaKCa} = \frac{1647}{(\log \frac{Na}{K}) * \beta \log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06} + 2.47 - 273.15$$

Donde:

$\beta = 4/3$ para temperatura $< 100^{\circ}\text{C}$ y $\frac{\sqrt{Ca}}{Na} > 1$

$\beta = 1/3$ para temperatura $> 100^{\circ}\text{C}$ y $\frac{\sqrt{Ca}}{Na} < 1$

$$T_{NaKCa} = \frac{1647}{(\log \frac{2289.65}{322.83}) + (\frac{1}{3}) * (\log (\frac{\sqrt{30}}{2289.65}) + 2.06) + 2.47} - 273 = 252^{\circ}\text{C}$$

$$T_{SiO_2} = \frac{1522}{5.75 - \log SiO_2} - 273.15$$

$$T_{SiO_2} = \frac{1522}{5.75 - \log (473.16)} - 273.15 = 221.8^{\circ}\text{C}$$

ANEXO G

Cálculo de concentración de cloruro en reservorio resultados obtenidos en mayo de 2021 para el pozo productor MT-31

En la siguiente tabla se muestra los datos de producción para el pozo MT-31 para mayo de 2021.

POZO	MT-31
FECHA	26/5/2021
Clsep (mg/L)	3705.2
Pcabezal (barg)	6.5
Psep (barg)	5.3
Qv (ton/h)	41.5
QL (ton/h)	241.1
Q (ton/h)	282.7
Y (%)	14.7
Hm (Kj/kg)	988.2
Clres (mg/L)	3160.9
HsepV (Kj/kg)	2750.7
HsepL (Kj/kg)	649.6

Donde:

Clsep: cloruro en la separación

Clres: cloruro en reservorio

Qv: caudal de vapor

QL: caudal de Líquido

Q: caudal total

Y: fracción de vapor

HsepV: entalpía de vapor a presión de separación

HsepL: entalpía de líquido a presión de separación

Hm: entalpía de la mezcla

Para el cálculo de los cloruros en reservorio se utiliza la siguiente ecuación:

$$Cl_{res} = (1 - y)Cl_l + yCl_v$$

$$Cl_{res} = \left(1 - \left(\frac{14.7}{100}\right)\right) 3705.2 + yCl_v$$

Se asume que la concentración de los cloruros en el vapor es 0 por lo tanto el cálculo es el siguiente:

$$Cl_{res} = \left(1 - \left(\frac{14.7}{100}\right)\right) 3705.2 \text{ mg/L} = 3160.5 \text{ mg/L}$$

ANEXO H

Impacto ambiental en el campo geotérmico Momotombo

La Empresa Nicaragüense de Electricidad (ENEL), tiene como visión ser líder en producir energía renovable, con recursos naturales, en armonía con el medio ambiente, garantizando la operación de los sistemas de generación al menor costo y aprobando la participación de socios inversionista nacionales y extranjeros en proyectos hidroeléctricos y geotérmicos.

El desarrollo de nuestros recursos geotérmicos es parte de la solución de la crisis energética ante el alza de los combustibles fósiles. Nicaragua podría convertirse en un país exportador de energía por medio de la interconexión eléctrica (SIEPAC). Adicionalmente, al hacer uso de una energía limpia como la geotermia, el país podría contribuir en forma sustancial a la mitigación de los efectos de los gases invernadero que son causante del calentamiento global del planeta, debido a la combustión de los combustibles fósiles.

Momotombo Power Company (MPC) ha continuado ejecutando las acciones requeridas para el cumplimiento de las condicionantes establecidas en la Resolución Administrativa No.04-2003, donde MARENA otorga el Permiso Ambiental para la recuperación del Campo Geotérmico Momotombo. Cada año, MPC presenta el Informe de Seguimiento Ambiental ante las instituciones reguladoras para su información y soporte de seguimiento, en donde se describe cada condicionante y las actividades que se realizan para el cumplimiento de cada una de ellas.

El Permiso Ambiental fue otorgado exclusivamente para la perforación de pozos y la puesta en funcionamiento de éstos, así como para el aprovechamiento de energía geotérmica, que asegure la operación de las Unidades Generadoras hasta alcanzar los 70 MW correspondientes a la capacidad instalada originalmente. Además, cumplir con lo establecido en el Estudio de Impacto Ambiental, evaluado y aprobado por MARENA.

El fluido geotérmico es tratado químicamente para evitar la formación de los minerales de carbonato de calcio (Calcita – CaCO_3) y de Sílice (SiO_2), a través de la aplicación de soluciones inhibidoras. El inhibidor de calcita actúa sobre la fase bifásica y el inhibidor de sílice actúa sobre la fase líquida.

El manejo de la salmuera se realiza en un ciclo cerrado desde que es extraída de los pozos productores hasta que es reinyectado al subsuelo a través de los pozos inyectoros, por lo que no tiene contacto con el medio externo, con el medio ambiente, reduciendo al mínimo el riesgo de contaminación o la afectación de la flora y fauna de la zona del proyecto.

El fluido inyectado no presenta cambios geoquímicos en su composición en todo el ciclo productivo y por ende no altera la composición química del fluido del reservorio

Con lo que respecta a la calidad del aire la presencia de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) fue detectada en el Proyecto Geotérmico (en los cuatro días de muestreo) no superó el límite recomendado por la OSHA; mientras que, en el sitio Puerto Momotombo no superó el límite ambiental recomendado por la NTON 05012-02.

La presencia de Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) fue detectada en ocho sitios de muestreo, pero su concentración promedio diaria en los cuatro días de muestreo, en el sitio Puerto Momotombo no superó el límite ambiental recomendado por la OMS y en los siete sitios ocupacionales en el campo geotérmico no superó el límite recomendado por la OSHA.

La presencia del Monóxido de Carbono (CO) fue detectada en los ocho sitios de muestreo, pero su concentración promedio diaria en los cuatro días de muestreo, en el sitio Puerto Momotombo no superó el límite ambiental recomendado por la NTON 05012-02 y en los siete sitios ocupacionales en el campo Geotérmico no superó el límite recomendado por la OSHA.

La presencia del Dióxido de Carbono (CO_2) fue detectada en los ocho sitios de muestreo, este gas no posee un límite ambiental. En los siete sitios ocupacionales en el campo Geotérmico no superó el límite recomendado por la OSHA.