

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

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICION 2018



TEMA: PROPUESTA DE MODELOS GEOLÓGICO Y
GEOQUÍMICO DE UN ÁREA GEOTÉRMICA EN
NICARAGUA.

PRESENTAN:

Eduardo Jesús Hernández Mendoza

Kelym Reynaldo Martínez Mena

ASESORES: Lic. María Inés Magaña Burgos

Ing. Marvyn Oziel García

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2018

Resumen.

El área geotérmica Volcán El Hoyo – Monte Galán forma parte de la cordillera de los Marrabios, se encuentra ubicada en la Región del Pacífico de Nicaragua, localizada en el municipio de La Paz Centro, departamento de León, a unos 50 km al NW de Managua.

Geológicamente en el área de investigación se definieron cuatro unidades litológicas, las cuales están subdivididas de la siguiente forma: Unidad depósitos superficiales, unidad complejo Volcánico de El Hoyo, unidad escudo ignimbrítico de Malpasillo, unidad depósitos no diferenciados.

Estructuralmente se identificaron tres patrones principales representados por fallas y lineamientos con orientaciones NW - SE, N - S, NE-SW. Se identificó que en los sistema NW – SE y NS, se ubican las posibles principales zonas de ascenso y descarga del sistema geotérmico.

Se delimitaron cuatro zonas de alteración hidrotermal las que se distribuyen de la siguiente manera: en la cima del Volcán EL Hoyo, Ladera Este del volcán El picacho, en la cumbre del Cerro Colorado y la Laguna de Monte Galán, las cuales se caracterizan por la presencia de manifestaciones superficiales que incluyen fumarolas, suelos humeantes, sínter, alteración hidrotermal activa del suelo y fósiles. Estas manifestaciones presentan temperaturas superficiales que oscilan entre 65.5°C y 100°C.

El estudio geoquímico de las manifestaciones termales, manantiales, pozos perforados y excavados, permitió la caracterización de los acuíferos superficiales presentes en la zona de interés, para ello se empleó la clasificación de agua a través de diagramas químicos como Piper, Stiff y ternarios, los que resaltan las características de cada una de las muestras.

Se utilizó también la isotopía para la determinación de la recarga del sistema; también se realizó el análisis de distribución areal de componentes químicos característicos así como la aplicación de geotermómetros catiónicos y sílice, para lograr definir las zonas de descarga de los fluidos y la temperatura estimada en el reservorio, estos elementos forman partes fundamentales para la construcción del modelo geoquímico conceptual propuesto.

El modelo propuesto identifica la existencia de tres zonas promisorias para la existencia del recurso geotérmico, ubicadas en el sector este del volcán El Hoyo, en Cerro Colorado. Se propone una zona de ascenso (Upflow) en la ladera este del volcán El Hoyo, otra zona de descarga (Upflow) de fluidos en la zona del Cerro Colorado proveniente de la parte este del complejo El Hoyo y que circulan a lo largo de la planicie central de la zona, y descargan al sur a través del sistema de fallas N-S, generando en algunos sectores manifestaciones termales que descargan hacia el Lago de Managua.

Es probable la existencia de un sistema de upflow que asciende por la caldera de Galán, el cual es aislado por el fallamiento NE-SW; sin embargo, dicha zona de ascenso no ha sido comprobada hasta el momento.

Contenido

3. Introducción.....	5
4. Planteamiento del problema.....	7
5. Justificación del estudio.....	7
6. Objetivos	7
6.1. Objetivo general.....	7
6.2. Objetivos específicos	7
7. Marco Teórico.....	8
7.1. Geoquímica de aguas termales.....	8
7.1.2. Geotermómetros.....	12
7.1.3. Isotopía.....	17
7.2. Marco Geotectónico Regional.....	20
7.2.1. Contexto Geotectónico Regional.....	20
7.2.3. Geología regional de Nicaragua.....	21
7.2.3. Volcanismo Cuaternario En Nicaragua.....	23
8. Metodología.....	25
8.1. Recopilación de Información.....	25
8.2. Etapa de Procesamiento e Interpretación de Datos Obtenidos y Generación de Resultados.....	25
9. Análisis de datos.....	27
9.1. Geología Local.....	27
9.1.2. Geología estructural.....	31
9.1.2. Alteración Hidrotermal.....	35
9.1.3. Estratigrafía Geológica propuesta para el área Volcán El Hoyo – Monte Galán.....	36
9.2 Evaluación Geoquímica.....	40
9.2.1. Geoquímica de líquidos.....	41
9.2.2. Geoquímica de Gases.....	48
9.2.3. Isotopía	49
10. Presentación de los Resultados.....	51
10.1. Fuente de calor.....	51
10.2. Estructura del yacimiento.....	52
10.3. Dirección de circulación de fluidos.....	52
10.3. Fluidos y temperatura del yacimiento.....	53

11. Conclusiones y recomendaciones. 61

12. Agradecimientos..... 63

13. Referencias bibliográficas. 63

Índice de figuras

Figura 1: Representación de los principales elementos de un sistema geotérmico.....9

Figura 2: Pozo de lodo ácido.....9

Figura 3: Diagrama ternario Cl, SO₄ y HCO₃.....10

Figura 4: Diagrama del contenido relativo de Li, B y Cl.....11

Figura 5: Diagrama de ternario de Na-K-Mg.14

Figura 6: Diagrama ternario N₂, He y Ar.16

Figura 7: Gráfico de Deuterio - O18, incluye línea meteórica Mundial18

Figura 8: Bosquejo del contexto geotectónico de América Central, se ilustran las velocidades promedio de deriva de las placas según su posición (Frischbutter, 2002).20

Figura 9: Hodgson G., 1997. Mapa de provincias Geológicas Estructurales de Nicaragua.21

Figura 10: Frente Volcánico de Nicaragua (FVN).....24

Figura 11: Estratigrafía y evolución tectónica de la parte occidental de Nicaragua (Weinberg, 1992).32

Figura 12: Rosta de fractura y elipse de esfuerzos correspondiente a las fases de deformación en el área termal de Nicaragua.....33

Figura 13: Roseta de fracturas correspondiente al sistema de fallas y lineamientos NE - SW33

Figura 14: Roseta de fracturas correspondiente al sistema de fallas y lineamientos NW-SE34

Figura 15: Roseta de fracturas correspondiente a al sistema de fallas y lineamientos N-S34

Figura 16: Esquema estratigráfico general y correlaciones regionales en la porción central de la depresión Nicaragüense. Tomado de Olade, 1982; Dal, 1997; Ostapenko et al, 1998.....39

Figura 17: Localización de la zona de estudio y de los puntos de muestreo en la Zona Termal de Nicaragua.40

Figura 18: Zonas 1 y 2 en las que se divide el área de estudio de la zona termal de Nicaragua.41

Figura 19: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de la zona termal de Nicaragua.42

Figura 20: Diagrama ternario de Cl-SO₄-HCO₃ del área termal de Nicaragua.....43

Figura 21: Diagramas de Stiff de las muestras de la zona Termal de Nicaragua.44

Figura 22: Diagrama de equilibrio térmico agua – roca (Giggenbach, 1991).45

Figura 23: Diagrama ternario Na-K-Mg del área termal de Nicaragua.45

Figura 24: Diagrama ternario de Li, Cl, B; del área geotérmica de Nicaragua.46

Figura 25: Contenido relativo de N₂-He-Ar. del área termal de Nicaragua.48

Figura 26: Diagrama de relaciones H₂/Ar – CO₂/Ar para las muestras de gases en la zona termal de Nicaragua.49

Figura 27: Análisis isotópico de las muestras de la zona termal de Nicaragua.....49

Figura 28: Análisis de 18O vs altitud de muestreo para la zona termal de Nicaragua.50

Figura 29: Isotermas calculadas para el área El Hoyo - Monte Galán.54

Figura 30: Isotermas de fondo de pozo medidas en los pozos de gradiente del área El Hoyo - Monte Galán.....55

Figura 31: Isolíneas de cloruros analizados en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.56

Figura 32: Isolíneas de boro analizados en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.56

Figura 33: Isolíneas de Deuterio analizados en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.....57

Figura 34: Isolíneas de concentración total de gases analizados en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.....57

Figura 35: Isolíneas de concentración de helio analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.....58

Figura 36: Isolíneas de concentración de H2S analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.....58

Figura 37: Isolíneas de concentración de CO2 analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.....58

Figura 38: Modelo geoquímico y geológico estructural60

Figura 39: Mapa estructural del área geotérmica El Hoyo - Monte Galán.....64

Figura 40: Mapa geológico - estructural del área El Hoyo - Monte Galán.....64

Figura 41: Sección geológica del área El Hoyo - Monte Galán.64

Figura 42: Modelo geológico y geoquímico del área El Hoyo - Monte Galán.....64

Índice de Tablas

Tabla 1: Geotermómetros en base a la concentración de sílice.....13

Tabla 2: Geotermómetros catiónicos.13

Tabla 3: Principales isótopos analizados en el presente estudio.....17

Tabla 4: Propuesta de litología del área de estudio (Olade, 1982).....47

3. Introducción.

El área geotérmica Volcán El Hoyo – Monte Galán forma parte de la cordillera de los Marrabios, se encuentra ubicada en la Región del Pacífico de Nicaragua, localizándose en el municipio de La Paz Centro, departamento de León, a unos 50 km al NW de Managua. El área geotérmica limita al Sur y al Este con el municipio de la Paz Centro, al Norte y al Este con el Municipio de Larreynaga y al Oeste con el municipio de León y con el municipio de Larreynaga.

El clima del área es de tipo tropical seco, con precipitaciones medias anuales en el rango de los 1,200-1,400mm. Las precipitaciones son esencialmente concentradas en la estación lluviosa, la cual abarca el período entre mayo y octubre y es frecuentemente irregular. La temperatura media anual es de 27° C (CNE-PM, 2001).

El área geotérmica hace referencia generalmente a la zona comprendida entre el volcán El Hoyo y el volcán Momotombo, esto incluye a la caldera de Galán. El volcán El Hoyo es un edificio compuesto, con morfología general de escudo y con forma alargada en sentido NE-SW, que se eleva desde la planicie de la Depresión Nicaragüense (aproximadamente 100 m.s.n.m.) hasta la altura máxima de 1,088 m.s.n.m. Este edificio está cubierto por amplias coladas lávicas que se extienden hasta 15 km desde su centro principal.

En su cumbre se observan los remanentes de un viejo y amplio cráter (Cerro El Picacho) deformado por una falla y parcialmente cubierto por los productos más recientes del cráter actual del Volcán El Hoyo. En el flanco NW de la cumbre resalta la presencia de una amplia fractura humeante (fumarola de El Hoyo) y de un “hoyo” circular, de unos 200 m de diámetro y unos 80 - 100 m de profundidad, generado por algún fenómeno explosivo. Es este “hoyo”, es visible desde toda la zona al S y SE, que aparentemente atribuyó el insólito nombre a este volcán.

En el área resaltan varios conos menores, con estructura general de pequeños estratovolcanes o de conos piroclásticos, los principales son: el Volcán Las Pilas y el Cerro de Asososca, ubicados en el sector occidental del macizo volcánico

La Caldera de Galán es una amplia depresión con forma irregular, de unos 4 km de diámetro, que se extiende al interior de un borde circular con elevación variable entre los 150 y los 300 m.s.n.m. Ésta queda comprendida entre el macizo del Volcán Momotombo, al SE, y el Cerro Montoso (531 m.s.n.m.), un pequeño edificio lávico que creció sobre el borde NW de la caldera. El fondo plano de la caldera es parcialmente ocupado por coladas lávicas muy recientes del Volcán Momotombo e incluye cuatro lagunas de modestas dimensiones, estas se ubican en su sector meridional y es conocida como Laguna de Monte Galán (CNE-PM,2001).

El área de investigación, ha sido objeto de diversos estudios orientados a prospección geotérmica, como resultado de todos los trabajos desarrollados se define una situación muy prometedora para el desarrollo geotérmico. En toda el área se han encontrado indicios de actividad termal, ya sea en la perforación de pozos someros para aprovechamiento de agua y en pozos de gradiente, que sirvieron para delinear una zona con anomalía térmica que se extiende en todo el sector entre El Hoyo y el Cerro Colorado (CNE-PM, 2001).

Cabe resaltar que en años reciente la empresa Geotérmica de Nicaragua S.A (Geonica), ejecutó trabajos de investigación 3G (Geología, Geofísica y Geoquímica), en el área incluyendo la perforación de pozos exploratorios, los que se distribuyeron en toda el área de estudio; como producto de la investigación 3G, se delimitó un área prioritaria para el desarrollo geotérmico, sin embargo, las perforaciones ejecutadas no se logró comprobar la existencia del recurso. En el desarrollo de este trabajo de investigación no se fue posible el uso de la información generada por la empresa Geotérmica de Nicaragua, debido a que es de **carácter confidencial**, por lo que se limitó al uso de información y documentación oficialmente pública.

En el presente documento se muestran los resultados de la caracterización geológica y geoquímica de las manifestaciones termales superficiales ubicadas en el área geotérmica, se compiló todos los datos disponibles en un radio de 400 km², posteriormente se han escogido los datos a utilizar, reduciendo el área de interés de acuerdo a los resultados obtenidos, y se ha llevado a cabo la descripción de la configuración geológica y características físico-químicas de las aguas y gases.

El análisis de la información se ha realizado mediante la utilización de varias técnicas y herramientas tales como fotogeología, geo procesamiento de información geográfica e imágenes Landsat 8, diagramas triangulares para caracterización de las aguas y gases, estimación de temperaturas profundas a través de geotermometría líquida, gaseosas y otras técnicas que han permitido evaluar las condiciones geológicas y geoquímicas del recurso ubicado en el área investigada.

Se pretende que el análisis realizado en el presente documento contribuya a mejorar la comprensión acerca del sistema geotérmico existente en el área del volcán El Hoyo Monte Galán, a través de un modelo geológico – geoquímico preliminar integrado.

4. Planteamiento del problema.

El plan maestro geotérmico de Nicaragua, 2001; realizó la evaluación de la información geológica, vulcanológica, hidrogeológica, geoquímica y geofísica del área geotérmica El Hoyo - Monte Galán, incluyendo los datos de los pozos de gradiente geotérmico. El resultado de esta evaluación sugiere la existencia de un recurso geotérmico de alta entalpía, se propone un modelo conceptual preliminar en el que se involucra la zonación de las alteraciones hidrotermales superficiales y una propuesta de la dirección de los fluidos.

Un modelo conceptual integrado permite contextualizar de forma clara los elementos principales de un sistema geotérmico tales como zonas de ascenso de fluidos calientes y posibles zonas de descarga asociada a la presencia de manifestaciones superficiales.

Este proyecto de investigación se enfocará en el análisis de las características geoquímicas y geológicas del área geotérmica, dando como resultado la propuesta de un modelo conceptual integrado.

5. Justificación del estudio.

El área geotérmica Volcán El Hoyo – Caldera de Galán, forma parte de las 10 zonas de interés geotérmico que han sido caracterizadas en el Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, 2001. Las investigaciones realizadas se han enfocado en caracterizar, ubicar y evaluar un posible yacimiento geotérmico en el área. Sin embargo, a pesar de los aportes de las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento, aún no se ha logrado comprobar la existencia del recurso geotérmico.

En resumen este proyecto busca contribuir al conocimiento del área geotérmica del Hoyo - Monte Galán, mediante el análisis geoquímico de aguas y gases integrado con las principales características geológicas y estructurales.

6. Objetivos

6.1. Objetivo general

- Generar una propuesta de modelo geológico y geoquímico a partir de la información disponible para un área de interés geotérmico El Hoyo Monte Galán Nicaragua.

6.2. Objetivos específicos

- Elaborar mapa geológico estructural a escala 1:50,000.
- Generar mapa de manifestaciones termales del área, usando registros existentes en el área.
- Caracterizar las aguas de las manifestaciones termales mediante herramientas geoquímicas como diagramas triangulares entre otras.
- Calcular las relaciones binarias entre los parámetros químicos de las especies de interés geotérmico.
- Estimar temperaturas profundas del sistema geotérmico mediante geotermómetros de aguas y gases.

7. Marco Teórico.

7.1. Geoquímica de aguas termales.

Los estudios de prospección geoquímica pueden dividirse en dos grandes grupos. El primero consiste en determinar las propiedades químicas de las manifestaciones geotérmicas, manantiales, fumarolas, pozas ácidas, así como caracterizar los productos de alteración hidrotermal o de depositación.

Otro grupo consiste en determinar, en un área relativamente grande, la presencia de algún elemento traza asociados a sistemas geotérmicos o de algún gas o compuesto volátil, en el suelo. Para ello, se diseña una malla y se colocan detectores o se hacen mediciones en cada nodo.

Generalmente los yacimientos geotérmicos son sistemas abiertos, por lo que existen descargas superficiales en forma de manantiales, fumarolas, pozas ácidas o suelos vaporizantes.

Se suele catalogar a los manantiales como: a) templados, b) calientes e c) hirvientes. Los manantiales templados son aquellos cuya temperatura no excede de 45° C. La concentración de sales es baja y el tipo es bicarbonatado. Estos manantiales están asociados a sistemas termales de temperaturas bajas o moderadas y que no están relacionados con intrusiones magmáticas (Quijano, 2007).

Los manantiales calientes presentan temperaturas superiores 45° C e inferiores al punto de ebullición correspondiente al lugar. La salinidad y la composición química de estos manantiales son muy variables y dependen del tipo de sistema hidrotermal a que están asociados.

Los manantiales hirvientes, en la mayoría de los casos, están asociados a sistemas hidrotermales magmáticos de alta temperatura. Los manantiales hirvientes son, por regla general, del tipo clorurado sódico, con concentraciones altas de potasio, bajas concentraciones de calcio y muy bajas concentraciones de magnesio. El pH es neutro o ligeramente alcalino.

Estos manantiales son descargas líquidas de los reservorios y, por ello, se localizan en las partes bajas de los campos geotérmicos, como se aprecia en la figura 1 (Quijano, 2007).

Los géiseres son un caso peculiar de manantiales hirvientes. Se caracterizan por lanzar un chorro de agua y vapor a intervalos regulares. La altura del chorro varía de apenas unos centímetros a decenas de metros y el intervalo puede ser de unos minutos a varias horas.

La explicación más aceptada para este fenómeno es que, debido a la configuración de las fracturas en el subsuelo, se forma algo parecido a una “bolsa” de agua y vapor, que al llegar a cierta presión de rompimiento, se expele a la superficie. Otra manera de explicarlo es por una variación periódica del flujo de gas en la mezcla de agua y vapor, que da lugar a la expulsión de “baches” de mezcla de agua y vapor de manera regular (Quijano, 2007).

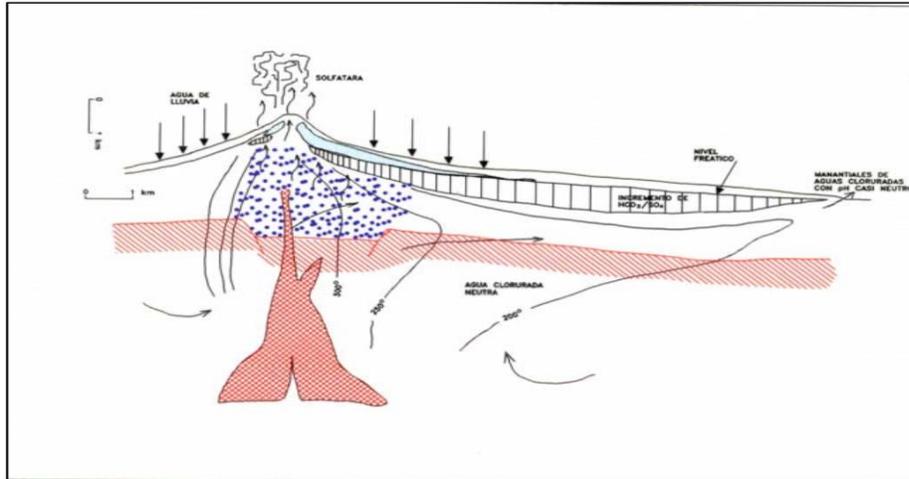


Figura 1: Representación de los principales elementos de un sistema geotérmico.

Las fumarolas son descargas de vapor saturado o ligeramente sobrecalentado. Se localizan en las partes altas de los campos geotérmicos. Estas descargas tienen una presión algo mayor que la atmosférica, de tal forma que emiten un “chiflido” y lanzan un chorro de vapor apreciable, aunque sea pequeño.

Las fumarolas volcánicas, a diferencia de las geotérmicas, presentan temperaturas más altas y presencia de SO₂, HCl y HF.

En ocasiones, las fumarolas descargan a través de suelo saturado de agua, dando lugar a la formación de pozas ácidas con lodo. Esto se debe a que parte del H₂S se disuelve en el agua y, mediante la acción catalizadora de bacterias, se oxida como H₂SO₄, que es un ácido fuerte. Al reaccionar este fluido con la roca se obtiene caolinita y otras arcillas similares, que dan una apariencia lodosa a las charcas que se forman con las manifestaciones.

Como resultado de la disociación del H₂SO₄ el pH es muy bajo, lo que significa una alta concentración de H⁺, y por otra parte el anión predominante es el SO₄²⁻ (Quijano, 2007).

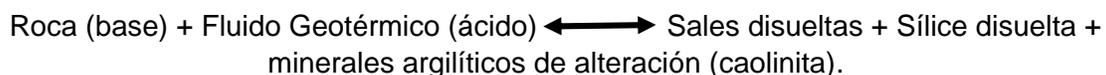
Cuando una fumarola es rica en H₂S y, como consecuencia se deposita azufre elemental en su alrededor, se le llama ‘mofeta’. Los suelos vaporizantes, que no deben confundirse con las fumarolas, son descargas difusas de vapor sin presión y en áreas amplias.



Figura 2: Pozo de lodo ácido.

Por lo general, se trata de descargas secundarias de un reservorio geotérmico. El calor de éste se transporta de manera conductiva, hacia el suelo saturado de humedad produciendo vaporización.

La alteración hidrotermal de tipo argilítico, que es la característica en las zonas de descarga de vapor geotérmico, puede presentarse de manera general por la siguiente reacción (Quijano, 2007):



El trabajo del personal geoquímico consiste en tomar muestras de agua y vapor y del material de alteración. Al muestrear se debe medir la temperatura de la manifestación, la conductividad eléctrica y el pH.

Las muestras se utilizarán para análisis químicos de elementos mayores y menores, así como isótopos ambientales. A las muestras de material de alteración se le practican análisis químicos y mineralógicos (como difracción de rayos X).

La información química e isotópica sirve para determinar el origen del fluido geotérmico, las temperaturas probables del reservorio, las características corrosivas o incrustantes, entre otras cosas (Quijano, 2007).

El diagrama de Cl, SO₄ y HCO₃.

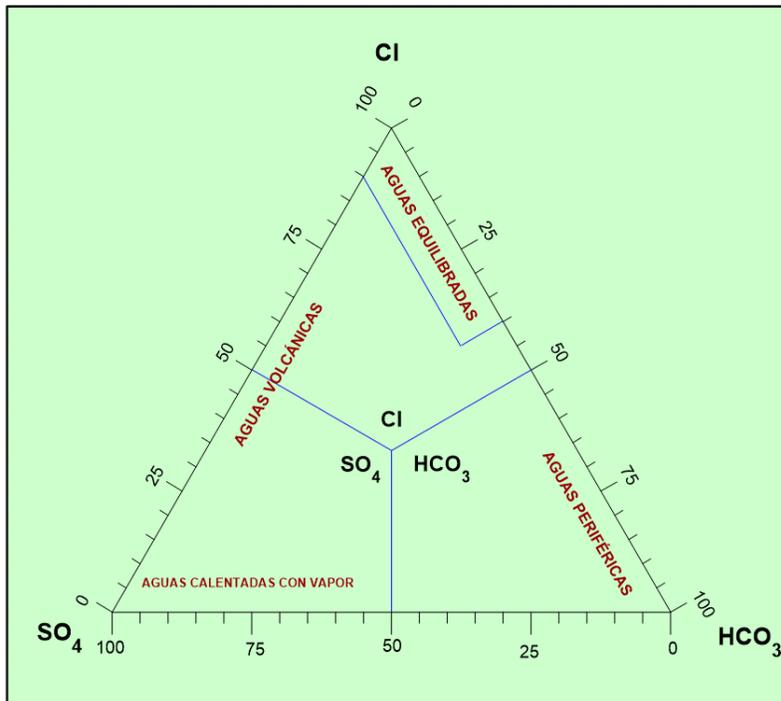


Figura 3: Diagrama ternario Cl, SO₄ y HCO₃

La mayoría de las técnicas geoquímicas pueden ser aplicadas con confianza solamente a fluidos de tipo específico con rangos de composición limitados. De comienzo, la mayoría de los geotermómetros de solutos iónicos “trabajan” si son utilizados con fluidos de características cercanas a la neutralidad química, que contengan cloruros como el ión mayoritario.

Sin embargo, cualquier interpretación de muestras de agua geotérmica, se puede hacer mejor si se cuenta con una base buena de clasificación en términos de

los aniones mayores: Cl, SO₄ y HCO₃, como se muestra en la figura 3 (Giggenbach, 1991).

La posición de los datos en cada diagrama triangular o diagrama ternario es obtenida simplemente con la suma de las concentraciones de los tres constituyentes involucrados. No se gana mucho convirtiendo en otras unidades las concentraciones en peso de los constituyentes en otras unidades como concentraciones molares (mol/Kg) por ejemplo. Este tipo de conversiones es aplicable en cálculos y técnicas termodinámicas más sofisticadas.

La presentación de los datos en forma triangular tiene la ventaja de que ninguno de los constituyentes de “prejujado” como en el caso de graficar, por ejemplo, relaciones donde

el denominador común asume el papel de un factor de normalización y no puede ser cero (Giggenbach, 1991).

En contraste con los gráficos logarítmicos, las líneas de mezcla en los diagramas triangulares siempre son líneas rectas. El diagrama ofrece también la evaluación estadística “al ojo” de grupos y tendencias. Sin embargo, debe tenerse siempre en cuenta que los diagramas ternarios solo dicen una parte de la historia y que algunas correlaciones aparentes son puramente accidentales (Giggenbach, 1991).

En la Figura 3, los rangos de composición son indicados para muchos tipos típicos de aguas termales en el subsuelo, como las volcánicas o las aguas calentadas con vapores formados por la absorción de aguas volcánicas ricas en HCl, de alta temperatura; o los vapores que contienen H₂S que tienen temperaturas menores. La mayoría de las técnicas geoquímicas no son fácilmente aplicables para esos tipos generalmente ácidos.

El grupo al que mejor se ajustan son las aguas neutras, bajas en sulfatos, altas en cloruros de origen geotérmico, que tienen un equilibrio Cl-HCO₃ y acercan más a la esquina de los Cloruros. En el caso de aguas neutras, pero con alto contenido de carbono, hay que tener especial cuidado en la aplicación de la mayoría de los “geoindicadores” (Giggenbach, 1991).

Contenido relativo de Cl, Li y B.

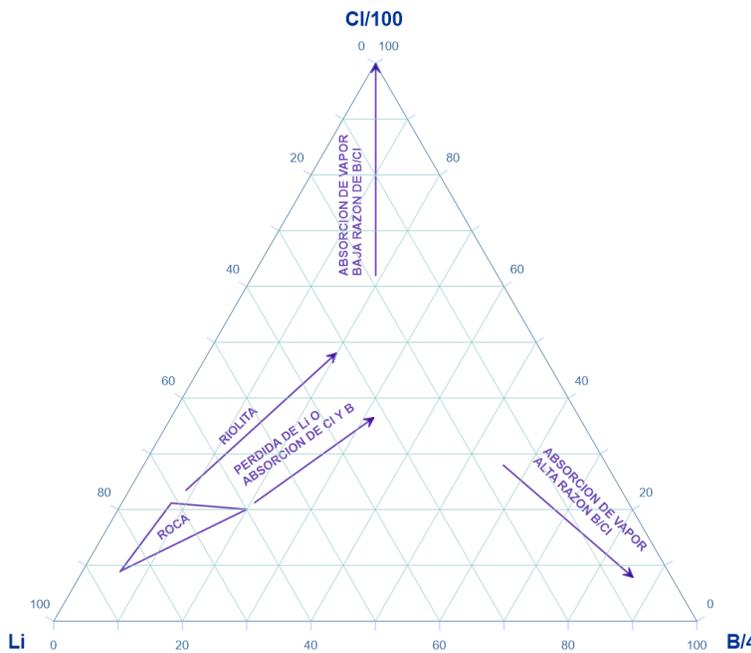


Figura 4: Diagrama del contenido relativo de Li, B y Cl.

El metal alcalino menos afectado por procesos secundarios es el Li. Además puede ser utilizado como “trazador” para el proceso inicial de disolución profunda de la roca y como una referencia para evaluar el posible origen de otros dos elementos conservativos de las aguas termales: Cl y B. En la figura 4, se muestra la estructura de este diagrama (Giggenbach, 1991).

Si al graficar los datos analizados se tienen una concentración muy baja de cloruros, la muestra se colocará cerca de la composición de rocas de la corteza (en el

diagrama), lo que sugiere que su composición se debe a la descomposición simple de la roca. Si por el contrario hay concentraciones mayores de Cl y B, la interpretación sugiere que ambos elementos fueron añadidos a la mezcla posteriormente durante los procesos de disolución de la roca. La pérdida de Li es algo poco probable, ya que en sistemas

geotérmicos es muy común que permanezca en solución una vez que se mezcla en el fluido (Giggenbach, 1991).

Sin embargo, es sorprendente que tanto el Cl y el B sean añadidos a los fluidos que contienen Li en proporciones cercanas a las que tienen las rocas de la corteza. A altas temperaturas el Cl se encuentra mayormente como HCl y el B como H_3BO_3 . Ambos son volátiles y fácilmente acarreados por el vapor de alta temperatura.

Es muy probable, sin embargo, que hayan sido añadidos a la mezcla provenientes de los vapores magmáticos que conducen a la formación de la salmuera ácida profunda responsable de la disolución de la roca. A temperaturas menores, la acidez del HCl se incrementa rápidamente, y es convertida muy pronto en NaCl; el B permanece en su forma volátil para ser acarreado por la fase vapor incluso a temperaturas más bajas (Giggenbach, 1991).

7.1.2. Geotermómetros.

La composición química de los manantiales termales puede ser útil para estimar la temperatura del reservorio del que son descarga. La temperatura se calcula con fórmulas llamadas Geotermómetros, en parte empíricas, en parte basadas en la teoría del equilibrio químico.

El principio general en que se basan los geotermómetros es el supuesto que, en las condiciones de temperatura del reservorio, los solutos que intervienen en la fórmula están en equilibrio químico entre sí. Una vez que el fluido escapa y asciende a la superficie, se va enfriando paulatinamente, ya sea por conducción, ebullición o dilución (Quijano, 2007).

Conforme baja la temperatura la cinética del reequilibrio se hace cada vez más lenta, y por ende, el agua del manantial mantiene la señal química de la temperatura original del reservorio o con una modificación pequeña. Para que un geotermómetro funcione, se requiere que el tiempo de reequilibrio sea, por lo menos, un orden de magnitud menor que el tiempo de ascenso del agua.

Ahora bien, es importante saber en qué condiciones se puede hacer uso de estos geotermómetros. La primera condición es que se apliquen a manantiales del tipo clorurado sódico y de alta temperatura (mayor a $80^{\circ}C$, aunque esto no debe tomarse como una regla inflexible), de tal manera que el manantial realmente represente una descarga de la fase líquida del reservorio y que no se haya diluido mucho en su ascenso a la superficie (Quijano, 2007).

Con menos confiabilidad, pueden aplicarse a manantiales clorurado sulfatados, teniendo en cuenta las condiciones geohidrológicas del manantial. Nunca debe aplicarse a manantiales bicarbonatados o a charcas ácidas, pues las temperaturas que se obtengan serán números sin ningún significado real (Quijano, 2007).

A continuación, se muestran los geotermómetros más comúnmente usados en la tapa de exploración (Quijano, 2007).

Geotermómetros basados en la sílice disuelta.

En todas estas fórmulas, C representa la concentración de sílice disuelta en mg/l. Las fórmulas varían en función de la fase sólida de la sílice que controla la solubilidad. La fórmula con pérdida máxima de vapor se debe aplicar en los casos de manantiales hirvientes. Todas estas fórmulas han probado ser confiables y útiles. Cabe aclarar que estos geotermómetros son sensibles a los efectos de dilución, ya que el cálculo se basa en la concentración de una sola especie.

Nombre	Fórmula	Nombre	Formula
Calcedonia (Fournier)	$t(C) = \frac{1032}{4.69 - \log c} - 273$	Cuarzo con pérdida máxima de Vapor (Fournier)	$t(C) = \frac{1522}{5.75 - \log c} - 273$
Cuarzo (Fournier)	$t(C) = \frac{1309}{5.19 - \log c} - 273$	Calcedonia – cuarzo (Giggenbach)	$t(C) = \frac{1000}{4.55 - \log c} - 273$

Tabla 1: Geotermómetros en base a la concentración de sílice.

Geotermómetros de cationes.

Existe también una familia de geotermómetros basados en la concentración de los cationes principales (Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺). En estos casos se emplea la razón de dos de estos cationes, por lo que son menos sensibles a los efectos de dilución.

En todos estos casos, la concentración está dada en mg/L. El geotermómetro que incluye al calcio es un poco más complicado, a causa del parámetro β que adquiere dos valores distintos; esta fórmula es útil en casos donde el calcio es relativamente alto, a una razón estimada del 25% más de la concentración de potasio.

Nombre	Fórmula	Nombre	Fórmula
Potasio – Magnesio (Giggenbach)	$t(C) = \frac{4410}{13.95 - \log \frac{K^2}{Mg^2}} - 273$	Sodio – Potasio (Fournier)	$t(C) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K}} - 273$
Potasio – Sodio (Giggenbach)	$t(C) = \frac{1390}{1.75 - \log \frac{K}{Na}} - 273$	Sodio – Potasio – Calcio	$t(C) = \frac{1647}{\log \frac{Na}{K} + \beta [\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06] + 2.47} - 273$
$\beta = \frac{4}{3}$ si $[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06] \geq 0$ y $t(C) \leq 100$		$\beta = \frac{1}{3}$ si $[\log \frac{\sqrt{Ca}}{Na} + 2.06] < 0$ o si $t(\frac{4}{3}) > 100$	

Tabla 2: Geotermómetros catiónicos.

En los años 80's, se diseñó una técnica de "autovigilancia" que da una indicación automática de la idoneidad de un agua determinada para la aplicación de geoindicadores de soluto iónico. Está basada esencialmente en la dependencia de la temperatura de estas dos reacciones:

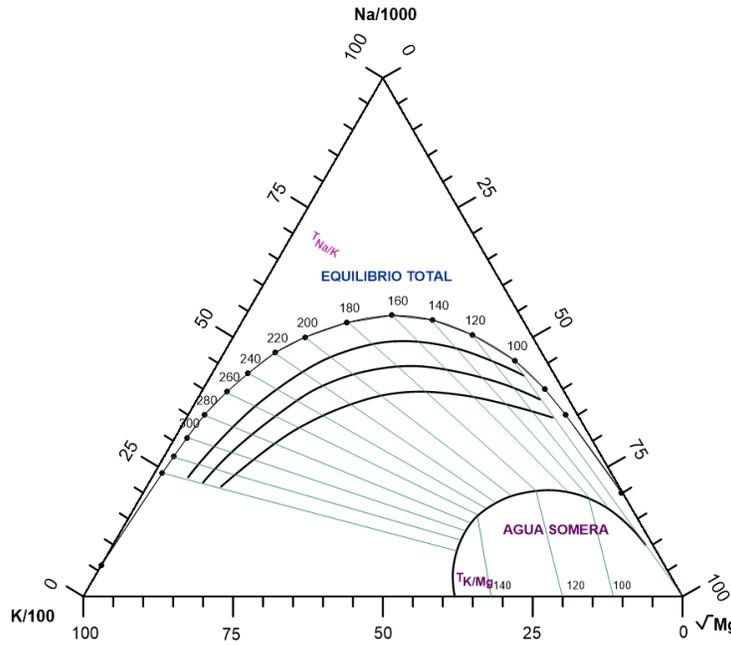
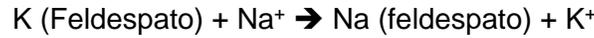


Figura 5: Diagrama de ternario de Na-K-Mg.

Ambas reacciones involucran minerales del conjunto de equilibrio completo que se espera que se forme después de la recristalización isoquímica de una roca cristal bajo condiciones de interés geotérmico (Giggenbach, 1991).

Los contenidos de Na, K y Mg de aguas dentro de este conjunto de equilibrio son bastante accesibles en cuanto a la evaluación rigurosa de sus condiciones. La evaluación de los geotermómetros de Na-K-Mg se puede realizar mejor con el

uso del diagrama proporcionado por Giggenbach en 1988 (Figura 5).

Las aguas de descarga de pozos geotérmicos, se ubican cerca de la línea de equilibrio total a condiciones de sus temperaturas a profundidad. Su posición algo más allá de la línea teórica de equilibrio se debe a la pérdida de vapor que aumenta el contenido absoluto de soluto en las muestras recolectadas a presión atmosférica.

La principal ventaja de la figura 5, además de esta evaluación preliminar de las correlaciones termodinámica y cinética, es su capacidad para representar la posición de un gran número de muestras simultáneamente, lo que permite la delineación de las tendencias de mezcla y los agrupamientos (Giggenbach, 1991).

También evita la acumulación de variables como ocurre con el geotermómetro de Na-K-Ca; La figura 5 permite que los efectos de los procesos secundarios en los contenidos de Na, K y Mg se evalúen individualmente, así como los procesos de reequilibrio químico entre el fluido y la roca, ayudando a obtener una referencia gráfica de las temperaturas de equilibrio parcial del proceso.

Además, la posición de las aguas resultantes de los dos procesos de la fusión de la roca y el equilibrio, están bien separadas, lo que elimina cualquier duda en cuanto a su importancia relativa y en lo referente a darle forma a la composición de un agua geotérmica (Giggenbach, 1991).

La aplicación de geotermómetros se ve limitada por la falta de equilibrio químico a temperaturas bajas de las muestras y efectos de la disolución de la composición química en estratos más someros.

Geotermómetros de gases.

La composición química de los gases también puede ser útil para estimar la temperatura del probable reservorio. El equilibrio químico de los gases depende no solo de la temperatura, sino también de su distribución entre las fases líquida y gaseosa. Los factores de partición de los gases geotérmicos, en función de la temperatura en °C, se conocen bien (ver tabla a continuación).

- $\text{Log B (NH}_3) = 1.4113 - 0.00292 \cdot T$
- $\text{Log B (H}_2\text{S)} = 4.05747 - 0.006981 \cdot T$
- $\text{Log B (CO}_2) = 4.7593 - 0.01092 \cdot T$
- $\text{Log B (CH}_4) = 6.0783 - 0.01383 \cdot T$
- $\text{Log B (H}_2) = 6.2283 - 0.01403 \cdot T$
- $\text{Log B (N}_2) = 6.4426 - 0.01416 \cdot T$

Donde B representa la razón del gas en la fase gaseosa y en la líquida (Quijano, 2007).

La aplicación de los geotermómetros de gases es más compleja, pues intervienen varios factores que influyen en la condición de equilibrio químico. Primero, el flujo de gases desde la cámara magmática puede ser suficientemente vigoroso como para que en el reservorio no se alcance el equilibrio. Segundo, en casi todos los geotermómetros es necesario conocer la saturación del vapor en el reservorio; en aquellos en que esto no es necesario, se recurre a ajustes empíricos, como es el caso del geotermómetro de D'Amore – Panichi, el primero en ser propuesto, en que la presión parcial de CO₂ está ajustada con datos empíricos de pozos de vapor seco de Larderello (Quijano, 2007).

Ahora bien, es complicado precisar qué se entiende por saturación de vapor en un reservorio geotérmico y, más aún, medir este parámetro. Por ello, en la práctica, algunos geotermómetros de gases son más útiles para estimar el valor de la saturación de vapor, ya que la temperatura se puede estimar por otros métodos e incluso, medir si se cuenta con pozos ya perforados.

Éstas son algunas fórmulas de geotermómetros de gases (Quijano, 2007):

- D'Amore y Panichi:

$$t(c) = \frac{24775}{\alpha + \beta + 36.05} - 273$$

$$\alpha = 2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2}{CO_2} - 3 \log \frac{H_2S}{CO_2} \qquad \beta = 7 \log P_{CO_2}$$

Donde $\log P_{CO_2} = -1$ si $CO_2 < 75\%$; 0 si $CO_2 > 75\%$; 1 si $CO_2 > 75\%$ y $CH_4 > 2H_2$ y $H_2S > 2H_2$.

- Giggenbach:

Este geotermómetro utiliza las concentraciones de H₂ y Ar, bajo el supuesto de que la fugacidad del H₂ depende fuertemente de la temperatura y de que la concentración de Ar en los reservorios geotérmicos corresponde a la de agua saturada con aire, ya que el Ar geotérmico es de origen atmosférico.

$$t(C) = 70 \left\{ 2.5 + \log \left[\frac{H_2}{Ar} \right] \right\}$$

Donde la concentración de gases está dada en porcentaje molar.

Contenido relativo de N₂, He y Ar.

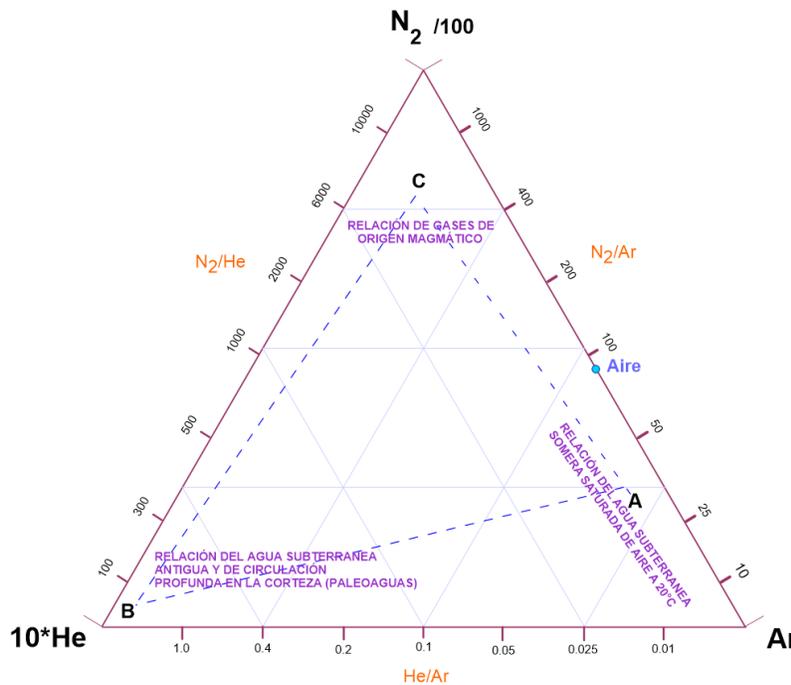


Figura 6: Diagrama ternario N₂, He y Ar.

Ar y He son gases nobles y químicamente inertes, el N₂ puede tomar parte en las reacciones químicas para formar algunos compuestos como el NH₃. Sin embargo, generalmente el N₂ es el compuesto predominante en los gases termales. En la base de un gran número de análisis de descargas de gases en una amplia variedad de fuentes superficiales, los puntos que representan el contenido relativo de N₂, He y Ar en un diagrama triangular, se encuentran en un área delineada por tres componentes mayores en su

fuerza de origen:

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

Un componente *magmático*, caracterizado por un aumento de las relaciones N₂/Ar de alrededor de 800, pero se han observado relaciones de hasta 2000. Estas relaciones N₂/Ar muy altas parecen ser típicas de los gases "andesíticos" asociados con los límites de las placas convergentes.

En los límites divergentes, en los gases "basálticos", estas relaciones suelen ser mucho más bajas. El contenido de He del componente magmático es considerablemente más alto que el del componente meteórico (He/Ar ≈ 0.1).

Un componente *crustal* o de la corteza, compuesto principalmente por He radiogénico. Se espera que la concentración de Helio 4, se incremente a medida que también se incremente el tiempo de residencia de los gases en la corteza; el aire libre, el cual aparece en forma de presencia de O₂, es siempre un contaminante. Su relación N₂/Ar es de 84 (Giggenbach, 1991).

El origen del alto contenido de N₂ del componente magmático es todavía algo incierto. Parte de ello puede derivarse a través de la descomposición de la materia orgánica de la corteza al entrar en contacto con una intrusión magmática; puede liberarse directamente del manto o puede haber sido transportado con la placa que subduce. Este último supuesto está respaldado por el contenido relativo relativamente bajo de N₂ en los gases asociados con el volcanismo basáltico. Una buena correlación de N₂ con CO₂ y He en gases andesíticos sugiere un origen muy profundo (Giggenbach, 1991).

7.1.3. Isotopía.

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico, por lo que tienen igual número de protones (número atómico) pero un número diferente de neutrones, por lo cual la masa atómica (igual a la suma de protones y neutrones) es diferente. Por ejemplo, el Hidrógeno tiene tres isótopos, los cuales se representan con el símbolo químico respectivo (H) y un índice superior izquierdo que indica la masa: ¹H, ²H y ³H. El hidrógeno 1 es el más abundante y consta de 1 protón; el hidrógeno 2, de un protón y un neutrón, y el hidrógeno 3, de un protón y dos neutrones.

Algunos de los isótopos de los elementos ligeros, es decir, con números atómicos pequeños, son estables, por lo que siempre tienen la configuración atómica que les es propia. Tal es el caso del ¹H y del ²H; este último conocido también como Deuterio (D) (Quijano, 2007).

Otros como el ³H conocido también como tritio (T), son inestables; esto significa que su configuración electrónica no puede permanecer y decaen o se transforman en otra configuración distinta. Al hacerlo, emiten radiación, que puede ser de tres tipos diferentes: partículas alfa (dos protones y dos neutrones); beta (un electrón o un positrón) o gama (un fotón). Por ejemplo, el T emite una partícula beta negativa y se transforma en ³He. En el presente trabajo se tratarán únicamente ciertos isótopos estables, detallados en la siguiente:

Nombre	Símbolo	Número atómico	Masa atómica	Abundancia Natural (‰)
Deuterio	D	1	2	0.015
Oxígeno 18	¹⁸ O	8	18	0.20

Tabla 3: Principales isótopos analizados en el presente estudio.

Las propiedades fisicoquímicas de los isótopos de un mismo elemento son muy semejantes, ya que la configuración electrónica de las moléculas es la misma. Sin embargo,

debido a la diferencia en la masa atómica, la energía vibracional que tienen los isótopos con menos neutrones (más ligeros) es ligeramente mayor a la de los isótopos con más neutrones, y eso hace que cambien también algunas de sus características (Quijano, 2007).

Por ejemplo, la presión de vapor del D y del ¹⁸O es algo menor que la del H y la del ¹⁶O respectivamente, por lo que durante el proceso de evaporación, los isótopos más ligeros (H y ¹⁶O) cambian a la fase vapor con una tasa mayor que los isótopos más pesados (D y ¹⁸O), resultando que en la fase vapor habrá una proporción mayor de isótopos ligeros que en la fase líquida remanente. A este fenómeno se le llama **fraccionamiento isotópico** (Quijano, 2007).

Los procesos naturales en los que ocurre este fenómeno son los cambios de fase, las reacciones de precipitación y disolución (que son reacciones de intercambio molecular), y las de oxidación y reducción.

Debido al fraccionamiento isotópico la abundancia natural del ¹⁸O varía en los materiales naturales de la corteza terrestre. El agua de mar es el patrón de referencia, por lo tanto el valor Delta es 0. Las aguas continentales (aguas dulces) poseen por lo general, valores negativos, ya que se originan de la evaporación del agua de mar y tienen menos ¹⁸O.

El fraccionamiento isotópico se da en todos los procesos atmosféricos de evaporación – condensación que se da en todo el mundo. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con la colaboración de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), han llevado a cabo de forma anual, una medición del contenido isotópico de la precipitación pluvial en todo el mundo. Con esos datos se han obtenido las concentraciones de D y ¹⁸O en todo el mundo, graficando los valores promedio. Así es como se ha obtenido la Línea Meteorica Mundial (figura 7), definida por la ecuación $\delta D_{\text{‰}} = 8 \delta^{18}O_{\text{‰}} + 10$

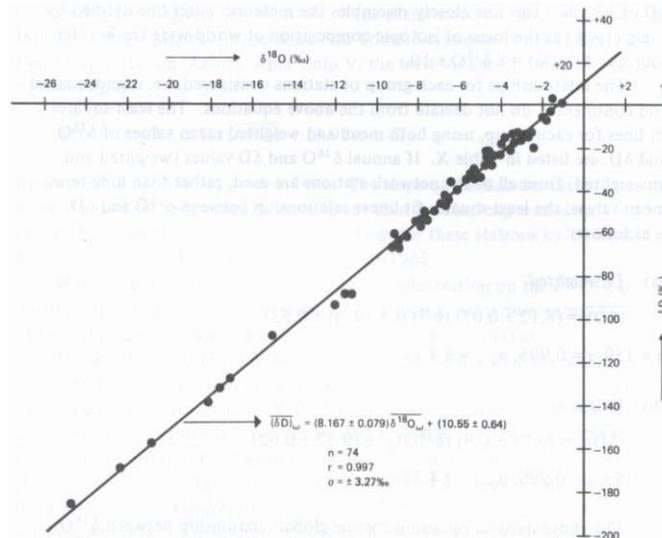


Figura 7: Gráfico de Deuterio - O18, incluye línea meteórica Mundial

Los valores delta, en el ámbito mundial dependen de la altitud y por lo mismo, de la temperatura media anual, lo que genera valores de isótopos más cercanos a cero en la región ecuatorial y se hacen más negativos conforme el punto de medición se acerca a los polos (Quijano, 2007).

Isótopos en el Agua Geotérmica.

El agua geotérmica se origina, en última instancia, del agua meteórica que se infiltra y en parte, de agua “magmática”. Según Giggenbach, el agua magmática tiene una composición isotópica característica, según corresponda a un ambiente de magmas de tipo básico (centros de dispersión oceánicos y de apertura continental) o de magmas andesíticos (centros de subducción).

En el primer caso, los valores $\delta D\text{‰}$ varían de -5 a -35 y de $\delta^{18}O\text{‰}$ de +8 a +11. En el segundo caso el rango de $\delta D\text{‰}$ va de -60 a -85 y el de $\delta^{18}O\text{‰}$ de +5 a +8.

El agua meteórica al ingresar al reservorio geotérmico, modifica su composición de ^{18}O mediante un proceso de intercambio isotópico con la roca huésped, facilitado por las altas temperaturas. Tanto las rocas ígneas como las sedimentarias están enriquecidas en ^{18}O con respecto al agua de mar y las aguas meteóricas.

El contenido de deuterio del agua no varía al estar en contacto con la roca del reservorio, ya que las rocas contienen muy poca cantidad de hidrógeno. El resultado final es que las aguas meteóricas originales modifican sus valores delta a lo largo de una línea horizontal que se aleja de la línea meteórica mundial, efecto conocido como **corrimiento del ^{18}O** (Quijano, 2007).

7.2. Marco Geotectónico Regional.

7.2.1. Contexto Geotectónico Regional.

La historia geológica y tectónica América Central, ha estado estrechamente relacionada con la evolución geodinámica del margen continental del pacífico, actualmente está caracterizado por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe a una velocidad de 73 – 90 mm año (Dixon 1993; DeMets 2001). Ver figura 8; El pronunciado ángulo de subducción entre las placas de Cocos y Caribe (65°; Protti et al., 1994), es el principal responsable tanto de la formación del Frente Volcánico de América Central (FVAC), como de la abundante sismicidad cortical somera (<33 km), presente a lo largo de los 25 km de la FVAC (La Femina et al., 2002).

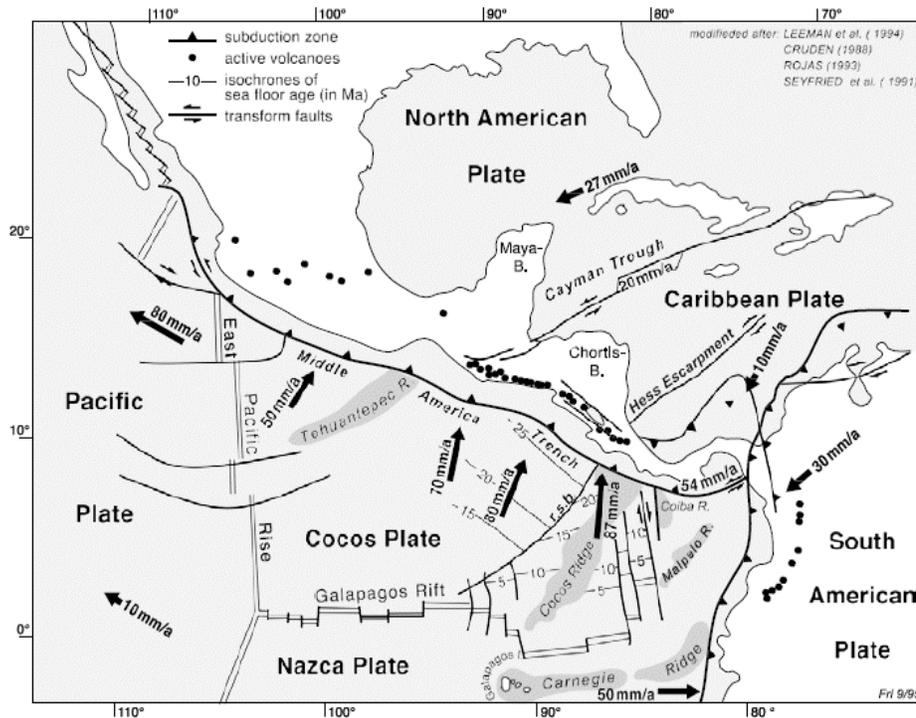


Figura 8: Bosquejo del contexto geotectónico de América Central, se ilustran las velocidades promedio de deriva de las placas según su posición (Frischbutter, 2002).

Dentro de los rasgos geotectónicos más característicos de la región está la cadena volcánica del Cuaternario, con 1,100 km de longitud, que se extiende desde la frontera México - Guatemala, hasta la parte central de Costa Rica, está constituida por 40 volcanes mayores, lo que representa una gran densidad de volcanes por unidad de distancia, con un “gap” de 175 km entre el volcán Turrialba en Costa Rica, hasta el volcán Barú en Panamá (Bundschuh & Alvarado, 2007).

7.2.3. Geología regional de Nicaragua.

Nicaragua está dividida en 5 provincias geológicas estructurales (ver Figura 9), diferenciadas por su geomorfología, su estratigrafía, geología tectónica, geología histórica y geología económica (depósitos minerales metálicos y no metálicos). Hodgson, G; 1976, clasificó las provincias geológicas de Nicaragua como:

- Provincias de la Costa del Pacifico.
- Provincia de la Depresión o Graben de Nicaragua.
- Provincia Central.
- Provincia del Norte.
- Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica.



Figura 9: Hodgson G., 1997. Mapa de provincias Geológicas Estructurales de Nicaragua.

Provincia Geológica de Las Planicies de la Costa del Pacifico (Hodgson G. 2002).

Esta provincia incluye la cuenca Sandino, se localiza en el margen pacifico de Nicaragua, en la parte occidental de la placa Caribe en el área de antearco del pacifico y se extiende costa adentro hasta el graben, donde se localiza el arco volcánico activo. Se destacan dentro de esta provincia 6 formaciones sedimentarias: (Rivas, Brito, Masachapa, El Fraile, El Salto, Sapoa) y las formaciones volcánicas Las Sierras y Tamarindo.

Provincia Geológica de La Depresión de Nicaragua.

Esta Provincia se extiende desde el Golfo de Fonseca hasta el extremo sureste de Nicaragua. Contiene la Cadena Volcánica Cuaternaria Nicaragüense, los lagos de Nicaragua y la Depresión o Graben Nicaragüense.

La Depresión de Nicaragua es el principal rasgo de la actividad tectónica Cuaternaria de América Central, consiste en un medio graben amplio y superficial, con dirección noroeste,

entre dos sistemas de fallas normales paralelos (McBirney y Williams, 1965). La distribución de los focos volcánicos a lo largo de la Depresión de Nicaragua y de las fracturas norte-sur muestran de manera evidente, la estrecha relación que existe entre la tectónica y la localización del volcanismo en la zona marginal del Pacífico de América Central (Dengo G., et al, 1970).

El origen de la Depresión se atribuye a esfuerzos tensionales producidos en el Pleistoceno ocasionados por la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe, esto también dio lugar a la formación de la Cadena Volcánica Activa del Cuaternario cuando la actividad volcánica emigró gradualmente en dirección de la Fosa Mesoamericana (Kuang, 1971; Weinberg, 1990).

La geología que caracteriza la provincia son depósitos aluvionales y piroclásticos que están rellenando la depresión formando un espesor aproximado de 2,000 m (Hodgson, 2000). Los depósitos piroclásticos se han agrupado en Grupo Las Sierras y Grupo Managua, cada uno con su subdivisión (Kuang, 1971).

Provincia Geológica Central de Nicaragua (Hodgson G. 2002).

En 1965, McBirney et al, en el estudio de la Historia volcánica de Nicaragua, subdividió las rocas volcánicas de la Región Central en dos grandes grupos y un tercer grupo inferido subyacente, los dos superiores El Coyol y El Matagalpa fueron diferenciados uno del otro por la composición litológica y la geomorfológica (el Coyol con un relieve en mesas y mesetas escalonadas y el Matagalpa con relieves de cerros irregulares u ondulados, de topografía suave, rocas buzantes y deformadas), señalando que estas dos secuencias de rocas tienen grandes extensiones, en todo el área Central - NE de Nicaragua. Las rocas de estos grupos han sido descritas como del Terciario medio Superior.

Posteriormente en 1982, el grupo Matagalpa fue subdividido por Hodgson, en dos secuencia de rocas, crono-litoestratigraficos, se mantuvo el del grupo Matagalpa y se introdujeron el término del Pre-Matagalpa, dentro de este se estableció un nuevo grupo correspondiente al grupo Rio Saiz (la geomorfología del grupo comprende terrenos de altas montañas, severamente deformados, zonas de fuerte flexiones y arqueadas, relieves de fuertes declives, muy fracturada dando la característica de bloques fallados, cuyas disposiciones de los bloques aparentan reflejar pliegues).

En el E de la provincia Central y W de los llanos de la Costa Atlántica, gran parte de las montañas se encuentran incluidas en este grupo. Las rocas de este grupo han sido descritas como Terciario-Cretácico.

Provincia geológica del Norte (Rivera, 2004).

Geográficamente cubre el departamento de Nueva Segovia así como parte de Jinotega y de la Región Autónoma del Atlántico Norte. Al Este está cubierto por rocas volcánicas del Grupo Matagalpa y sedimentos de la cuenca de La Mosquitia. El margen Oeste está limitado aproximadamente por el Sistema de Fallas de Matiguás siguiendo el lineamiento Noroeste-Sureste de la Cordillera Amerrisque (interpretación de imágenes de radar, 1972). La

estructura comprende rocas metamórficas, rocas sedimentarias plegadas y deformadas, interceptada por rocas plutónicas de la orogénesis laramídica.

La plataforma paleo-mesozoica está atravesada por la continuación hacia el Norte de la falla de Matiguás y la zona de fractura Isabelia por la zona de fractura Murra. El núcleo metamórfico de la Provincia del Norte ocupa los sectores al occidente de la Provincia Central y está constituido por rocas metamórficas paleozoicas (esquistos, filitas, cuarcitas, pizarras) e intrusivos cretácicos-terciarios (granitos, granodioritas, dioritas, monzonita).

Las mesetas volcánicas y las serranías que circundan al núcleo metamórfico están constituidas por rocas sedimentarias cenozoica/mesozoicas (areniscas, conglomerados, lutitas, grauvacas, calizas) y rocas volcánicas terciarias (basaltos, andesitas, ignimbritas, tobas y aglomerados) de los Grupos Coyol y Matagalpa, de edad Mioceno y Oligoceno respectivamente.

Provincia de los llanos de la Costa Atlántica (Rivera, 2004).

La provincia de la Costa Atlántica se encuentra limitada al Sur y Noroeste por la Provincia Volcánica Terciaria, al Oeste parcialmente por la plataforma paleozoica y mesozoica, al Este por el mar Caribe. En la cuenca de La Mosquitia se localiza en esta Provincia, fueron depositados más de 5,000 m de sedimentos de edad terciaria, provenientes de la plataforma y de áreas volcánicas antiguas. Es una de las más grandes cuencas de América Central.

Las estructuras de fallas siguen rumbo Noreste-Suroeste y son aproximadamente paralelas al eje del anticlinal del río Coco. La Costa Atlántica está cubierta por una franja de sedimentos jóvenes del Mioceno Pleistoceno que recubre parcialmente las formaciones volcánicas terciarias y sedimentarias del Cretácico y Terciario inferior, constituidas por areniscas, lutitas y calizas que afloran en la región central. Se supone que el espesor de los sedimentos alcance algunas centenas de metros. Las capas superficiales del litoral están constituidas principalmente por arcillas y arena fina.

7.2.3. Volcanismo Cuaternario En Nicaragua.

El frente volcánico Nicaragüense corresponde a cerca de 40 volcanes con actividad Cuaternaria que se encuentran dentro de la Depresión de Nicaragua y son parte del Frente volcánico de América Central (FVAC). El frente volcánico se ha venido desplazando hacia el Suroeste desde el Terciario medio (Ehrenborg 1996) hasta llegar a su posición actual hace 8 Ma (Funk et al. 2009). Los centros eruptivos del FVAC están estrechamente espaciados (un promedio de 25 km entre cráteres centrales) y son generalmente pequeños (<30 km³). Debido a una segmentación de 20 km del arco, el frente volcánico Nicaragüense puede ser dividido en dos diferentes segmentos.

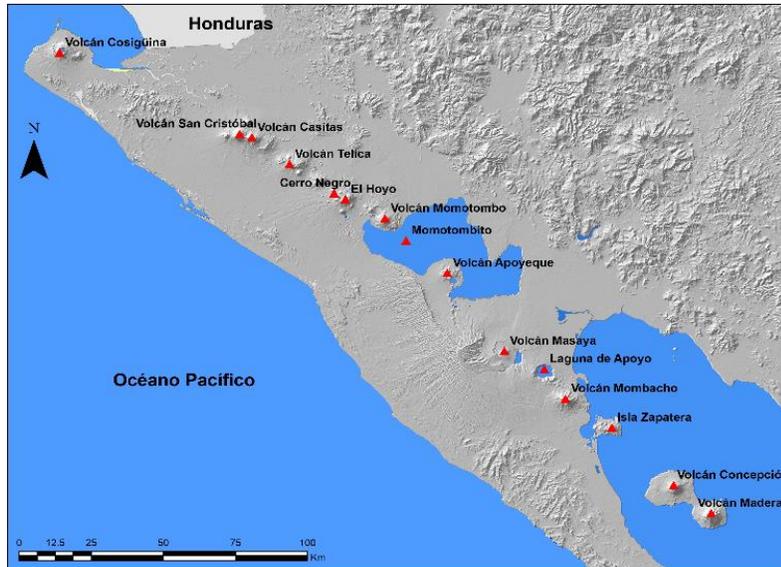


Figura 10: Frente Volcánico de Nicaragua (FVN).

El primero abarca 175 km y se extiende desde el Golfo de Fonseca hasta el volcán Momotombito, en el lago de Managua; y el segundo se extiende por 215 km desde Managua hasta el volcán Madera (ver Figura 10). La zona de desplazamiento entre estos dos segmentos está marcada por el lineamiento Nejapa - Miraflores de rumbo NS, el cual se extiende hacia el Sur desde la península de Chiltepe hasta el flanco Norte del edificio volcánico de Las Sierras.

Las cumbres de los volcanes Nicaragüenses son de menor altitud que los volcanes de otras áreas del FVAC, lo que probablemente se relaciona a la posición del frente volcánico a lo largo de la depresión Nicaragüense.

Los volcanes Cuaternarios presentan diferencias geoquímicas y petrológicas en función del tipo de edificio volcánico, siendo posible agruparlos dentro de tres tipos: volcanes escudos, estratovolcanes y complejos ignimbríticos (van Wyk de Vries., 1993).

Escudos – volcánicos: Son generalmente ubicados en proximidad de zonas de fallas transversales a la cordillera volcánica, siendo ellos mismos afectados por importantes fallas. Estos incluyen varios conos y cráteres, a menudo esparcidos en un radio de unos 5 - 15 km desde el centro principal. Su elevación es generalmente modesta y sus laderas son suavemente inclinadas (15 - 20°). Se componen principalmente por lavas en forma de amplias y delgadas coladas que se extienden hasta distancias de 15 km desde el centro del complejo, mientras que los productos piroclásticos son esencialmente limitados a la zona alrededor de los cráteres (van Wyk de Vries., 1993).

Estrato – volcanes: Normalmente alejados de importantes zonas de falla y limitadamente afectados por fallas de origen tectónico. Las deformaciones de estos edificios son en su mayoría atribuibles a fenómenos de inestabilidad gravitatoria. Presentan en general un edificio principal y pocos conos secundarios. Su elevación es mayor que en los escudos volcánicos, alcanzando hasta los 1,700 m.s.n.m. Estos volcanes presentan, en general, una parte superior del cono principalmente compuesta por depósitos piroclásticos y caracterizada por inclinaciones de hasta 30°, y una parte inferior con abanicos de coladas lávicas, depósitos de escombros y de lahar, intercalados con delgadas capas de piroclastos (van Wyk de Vries., 1993).

Complejos Ignimbríticos: Relacionados con la evolución de cámaras magmáticas intra - crustales que generan magmas muy diferenciados y erupciones fuertemente explosivas. Se presentan en forma de amplios escudos compuestos por productos piroclásticos (pómez e ignimbritas) y subordinadamente lávicos, de composición variable entre basáltica y dacítica. En estos edificios es frecuente la presencia de amplias calderas (van Wyk de Vries., 1993).

8. Metodología.

8.1. Recopilación de Información.

Se compiló la información existente como; documentos escritos (artículos científicos, estudios, informes, tesis u otros trabajos), mapas impresos (formato digital) e imágenes que abarcan el área de estudio (fotografías aéreas e imagen satelitales). Luego de obtener la información preliminar, se procedió a la elaboración, diseño y edición de mapas, diagramas y herramientas necesarias para el análisis completo de la información existente.

El acceso a la documentación permitió identificar aspectos geológicos regionales y geoquímicos (muestreos históricos). Tomando de referencia la información de 1) Plan Maestro de Nicaragua, 2001; 2). Estudio de pre-factibilidad del Hoyo - San Jacinto, Olade 1981; 3) Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Nicaragua, 1981; 4). Proyecto Geotermoeléctrico Monte Galán 105 MW, 1993; 5) Estudio Geológico y Reconocimiento de la Amenaza Geológica en el Área de León, La Paz Centro y Malpaisillo, Nicaragua.

8.2. Etapa de Procesamiento e Interpretación de Datos Obtenidos y Generación de Resultados.

Geo procesamiento: Mediante la interpretación que se realizó con las ortofoto del área de estudio, escala 1:10 000, editadas por INETER en el año 1996, imágenes de satélite (BaseMap , Arc Gis 10.3) escala 1: 10,000 e imágenes Lansat 8 adquiridas el 3 de mayo del 2018, con una resolución de 30 metros. Se generó información de los elementos de interés como: estructuras geológicas y contactos litológicos. Para ello, se tomaron en cuenta las siguientes características: tono fotográfico, textura, forma y tamaño de los elementos, topografía, lineamientos y el drenaje.

Usando como base la información altimétrica y mediante el software Global Mapper v17, se realizó una conexión con el STRM Worldwide elevation data (1 ar-sec Resolution, STRM Plus v.3) y se procedió a descargar un archivo vectorial (XYZ simple ASCII_text file), el cual contiene puntos de elevación para el área en estudio. Posterior se realizó el geoprocésamiento de la información para lo cual se usó el software ArcGis10.3, generando los siguientes mapas: Mapa de curvas de nivel a intervalos de 20 metros, se obtuvo un mapa topográfico.

Generación de modelo de anomalía térmica superficial del área, se empleó la herramienta de interpolación de datos (Ver mapa de anomalía térmica de geotermómetros y pozos de gradientes). Durante el proceso de análisis e interpretación de registros térmicos de pozos de gradientes existentes en el área, se procedió a realizar una estimación usando una herramienta de interpolación espacial de los datos conocidos para estimar valores

desconocidos en otros puntos del área de interés. Se utilizó la base de datos histórica de muestreo en el área Momotombo y sus alrededores proporcionada por el Laboratorio de Geoquímica de la Empresa Nicaragüense de Electricidad - ENEL; así como los datos de registro de pozos de gradiente perforados por CALIFORNIA ENERGY (1972) y OLADE 1982, los que se encuentran en la base de datos del PMG de Nicaragua, 2001.

La herramienta de interpolación seleccionada fue la hipótesis de la variable regionalizada (kriging), el cual es un método geoestadístico, que se fundamenta en las variables regionalizadas y auto correlacionadas en el espacio. Este auto correlación se determina a partir de la elaboración de semivariogramas con los cuales se logra definir el modelo de mejor ajuste, para proceder luego a la interpolación y en el cual se define la distancia máxima o “rango” en donde finaliza la autocorrelación.

Con el uso de este método de interpolación queremos predecir valores desconocidos de los datos observados (Temperatura) de los sitios analizados. Se esperan generar resultados coherentes con la dinámica de la variable a interpolar, respetando en la medida de lo posible, la información real suministrada; es por esta razón que este método de interpolación fue empleado. Como resultado obtenido al usar la herramienta de interpolación Kriging, se obtuvieron mapas de temperatura, elementos mayores y elementos trazas.

La información geoquímica recopilada se procesó, analizó y clasificó para obtener una base de datos en hoja de cálculo. Dicha información se utilizó como input para para la elaboración de gráficas de estado, origen de los fluidos (agua y gases), gráficas de estado de equilibrio químico del fluido y de las interacciones fluido – roca huésped; el cálculo de geotermómetros de estimación de temperaturas del posible yacimiento; para la elaboración de plantas y perfiles de distribución de los elementos geoquímicos presentes en la zona; finalmente, para la elaboración de una propuesta de modelo que nos permita conocer más a detalle las características del posible yacimiento.

Para lograr estas tareas se utilizó software de procesamiento de datos químicos como Aquachem, SpCalc; otro software de procesamiento de gráficas como Grapher y Surfer, y software para procesamiento de datos geográficos como ArcGIS 10.3.

9. Análisis de datos.

9.1. Geología Local.

El área del Volcán El Hoyo – Monte Galán, forma parte de los complejos volcánicos El Hoyo y Momotombo, los cuales forman parte de la cordillera volcánica cuaternaria de los Marrabios, al interior del sector central de la provincia geológica del Graben de Nicaragua.

En general el área está constituida por una serie de estructuras entre las que se distinguen (i) estructuras de colapso / calderas volcánicas, (ii) algunos conos menores, (iii) Complejo Volcánico El Hoyo – Las Pilas y (iv) una estrecha planicie que cruza toda la cordillera volcánica en sentido N-S. Ver figura 40.

(i) Estructuras de colapso / calderas volcánicas

- Escudo ignimbrítico de Malpaisillo.

Está representada por una depresión semicircular distinguible al Este de la ciudad de Malpaisillo, presenta un diámetro de unos 20-25 km, es lo que quedó de la voluminosa caldera Pleistocena. Hoy está expuesta por la erosión, hacia el este está siendo rellenada por depósitos fluviales y deluviales. Limita con una estructura vecina al Sur del pueblo La Fuente y es denominada Caldera San Fernando (De Vries, 1993).

La actividad eruptiva se desarrolló en dos etapas principales. Entre las dos, se produjo un periodo de calma volcánica que puede documentarse por la evolución de capa de suelo fértil que testifica el clima húmedo tropical.

Productos Piroclásticos de fase inferior (Caldera Malpaisillo 1). Depósitos de fase inferior afloran solamente en unas secciones naturales al Este y Sureste de Malpaisillo, en su mayoría son cubiertos por depósitos más jóvenes. Tienen composición dacítica de una afinidad alcalina.

La secuencia superior de ignimbritas denominada Caldera Malpaisillo 2; aflora en el área extensa aledaña al Caldera, ante todo, en el Este. Al rumbo opuesto la pómez está cubierta por flujos lávicos. Suelo fósil del color rojizo separa los dos horizontes de pómez, que puede observarse en las secciones al borde de la carretera.

En detalle, sobre de la base de Caldera Malpaisillo 2: se desarrolló una capa de 0,3-1 m de espesor, de ceniza blanca-gris, en forma de ondas piroclásticas, sobre la cuál yace la capa basal de ignimbritas. Más arriba, el flujo posee una gradación opuesta de clastos de pómez y gradación normal de líticos (diámetro 5-10, hasta 20 cms). Pómez tiene color blanco, siempre aparece bien soldada, con tamaño del grano variable (1-3-10 cms). Se observan las unidades delgadas de pómez agotada de finos y capas de ondas intercalantes (ash-cloud surges), así como los líticos de rocas andesíticas.

Flujos de pómez Malpaisillo, representa sólo un residuo erosional de antigua acumulación de pómez de erupciones caldéricas, condicionada por una ascensión del magma ácido. Es interesante que ningunas erupciones de este tipo se hayan observado en los tiempos históricos/recientes. (De Vries, 1993); cree que una parte del escudo de pómez de Malpaisillo fue creado por la erupción más joven, procedente de la caldera Monte Galán. Sin embargo, no existen las pruebas para esta afirmación. Desde el punto de vista

estratigráfico, la Toba de Malpaisillo, puede ser correlacionada con la Formación Las Sierras y la formación volcánica de Las Sierras-Chiltepe que se extiende más al S, en la Zona de Managua.

- **Caldera de San Juan.**

En campo, los productos de la erupción precedente al colapso de la Caldera de San Juan, no es posible reconocerlos, pero se puede resaltar la existencia de una formación piroclástica que podría ser relacionada con la actividad pre caldera de S. Los únicos datos observados en campo provienen de un escarpe de falla ubicado al norte del Cerro Montoso, siendo este escape el único trazo morfológico evidente de la caldera. En el sitio aflora una densa colada de lava de composición riolítica, de la cual se ha realizado dataciones a las rocas aflorantes y su edad ha sido establecida en 510, 000 años (Olade, 1982).

- **Caldera de Galán**

La caldera Monte Galán está situada en los límites orientales del área estudiada. Es una depresión que posee un diámetro de 4 km, con forma irregular, está siendo afectada por sistemas de fallas con dirección preferencial NS y NE-SO, está comprendida en las zonas aledañas al Volcán Momotombo, Cerro Colorado y Cerro Montoso, los cuales se sitúan en bordes de caldera (Martínez & Viramonte, 1971).

El colapso gravitacional que ha originado esta depresión calderica esta probablemente relacionado con un evento único, ha tenido lugar en consecuencia a una erupción explosiva cuyos depósitos son reconocibles en la formación denominada pómez de Galán. Esta formación está constituida por niveles de pómez de caída, intercalados por surges piroclásticos a la base y por espesos depósitos de coladas piroclásticas al techo (Olade, 1982).

En las porciones planas del fondo de la Caldera de Galán, se han observado depósitos lacustres. En las paredes internas de la caldera se identificó una espesa capa de lavas andesíticas y subordinadamente andesítico-basálticas, sobre la que se desarrolla una secuencia de productos piroclásticos (tobas litoclásticas y lavas con abundantes inclusiones líticas, escorias y delgados niveles de pómez) y detríticos, que termina con una amplia cubierta de material lávico retrabajado, esta capa se extiende ampliamente en la suave ladera al N de la caldera, cubriendo también la vieja estructura calderica de San Juan (DAL et al. 1995).

La capa lávica basal que aflora al interior de la caldera parece ser parte de una única unidad que constituye la base sobre la cual creció sucesivamente el Volcán Momotombo, y aflora también en la Loma La Guatusa, al lado opuesto del volcán. La secuencia de productos piroclásticos sobreyacentes es de difícil atribución y necesita estudios detallados para aclarar las relaciones y la naturaleza evolutiva de las estructuras caldericas de Galán y de San Juan (Bice 1977).

(ii) Edificios menores en la zona de la Caldera de Galán.

El conjunto de aparatos volcánicos generalmente de modestas dimensiones, comprendidos entre los complejos de Momotombo – Caldera de Galán y el del Hoyo – Las Pilas, están representados por dos alineamientos, también comprende algunos centros que sobreyacen en el borde occidental de la Caldera de Galán.

Cerro Montoso: es un cono constituido esencialmente por lavas andesíticas a andesita-basáltica, este edificio crecido sobre el borde occidental de la Caldera de Galán. Este se extiende con algunas coladas de modesta extensión tanto al interior y al exterior de la caldera y presenta una cúpula terminal con estructura aparentemente cómica. La naturaleza de los productos del Cerro Montoso pueden explicarse con un rejuvenecimiento del sistema eruptivo post Caldera por fracturas relacionadas a la tectónica transversal (Olade, 1982).

Cerro Colorado: es un edificio volcánico de modestas dimensiones que ocupa parte de la planicie entre la Caldera de Galán y el Volcán el Hoyo. Este es principalmente constituido por escorias y tobas líticas, pero en su flanco meridional se aprecia también una colada lávica. La composición de estos productos es variable entre andesítica y andesítico-basáltica. Todo el edificio del Cerro Colorado es profundamente erosionado y deformado por fallas de rumbo N-S.

Al O de la Caldera de Galán existe un pequeño cono de escorias erosionado y cortado por fallas, conocido como Loma La Chistata. Este yace sobre depósitos cineríticos y pomáceos con características similares a la Toba de Malpaisillo.

Cráter de explosión freatomagmática Cerro el Coyotepe y los restos de dos pequeños aparatos probablemente también de origen freatomagmático, localizados al E y O de la Loma La Chistata, estos centros se encuentran afectados por erosión por lo que se puede concluir que son más antiguos que las estructuras volcánicas descritas anteriormente.

Lineamiento Laguna de Asososca – Los Tacanistes.

Este alineamiento está conformado por cinco aparatos volcánicos menores los cuales son:

- La Loma de Santa Casimira
- La Laguna de Asososca.
- Conos de Escorias Las Tacanistes.
- La Loma del Tránsito.

Los aparatos al exterior a la zona axial de la cordillera volcánica son cráteres de explosión que resultan de la interacción magma – agua (El Tránsito, Laguna de Asososca), hace parcialmente excepción la Loma de Santa Casimira, cuya actividad inició con caracteres freatomagmático y la formación de un cráter de explosión de 500 metros de diámetro y terminó con la emisión de una colada de lava y la formación de un pequeño cono de escorias en el interior del cráter.

Cronológicamente todos estos aparatos aparecen posteriormente a la emisión de pómez de Galán (estos productos afloran bajo los productos piroclásticos básicos de las paredes de la Laguna de Asososca, pero precedentes a las coladas lávicas más recientes del complejo del Hoyo – Las Pilas.

(iii) Complejo del Volcán El Hoyo – Las Pilas.

Abarca aproximadamente 50 km² e incluye una serie de geoformas correspondientes con diferentes eventos de la evolución volcánica de la región. Se distinguieron las siguientes estructuras:

- **Volcán El Hoyo.**

El volcán presenta una morfología general de escudo alargado en sentido NE-SW, que se eleva hasta la altura máxima de 1,088 m.s.n.m. El edificio principal está compuesto por dos amplios conos parcialmente sobrepuestos y alineados en sentido NE-SW, respectivamente conocidos como Cerro El Picacho y Volcán El Hoyo. La cima del volcán es bastante compleja, está caracterizada por un doble recinto cratérico de diámetro externo de aproximadamente 500 m; a lo largo de su borde meridional está presente un Pit cráter, con una profundidad aproximada de 100 metros, por este rasgo es que el volcán se le asigna su nombre.

El área de la cumbre del volcán El Hoyo presenta una intensa actividad fumarólica que se desarrolla a lo largo de un sistema de fallas y fracturas con dirección NW-SSE. Relacionada a esta actividad está también una fractura larga de aproximadamente un km, la que se originó en 1954, por la cual se produjo una erupción de grandes cantidades de vapor y cenizas.

Asociado con este volcán se encuentra hacia el sureste un campo de coladas de lava que presenta una superficie poco erosionada de 3 km de longitud, con relieve irregular. Su espesor es de unos 40 m, abarca un área de 7,6 km² y posee un volumen estimado de 0,3 km³. De acuerdo con Van Wyk de Vries (1993), las características de estas coladas son su gran extensión y los túneles de lava y superficies pahoehoe.

- **Volcán Las Pilas.**

Está situado a unos dos km al W - NW del volcán El Hoyo, el volcán Las Pilas ha emitido las coladas más recientes del complejo. Consiste de una estructura de forma cónica, de 1,001 m de elevación, que se eleva hasta 300 m sobre la superficie circundante; posee una base casi circular de 1,5 km de diámetro y presenta en la cima una estructura de colapso, tiene en su interior un cráter de 250 m de diámetro y 20 m de profundidad.

El campo de coladas de este volcán corresponde con una superficie irregular con morfología que denota claramente un flujo hacia el norte, totalmente cubierto de vegetación. Por el grado de desarrollo de la vegetación, se interpreta la existencia de 3 flujos con un espesor máximo de 60 m, que cubren un área de 16,4 km² y ocupan un volumen estimado de 0,96 km³ (Badilla et al, 2000).

- **Volcán Cerro Ojo de Agua.**

Incluye tanto al volcán Ojo de Agua (813 m.s.n.m.), como a un pequeño cono que se ubica hacia el oeste (720 m de elevación). El primero posee 600 m de diámetro en su base y un cráter de 200 m de diámetro y 80 m de profundidad. El segundo tiene un cráter de 100 m de diámetro desportillado hacia el NE. Ambos sobresalen del terreno circundante con un máximo de 100 m, presentan una pendiente uniforme de 20° y no poseen vegetación. Se interpretan como conos parásitos del volcán El Hoyo (Badilla et al, 2000).

- **El Volcán El Picacho.**

Es un volcán cuyas últimas lavas emitidas, aparecen comparativamente más viscosas de todas las lavas eruptadas por los centros más recientes del complejo El Hoyo – Las Pilas. La actividad del Picacho terminó con un colapso formando una caldera con un diámetro

aproximado de 2 km, de la cual actualmente es visible solo la porción nor-oriental, siendo el resto de la estructura cubierta por lavas recientes del Volcán El Hoyo (Olade 1982). Esta caldera se encuentra rodeada por una serie de coladas de lava afectadas por fallas N-S y desarrolladas posiblemente en el antiguo volcán que dio origen a esta estructura (Badilla et al, 2000).

- **Cerro Asososca.**

Edificio volcánico con laderas de 22° de inclinación y una altitud de 818 m. Se eleva unos 620 m sobre el nivel del terreno circundante y posee una base circular de 2,4 km. Hacia el sur, se puede observar un abanico formado por un deslizamiento o flujo de escombros originado desde su cima. En el flanco NW existe una estructura posiblemente más antigua debido a un mayor desarrollo del patrón de drenaje (Badilla et al, 2000).

(iv) una estrecha planicie que cruza toda la cordillera volcánica en sentido N-S.

- **Planicies Aluvionales y Lacustres; Abanicos Aluvionales; Coluvial.**

Los materiales de esta unidad forman parte de los depósitos más recientes, producidos por la acción geodinámica externa (meteorización, erosión, transporte y deposición) sobre los productos volcánicos en zonas topográficamente más altas. Cubre un área total de aproximadamente 97 km², presentado espesores variables.

9.1.2. Geología estructural.

Marco estructural regional de Nicaragua.

A continuación se describen las fases o etapas de deformación propuestas por McBirney y William, 1965 y Dengo 1970; para Nicaragua.

La depresión tectónica (Graben) de Nicaragua, se desarrolló en tiempo Mioceno-Plioceno, se caracteriza por hundimiento de la corteza debido a la tensión local creada por compresión regional entre placas Cocos y Caribe.

Propusieron que una sola estructura (falla geológica), se empiezan a formar en la parte sur, en Costa Rica, y más tarde se desarrolló hacia el noroeste y dando origen a un graben. El movimiento de deslizamiento lateral derecho a lo largo del arco volcánico no podría explicarse por esta teoría.

Weinberg (1992), propuso el desarrollo de neotectónico de la región noroccidental de Nicaragua, es su teoría se exponen 3 fases de deformación, cada uno estrechamente relacionado con eventos volcánicos (Ver imagen 11), dando un seguimiento y complementando la propuesta previa de McBirney y Williams (1965).

La primera fase de deformación se caracteriza por un acortamiento NE, que produjo el pliegue NW de las planicies costeras del Pacífico. Este acortamiento fue acompañado por levantamiento y desarrollado entre el Mioceno tardío y el Plioceno Temprano. Estos eventos han sido relacionados con el desprendimiento de la placa de Cocos de la placa de Farallon alrededor de 23 Ma (Mann et al, 2007).

La formación de la depresión Nicaragua, se encuentra en la segunda fase de deformación que consistía en extensión NE-SW, debido a la retirada del bloque Chortis al NE y el

retroceso hacia atrás y la inclinación de la placa subducida. Como consecuencia el arco volcánico emigró hacia el mar adentro desde el arco volcánico anterior (Arco volcánico Coyol) a su ubicación actual. Esta fase duró hasta el Pleistoceno medio.

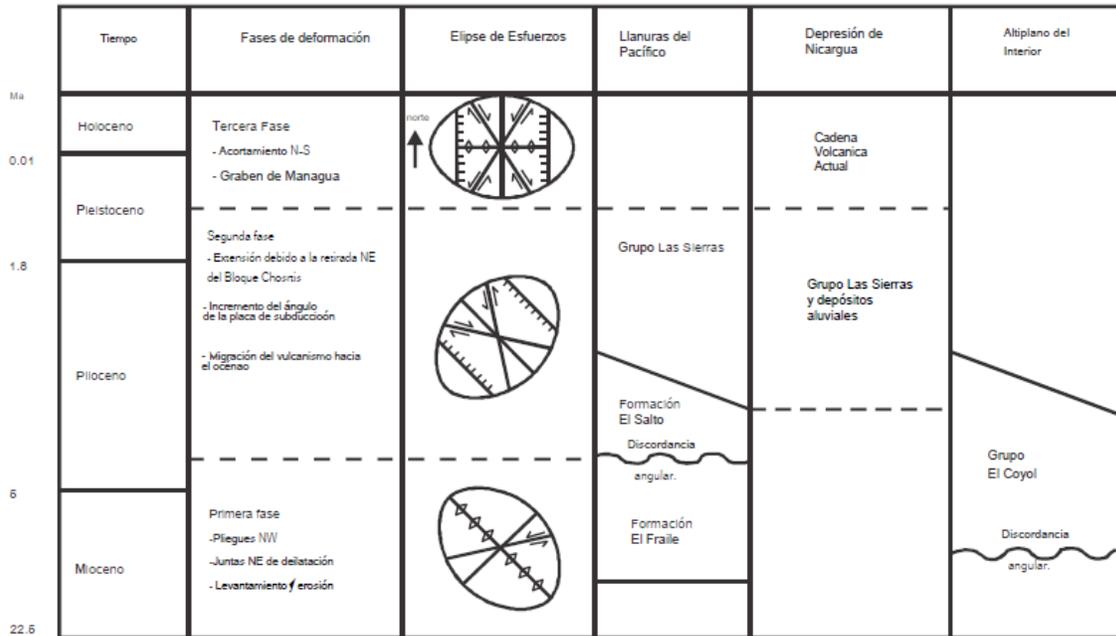


Figura 11: Estratigrafía y evolución tectónica de la parte occidental de Nicaragua (Weinberg, 1992).

Finalmente, se propone que para ser inducida una segmentación de la placa subducida de acuerdo con Stoiber y Carr (1973), se produce una fase de acortamiento N-S. Esta fase se supone que es todavía activa. Una teoría propuso que la tensión regional en la zona de falla de desgarre (deslizamiento), puede ser reorientado por la carga volcánica que causa la extensión. La teoría sugiere que la carga volcánica incluso podría influir en la formación de cuencas importantes volcáno-tectónicas y producir el desarrollo de estructuras pull-apart, el establecimiento de la Depresión de Nicaragua.

Marco estructural del área El Hoyo – Monte Galán.

Con base en los resultados de la interpretación de imágenes Landsat 8 empleando la combinación de bandas 432, información geológica estructural recopilada, mapas topográficos, análisis de fotografías aéreas, ortofotomapas; se logró identificar estructuras reportadas e inferir la existencia de nuevas estructuras, las que están ampliamente distribuidas en el área.

Se observa que el número de fallas y lineamientos es amplio, sin embargo, las estructuras geológicas (estructuras volcánicas, fallas y lineamientos) presentes en el Mapa Estructural (Ver Figura 39), son las más representativas. A continuación se presentan los patrones de fallamiento identificados: NE – SW, NW – SE, N – S.

Como resultado del análisis hecho y soportado con la información bibliográfica consultada, se observa que la cinemática de las estructuras presentes en el área responden a un régimen estructural cuyo esfuerzo horizontal principal tiene una orientación preferencial N-S, que genera tres patrones de fracturamiento (N-S, NE-SO y NO-SE (Figura 12). Menos evidente y posiblemente precedente a los anteriores se infiere un cuarto sistema en dirección casi Este-Oeste. Dichos patrones se describen a continuación.

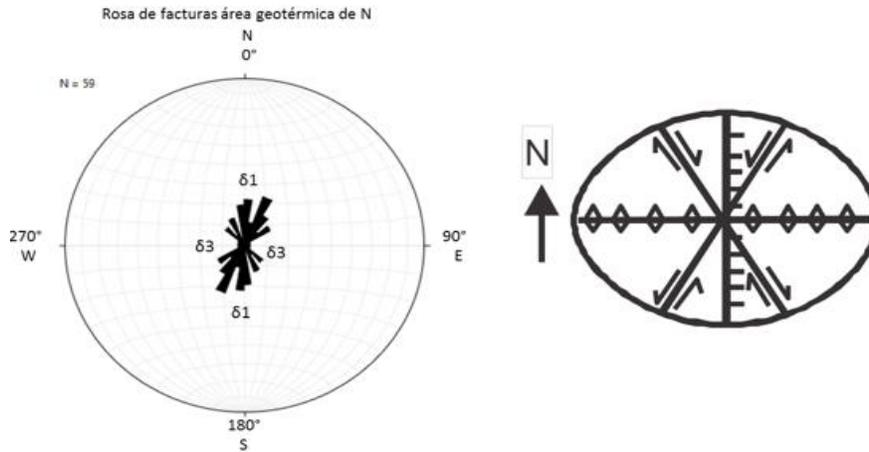


Figura 12: Rosa de fractura y elipse de esfuerzos correspondiente a las fases de deformación en el área termal de Nicaragua.

Sistema de fallas y lineamiento NE – SW.

Estos sistemas de fallas y lineamiento se encuentran localizados en el extremo norte, centro y este de la zona de estudio. Estos afectan principalmente los edificios volcánicos Caldera de Galán, Caldera San Juan, Cerro Los Tacaniste y el Cerro El Picacho.

Dentro de este sistema se identificaron fallas y lineamientos fotogeológicos menores, los que mencionan a continuación estructuras interpretadas como fallas están: F2, F5, F11, F12, F19; y estructuras interpretadas como alineamientos: L1, L3, L4, L10, L11, L12, L13, L14, L16, L17, L19, L20, L21, L22, L23, L24, L25, L26, L28, L30, L35, L39, L32, L50, L51. Se puede inferir que este sistema de fallas pertenece a sistemas de tipo “strike-sinestral”.

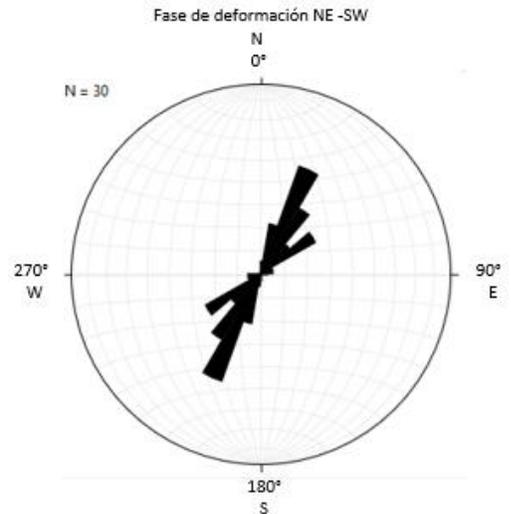


Figura 13: Roseta de fracturas correspondiente al sistema de fallas y lineamientos NE-SW

Sistema de fallas y lineamiento NW – SE.

El sistema de fallas más pronunciado tiene orientación NW – SE y se observa en el borde SW de la planicie de Puerto Momotombo (Falla El Recreo), donde origina una marcada escarpa en los depósitos del Escudo Ignimbrítico de Malpaisillo y delimita una depresión parcialmente ocupada por un brazo del Lago de Managua. Al lado opuesto del lago, en la base de la ladera SW del Volcán Momotombo y de la Caldera de Galán. El conjunto de estas dos estructuras define un amplio graben con orientación NW-SE, generalmente conocido como “Gaben de Puerto Momotombo”.

Un rasgo importante a resaltar es alineamiento de la cadena neovolcánica de Nicaragua con rumbo N63°W (volcanes El Hoyo, Las Pilas y Cerro Negro) y alineamiento con rumbo N54°W de los volcanes Momotombo, Montoso, Los Palomos, Colorado y la Caldera Monte Galán. Ambos ejes presentan una aparente separación lateral siniestral de unos 2 km (Badilla et al, 2000).

Dentro de este sistema se identificaron fallas y lineamientos fotogeológicos menores, los que mencionan a continuación estructuras interpretadas como fallas están: F6, F7, F8, F9, F15, F16, F17, F18, F20; y estructuras interpretadas como lineamientos: L5, L6, L9, L15, L21, L27, L29, L34, L36, L40, L52. Se puede inferir que este sistema de fallas pertenece a sistemas de tipo “strike-dextral”.

Sistema de fallas y lineamiento N – S.

Se localizan principalmente al centro y norte del área de estudio, cortan y desplazan estructuras volcánicas como por ejemplo estructura volcánicas Cerro Colorado, volcanes Cerro Negro y La Mula; Asososca y Ojo de Agua, cerro Cabeza de Vaca y maar Malpaisillo y, volcán El Hoyo y cono Santa Matilde (Badilla et al, 2000).

Dentro de este sistema se identificaron fallas y lineamientos fotogeológicos menores, los que mencionan a continuación estructuras interpretadas como fallas están: F3, F4, F10, F13, F14; y estructuras interpretadas como alineamientos: L2, L1, L18, L38, L31.

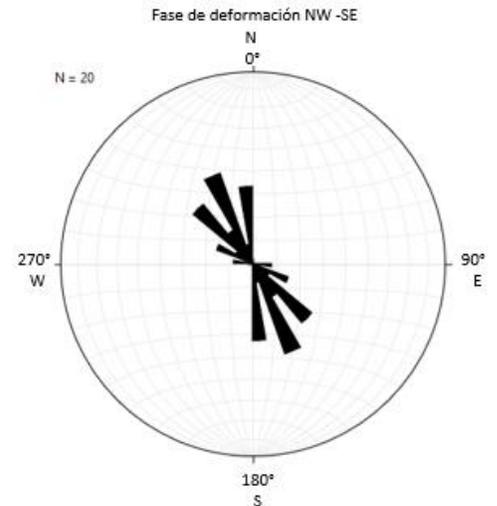


Figura 14: Roseta de fracturas correspondiente al sistema de fallas y lineamientos NW-SE

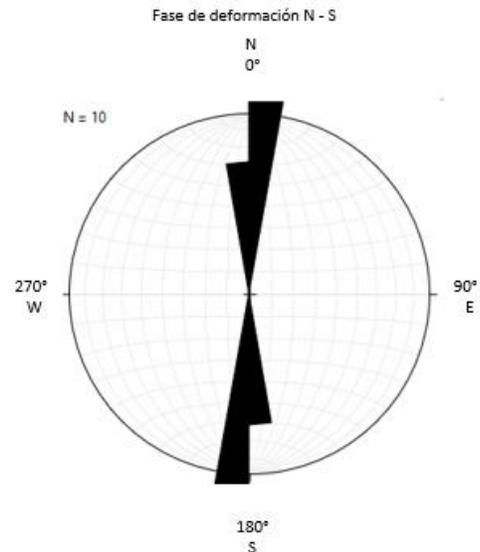


Figura 15: Roseta de fracturas correspondiente a al sistema de fallas y lineamientos N-S

9.1.2. Alteración Hidrotermal.

En el área El Hoyo - Monte Galán, a pesar de que existe una importante anomalía de gradiente térmico, no hay importantes manifestaciones termales en la superficie. La manifestación más significativa es una fuerte fumarola ubicada en la cumbre del Volcán El Hoyo, pero esta parece estar relacionada con procesos magmáticos.

Se reporta la existencia de una serie de manifestaciones termales compuestas por pequeñas fumarolas, suelos calientes y/o alterados, presumiblemente de origen hidrotermal, estas están ubicadas en el área del Cerro Colorado y un manantial termal (48°C), el que está ubicado en correspondencia del Río Obraje, unos 3.5 km al N de Puerto Momotombo.

En la ladera oriental del Cerro El Picacho (al NE del Volcán El Hoyo), está caracterizada por crecimiento anómalo del bosque y ausencia natural de vegetación, lo que podría estar relacionado con algún proceso de origen termal.

Fumarolas del Volcán El Hoyo.

La cumbre del Volcán El Hoyo presenta una importante actividad fumarólica y amplios sectores desprovistos de vegetación, que parecen indicar un gradiente térmico anómalo en la zona. En la porción externa del borde oriental del cráter se concentra la mayoría de la actividad, la que está controlada por una fractura de rumbo NW-SE que cruza toda la cumbre del volcán. La fumarola principal se presenta en correspondencia de una porción abierta de esta fractura, a través de la cual sale un fuerte flujo de vapor y gases con temperatura alrededor de 106°C (OLADE, 1982). En las paredes internas de esta fractura y todo alrededor de la fumarola existe una fuerte alteración hidrotermal y abundante deposición de azufre y sublimados. Esta fumarola es fácilmente visible también desde la planicie al S del volcán.

Algunas fumarolas de intensidad mucho menor presentan pequeñas emisiones de vapor, éstas se encuentran en diferentes puntos de una amplia área con suelos calientes y débil alteración, que ocupa buena parte de la cumbre del volcán. Se han identificado otras manifestaciones termales las que se encuentran fuera de esta estructura volcánica de El Hoyo, estas se ubican en la ladera E de la cumbre y el límite meridional del cráter de El Picacho.

En la base de la ladera E del volcán El Picacho la empresa California Energy Co. (1978) perforó un pozo de gradiente, como resultados de dicha perforación se encontró agua con temperatura de 124.4°C, a una profundidad de 80m. En este mismo pozo ha sido reportada la existencia de una intensa alteración hidrotermal con abundante pirita y cierta alteración debida a arcilificación y deposición de sílice. También ha sido reportada alteración en superficie, en los alrededores del sitio de perforación, (Bice, 1977; California Energy Co., 1978).

Manifestaciones del Cerro Colorado.

En la ladera septentrional del Cerro Colorado se encuentra una zona de alteración hidrotermal alargada paralela a un sistema de fallas NS que forman una estructura de graben. Esta zona tiene una extensión de aproximadamente 1 km de largo por 0.4 km de ancho y ocupa principalmente el borde occidental.

La alteración hidrotermal se caracteriza principalmente por fenómenos de arcilificación y oxidación, en algunos puntos se identifican áreas térmicamente anómalas representadas por suelos calientes y fumarolas con temperaturas medidas de 95°C, asociados con sublimados blancos y amarillentos. Raramente se observan efímeras emanaciones de vapor y se puede apreciar un débil olor a H₂S (sulfuro de hidrógeno). La máxima temperatura registrada ha sido de 99.2°C (PMG, 2001).

Manantial del Río Obraje.

La fuente termal se ubica en la base meridional de la Loma La Chistata. Esta presenta una descarga en el curso inferior del Río Obraje (o Río Aguas Calientes) y se asocia con una amplia zona pantanosa que se extiende hasta el Lago de Managua. La manifestación termal fue descrita por autores anteriores como compuesta por diferentes manantiales distribuidos en la base de la loma, los que probablemente estén asociados con una más amplia zona de filtración hacia la planicie pantanosa adyacente.

La temperatura de los manantiales, ha sido reportada anteriormente por varios autores (Texas Instruments, 1970; ELC-Electroconsult, 1976, OLADE, 1982), las temperaturas varían entre 46 y 48°C. La descarga total ha sido estimada en 4,000 gal/min (Texas Instruments, 1970).

9.1.3. Estratigrafía Geológica propuesta para el área Volcán El Hoyo – Monte Galán.

El área del Volcán El Hoyo - Monte Galán, está geológicamente compuesta de rocas volcánicas cuaternario como parte del basamento de un complejo volcánico joven, las rocas volcánicas están compuestas por productos volcánicos de composición básica – intermedia – acida , dichos productos tienen fuentes de origen diferente debido a que el área está compuesta por diferentes edificios volcánicos como: Caldera de Malpaisillo, Caldera de Galán, Caldera de San Juan, Cerro Colorado, Cerro Montoso, Volcán El Hoyo, Cerro El Picacho, Volcán Las Pilas, Maares Asosca y Malpaisillo, dichos productos de erupción volcánica se encuentran intercalados entre si y suprayaciendo a rocas de origen terciarias las que se pueden correlacionar con formaciones volcanosedimentarias de edad terciaria.

Se recopiló la información existente de perforaciones geotérmicas de los campos Momotombo y San Jacinto El Tizate, posteriormente se hizo una correlación estratigráfica lo que permitió inferir la litología del área geotérmica en estudio.

Litología del Campo Geotérmico Momotombo (DAL, 1995; DAL, 1997; PMG, 2001).

Unidad I: 0 – 250 m.b.n.m. Los productos correspondientes a la actividad volcánica cuaternaria de la Cordillera de los Marrabios, incluyendo al Volcán Momotombo y a los subyacentes edificios de la Loma La Guatusa y de Caldera de Galán, se extienden hasta aproximadamente los 250 m.b.n.m., están compuestos por secuencias de lavas andesítico-basálticas y andesíticas intercaladas con tefra, material epiclástico y tobas (GeothermEx, 2001).

Unidad II: 250 - 850 m.b.n.m. Se encuentra una secuencia principalmente constituida por tobas y tobas retrabajadas, con espesor variable entre 340 y 600 m, las cuales han sido correlacionadas con el Escudo Ignimbrítico de Malpaisillo y la Formación Las Sierras (GeothermEx, 2001).

Unidad III: 850 – 1,500 m.b.n.m. Clásticos arenosos y conglomeráticos, con intercalaciones de lavas andesítico - basálticas y andesitas, los cuales han sido correlacionados con la Formación El Salto, de edad plio-pleistocénica (GeothermEx, 2001).

Unidad IV: 1,500 – 1,700 m.b.n.m. Tobas heterogéneas y tobas cineríticas finas, intercaladas con lavas andesítico-basálticas, andesíticas, andesítico-dacíticas y una secuencia de sedimentos vulcanoclásticos (lutitas, areniscas y brechas) con escasas intercalaciones de tobas finas y de lavas. Esta unidad ha sido correlacionada con la Formación Coyol superior, del Plioceno (GeothermEx, 2001).

Unidad V: 1,700 – 2,500 m.b.n.m. Tobas finas masivas (ignimbritas), con intercalaciones de sedimentos vulcanoclásticos arenosos y lutíticos. Sus características son similares al Grupo Tamarindo y a la porción superior del Grupo Coyol Inferior, la edad de estas unidades ha sido asignada al Mioceno. Los pozos más profundos superaron también esta formación ignimbrítica, encontrando a profundidades mayores de 2,000 m.b.n.m secuencias sedimentarias constituidas por areniscas, lutitas fosilíferas y tufitas que han sido correlacionadas con las Formaciones El Fraile y Masachapa de edad Mioceno Inferior y Medio (GeothermEx, 2001) Ver figura 16.

Litología del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, (DAL, 1997; Ostapenko, 1998; PMG, 2001).

Unidad I: 0 – 300 m.b.n.m. La unidad es compuesta por depósitos volcánicos holocénicos. Incluye andesitas, basaltos y tobas de composición similar, así como sedimentos aluviales que rellenan la Depresión San Jacinto. Su espesor varía entre los 300 m en la zona del pozo SJ2, y unos 100 m en la zona de El Tizate (GeothermEx, 2001).

Unidad II: 300 – 700 m.b.n.m. Esta unidad está compuesta de lavas de composición andesítica y andesita-basáltica, con intercalaciones de tobas y escorias. Tiene un espesor variable entre los 400 m en la zona de San Jacinto y 300 m en la zona de El Tizate. Esta unidad fue atribuida a las formaciones más viejas de la cordillera volcánica de los Marrabios, de edad pleistocénica (GeothermEx, 2001).

Unidad 3: 700 – 1,300 m.b.n.m. Es una formación muy heterogénea, que presenta significativas variaciones de espesor y composición. En la zona meridional (pozos SJ1-1 y SJ2-1), se compone por secuencias monótonas de material volcánico retrabajado y caótico (brechas, conglomerados, bloques lávicos), con intercalaciones de lavas andesíticas o andesito-basálticas, mientras que en los pozos de El Tizate, resulta principalmente compuesta por espesas secuencias de lavas andesíticas masivas. El espesor varía alrededor de 500-600 m, de edad plioceno – mioceno temprano correlacionarse con las formaciones volcánicas terciarias que afloran más al N, en la zona de la Mina El Limón Grupo Coyol (GeothermEx, 2001).

Unidad 4: 1,300 – 2,500 m.b.n.m. Se caracteriza por una secuencia volcánico-clástica de lutitas y areniscas rojas, conglomerados y brechas, variadamente intercalada con productos volcánicos primarios (lavas y tobas). En la zona de El Tizate, debajo de los 1,700 m abundan las lavas y en el pozo (SJ5-1), fueron encontradas areniscas finas grises, que pueden inclusive representar el tope de una unidad subyacente. La edad de esta unidad es considerada abarcar el período entre el Plioceno y el Mioceno superior (GeothermEx, 2001).

Cabe mencionar que al interior de la secuencia, en varios de los pozos y a diferentes profundidades, han sido reportadas también rocas subintrusivas, en forma de diques y pequeños cuerpos subvolcánicos (Ostapenko et al, 1998). Ver figura 16.

Litología propuesta para Área Geotérmica El Hoyo – Monte Galán.

A partir del análisis de la información de las perforaciones geotérmicas realizadas en los campos geotérmicos se propone la siguiente secuencia litológica para el área.

Unidad I: 0 – 150 m.b.n.m. Esta unidad se propone que estaría compuesta por depósitos volcánicos holocénicos. Incluye lava andesitas, andesita – basáltica con intercalaciones de toba de composición similar, estos productos serian correspondientes a la actividad volcánica cuaternaria de la Cordillera de los Marrabios (Olade, 1892).

Unidad II: 150 – 730 m.b.n.m. Esta unidad se propone que estaría compuesta por depósitos de ceniza, pómez, piroclastos con intercalaciones de lava de composición basalto – andesita y andesita – dacita, posible depósitos lacustres. Los productos de esta unidad se pueden atribuir a las formaciones de toba Malpaisillo y productos volcánicos pre volcánico (Olade, 1892).

Unidad III: 730 – 1,490 m.b.n.m. Esta unidad se propone que estaría compuesta por depósitos lavas basálticas, aglomerados con intercalación de piroclastos de composición andesita – basáltica, se pueden correlacionar con la formación Coyol superior (Olade, 1892).

Unidad IV: 1,490 – 1,900 m.b.n.m. Esta unidad se propone que estaría compuesta por depósitos piroclásticos con intercalaciones de sedimentos marinos (margas y siltitas), lavas basálticas, aglomerados de composición andesita – basáltica, se pueden correlacionar con la formación Coyol inferior (Olade, 1892).

Unidad V: 1,900 – 2,500 m.b.n.m. Esta unidad se propone que estaría compuesta por depósitos volcánicos y sedimentos indiferenciados, se pueden correlacionar con la formación Matagalpa (Olade, 1892) Ver figura 16.

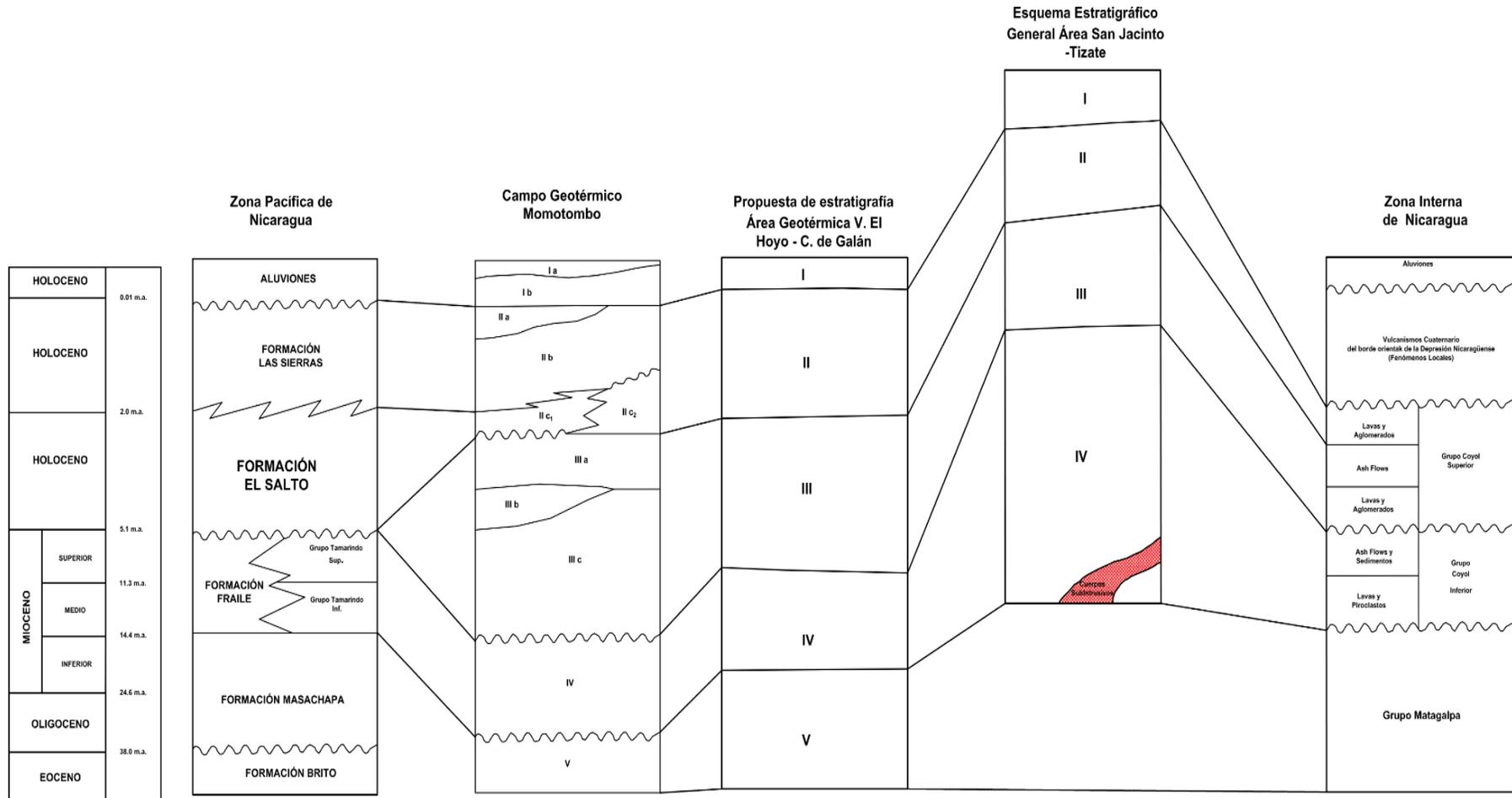


Figura 16: Esquema estratigráfico general y correlaciones regionales en la porción central de la depresión Nicaragüense. Tomado de Olade, 1982; Dal, 1997; Ostapenko et al, 1998.

Las muestras de gases se tomaron en las fumarolas que se encuentran principalmente en las partes altas de los volcanes del área y en sus cráteres, que es donde se registró una presión más adecuada que permitiera la toma de muestras. Los pozos de gradiente sólo cuentan con la medición de temperatura de fondo, pero es suficiente para conocer mejor y estimar las temperaturas a profundidades, aun siendo someras.

Las muestras analizadas químicamente se presentan en dos zonas principales, identificadas para el presente estudio como la “Zona 1”, ubicada a partir de la planicie central al extremo norte del complejo; y la “Zona 2”, ubicada de la parte central-sur de la planicie hasta el extremo sur de la misma. Las muestras localizadas en la zona 1 son únicamente pozos domésticos; las muestras de la zona 2 comprenden el resto de las muestras y los diferentes tipos de fuentes. Las muestras de gases se localizan desde la planicie central hasta el extremo occidental de la zona de estudio (figura 18).

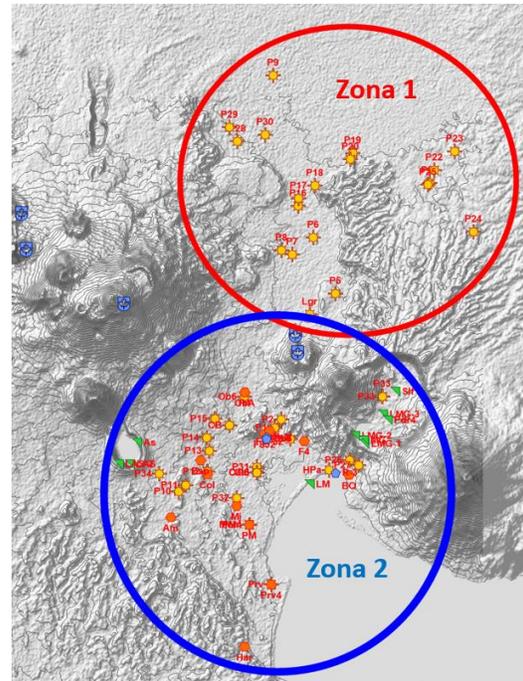


Figura 18: Zonas 1 y 2 en las que se divide el área de estudio de la zona termal de Nicaragua.

9.2.1. Geoquímica de líquidos.

En la figura 19 se presenta el diagrama de Piper elaborado a partir de las muestras tomadas en el área de estudio. Los manantiales y pozos muestreados en la zona de estudio tienen temperaturas entre 29°C y 48°C, los puntos más calientes se encuentran en la zona centro, en la zona norte de la desembocadura de los ríos hacia el lago.

Se observan tres tipos principales de aguas en las muestras (los tres principales están localizados en el diagrama de Piper). En la figura 20, se muestra el contenido relativo de $\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$, con lo cual los grupos de aguas pueden observarse con mayor detalle, y así mismo se pueden definir el origen de los fluidos y sus mezclas con mayor detalle:

- *Grupo A - Aguas bicarbonatadas* con un componente de sulfatos entre un 5% y un 50% de sulfatos y un carácter neutro ligeramente alcalino. El grueso de las muestras de ambas zonas es de este tipo.
- *Grupo B - Aguas sulfatadas* mezcladas con bicarbonatos en una proporción entre el 5% y el 30% y con cloruros entre el 20% y el 30%. Estas contienen hasta 3600ppm de SO_4 y 1700ppm de cloruros (muestra La Sulfatosa), con pH neutro o ligeramente alcalino.

- Grupo C – Aguas de mezcla Carbonatada – Clorurada con bajo contenido de sulfato y fuerte predominancia de cloruros, estas incluyen las muestras Har y Mt42 de tipo NaCl, ubicadas en el extremo sur de la zona 2.

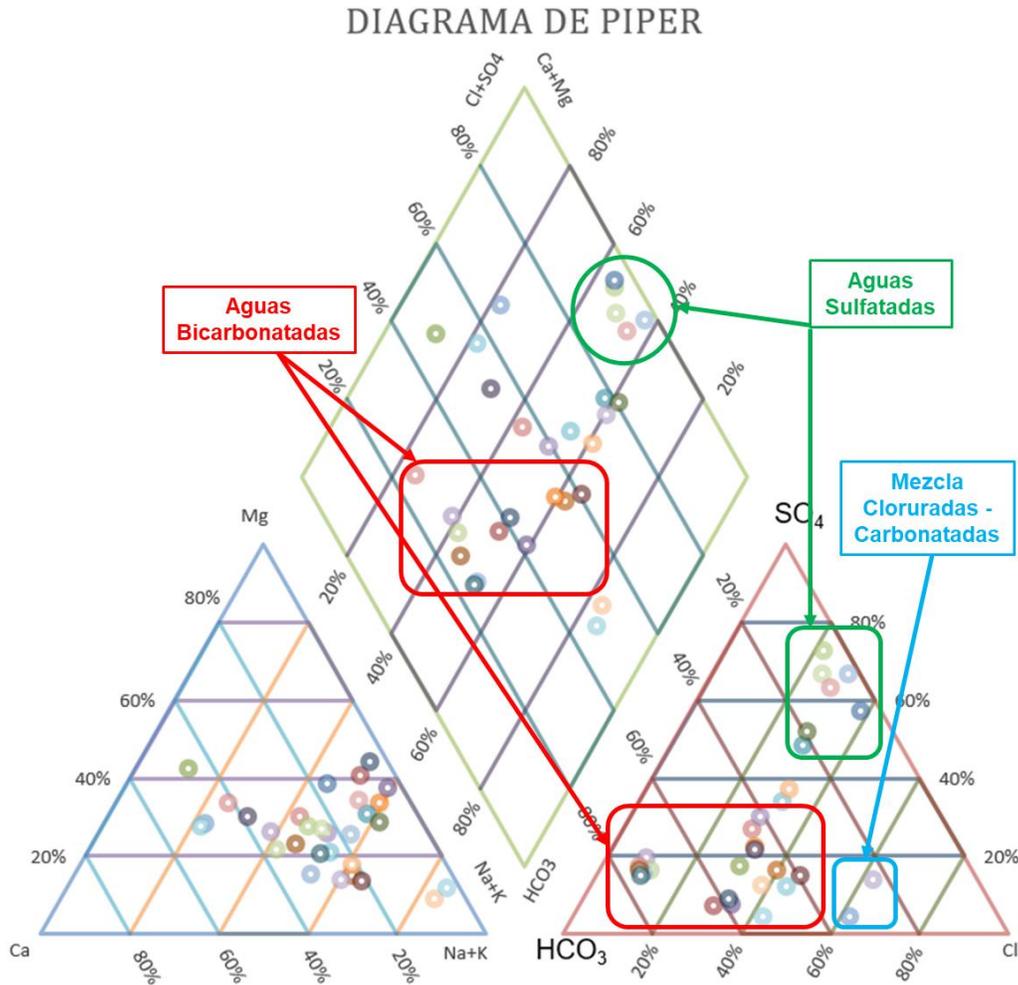


Figura 19: Diagrama de Piper-Hill-Langelier de las muestras de la zona termal de Nicaragua.

Las muestras del grupo C sugieren una limitada anomalía de cloruros en su composición. Estos cloruros pueden derivar en procesos de mezcla entre aguas bicarbonatadas someras y una descarga activa de aguas geotérmicas cloruradas sódicas o de composición Cl-Na-SO₄, de alta temperatura y origen profundo, que al ascender se mezcla con los acuíferos someros, enfriándose y diluyendo la concentración de cloruros de origen geotérmico.

Los niveles de sílice en las aguas de toda el área, indican un equilibrio aproximada con la calcedonia a temperaturas más bajas. Y un equilibrio con la sílice amorfa a temperaturas un poco más elevadas.

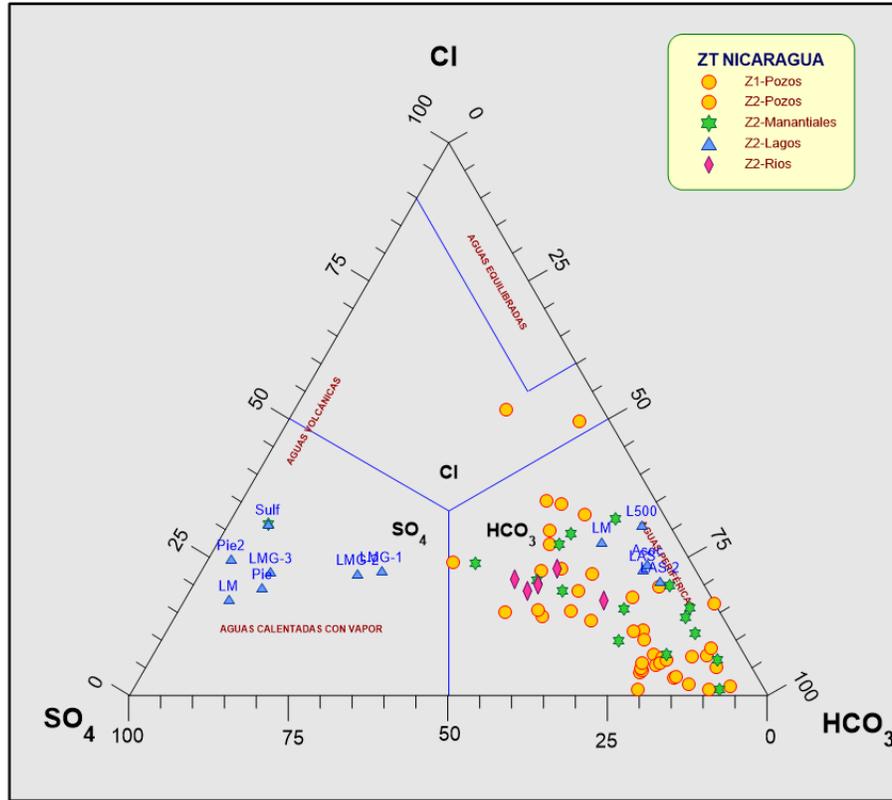


Figura 20: Diagrama ternario de Cl-SO₄-HCO₃ del área termal de Nicaragua.

La aplicación de geotermómetros se ve limitada por la falta de equilibrio químico a temperaturas bajas de las muestras y efectos de la disolución de la composición química en estratos más someros.

La composición general de los principales cationes y aniones de las muestras analizadas se pueden observar de forma general en los diagramas de Stiff. De esta forma se puede obtener un panorama general de primera mano del tipo de aguas que se muestrearon en la zona de estudio.

Los diagramas de Stiff se muestran en la figura 21. Las muestras con una composición de carácter más sulfatado o clorurado que bicarbonatado, se señalan en cuadro rojo. Las muestras sulfatadas son muestras de aguas calentadas por vapor geotérmico pero que se equilibraron con acuíferos someros cercanos a la superficie, de manera que al aflorar mantienen su carácter sulfatado, pero con pH neutro o ligeramente alcalino y temperaturas bajas, menores a los 40°C.

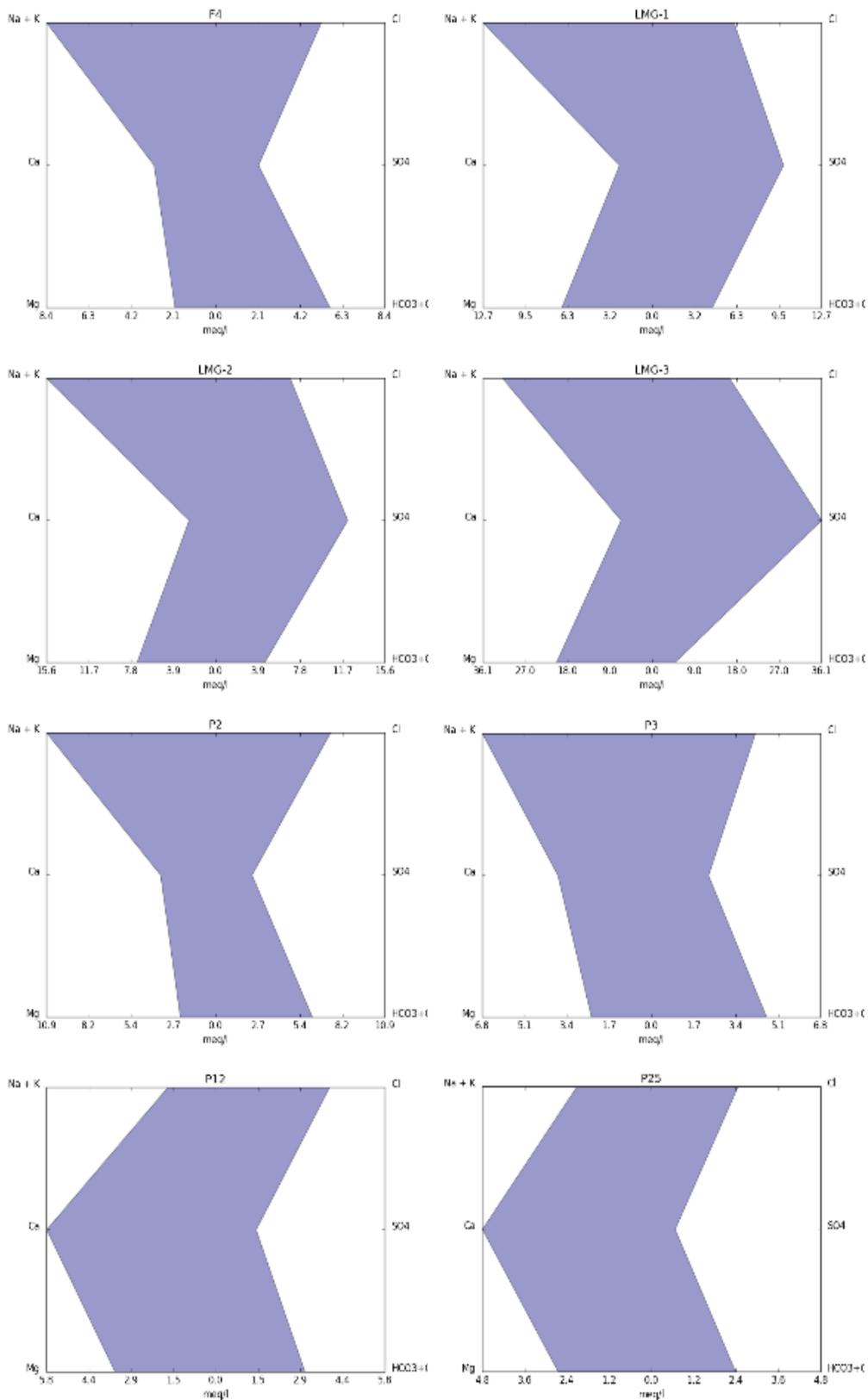


Figura 21: Diagramas de Stiff de las muestras de la zona Termal de Nicaragua.

La gráfica del contenido relativo de Na-K-Mg y del contenido relativo de Na-K-Mg-Ca (Giggenbach, 1991) nos proporcionan una idea clara del estado de equilibrio de las muestras con la roca huésped y en los procesos de intercambio iónico que se presentan en su ascenso a la superficie (figuras 22 y 23).

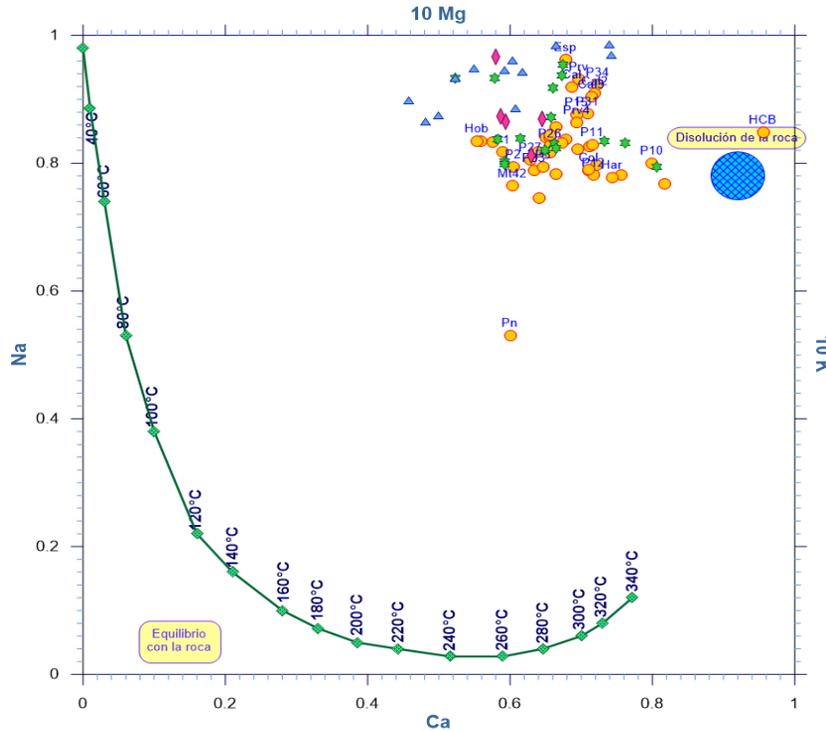


Figura 22: Diagrama de equilibrio térmico agua – roca (Giggenbach, 1991).

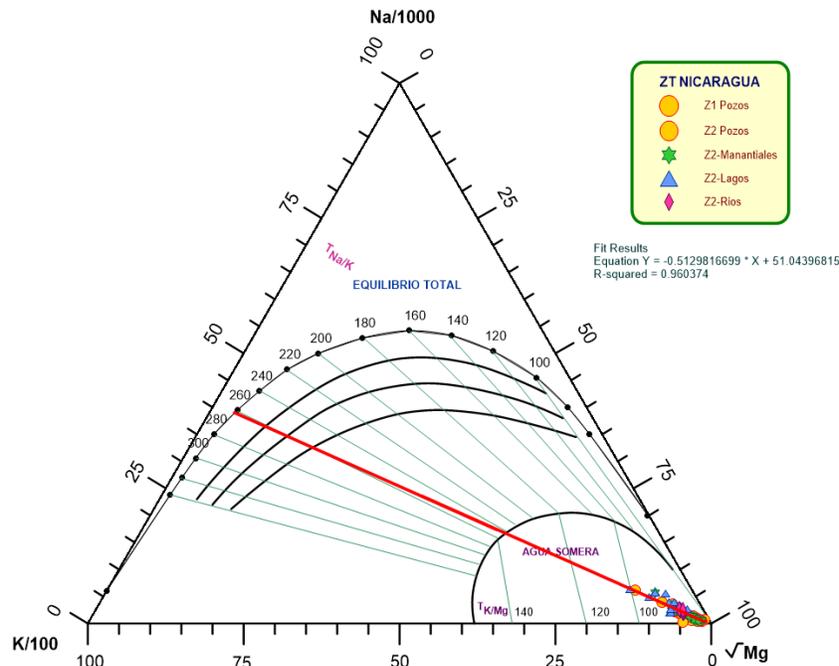


Figura 23: Diagrama ternario Na-K-Mg del área termal de Nicaragua.

Las aguas analizadas son aguas someras que aún están reaccionando con la roca. En condiciones como éstas los datos de temperatura que proporcionan los geotermómetros catiónicos son de dudosa calidad, sin embargo, el índice de correlación de la línea de tendencia calculada para el grueso de las muestras es casi del 100%.

Con esta línea de tendencia se estima que las aguas, de provenir de un posible reservorio geotérmico, tendría una temperatura estimada aproximada de 270°C.

En la figura 22 se observa que las muestras se encuentran en pleno proceso de disolución de la roca huésped, en condiciones aún lejanas del equilibrio. Las muestras más cercanas a la condición de equilibrio es la muestra Pn, Mt42 de la zona 1; P8 y P25 de la zona 2, ubicadas en el extremo sur de la zona de estudio.

En la figura 24 se grafica el contenido relativo de Li-Cl-B para las muestras de la zona de estudio. Una vez más se confirma el proceso de disolución de la roca que la mayoría de las aguas de la zona está llevando a cabo en la corteza.

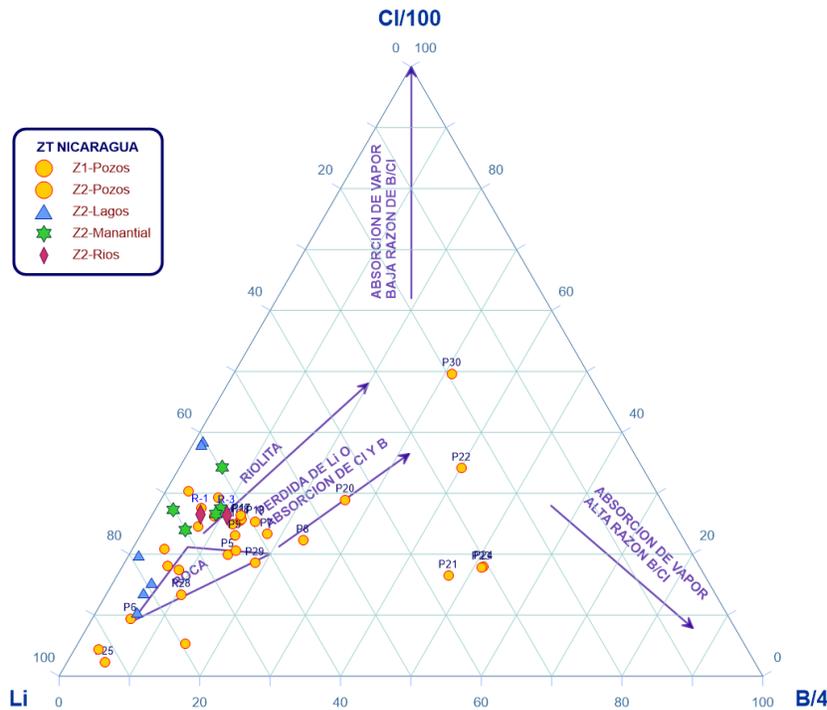


Figura 24: Diagrama ternario de Li, Cl, B; del área geotérmica de Nicaragua.

La presencia de Li es un buen indicador del origen profundo de las mismas. En el caso de las muestras de los pozos domésticos de la zona 1 – muestras P8, P20, P21, P22, P23, P24 y P30 – que son los pozos de la zona 1 (norte de la zona de estudio), hay una concentración de Cl y B en la composición que es muy probable haya sido añadida durante el proceso de disolución de la roca, ya que de haber adquirido estos elementos en procesos posteriores a la reacción fluido – roca, serían adquiridos por el fluido principalmente en forma de HCl y H₃BO₃, confiriendo un carácter ácido a las muestras, situación que no

sucede, aun cuando el fluido al ascender a la superficie sea diluido por acuiferos someros y los ácidos hayan tenido un proceso de reacción que los lleve a un estado neutralizado.

Por métodos diversos se ha estimado la litología de la zona. Considerando que todo el sistema se formó por una serie de eventos eruptivos consecutivos, y con la ayuda de algunos estudios en pozos de gradiente y con la información arrojada en los mismos, se determinó, de forma muy general, la siguiente litología a profundidad en la zona de estudio:

Profundidad	Descripción	Temperatura estimada °C
0 – 150m	Lavas, piroclastos intercalados con tobas se puede presentar alteración argilítica.	120°C
150 m – 730 m	Lavas, depósitos de pómez, piroclastos. En esta área se puede presentar alteración argilítica y filítica.	120 -200°C
730 m – 1490 m	Lavas básicas, aglomerados y piroclastos, se pueden presentar alteración filítica- propilítica.	
1490 m – 1900 1900 - 2500	Depósitos volcánicos intercalados con depósitos sedimentarios se pueden presentar alteración propilítica.	200 -250°C
POSIBLE RESERVORIO GEOTÉRMICO		

Tabla 4: Propuesta de litología del área de estudio (Olade, 1982).

Se estima que el posible reservorio geotérmico se encuentre a profundidades aproximadas o mayores a los 1000m, con la existencia de un fallamiento profundo que permite la circulación de los fluidos en las diferentes zonas del complejo volcánico.

La litología existente en esas profundidades, confiere a los fluidos que interaccionan con la roca huésped una concentración mayor por intercambio iónico de Na, K y Ca. A pesar de que en superficie llega a aflorar un agua con una calidad de equilibrio químico inferior, es muy posible que a profundidad se encuentre un fluido que circula a profundidad, y que en las zonas del área donde aflora, aún contiene elementos conservativos (diluidos y mezclados con elementos someros) de origen geotérmico como Cl, Li y B.

A pesar de que las reglas en la aplicación de geotermómetros catiónicos limita su uso a muestras de agua en equilibrio químico, tomando en cuenta que la litología donde se estima podría alojarse el posible reservorio, está constituida por coladas piroclásticas con intercalaciones sedimentarias marinas y roca andesítica, podrían utilizarse los geotermómetros de Na/K o Na-K-Ca, como referencia únicamente de la posible temperatura que podría existir en dicho fluido, y tomando en cuenta la reserva en los datos que las limitaciones en la aplicación de los mismos sostienen.

Las temperaturas determinadas por dichos geotermómetros se encuentran en un rango entre **250°C – 300°C**, coincidiendo con las temperaturas estimadas por los demás métodos y reportadas en la estimación litológica y cronológica de la zona, y también con las temperaturas estimadas en las tendencias de los datos en las figuras 22 y 23).

9.2.2. Geoquímica de Gases.

Se cuenta con la cantidad limitada de muestras de gases. Todas contienen cantidades significativas de aire con oxígeno variable en volumen y nitrógeno. La evidencia sugiere que el aire se mezcló con el fluido desde el subsuelo, dado que está constituido por 21% de O₂ y 79% de N₂. La infiltración del aire es más probable que se haya dado en las laderas porosas y fracturadas de los edificios volcánicos que en los acuíferos freáticos de una zona de planicie como el valle central de la zona de estudio.

En la figura 25, se presenta el contenido relativo de N₂-He-Ar, el cual nos puede orientar en cuanto al origen que tienen los gases que afloran en los puntos de muestreo en la zona de estudio.

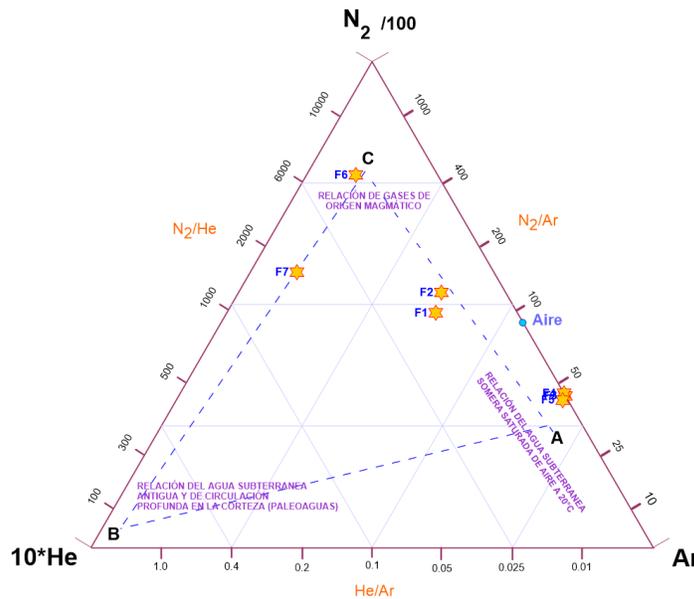


Figura 25: Contenido relativo de N₂-He-Ar. del área termal de Nicaragua.

Tanto el He como el Ar son gases nobles e internos, siendo el He el gas predominante que circula profundamente en la corteza y el N₂ es predominante en los gases termales. Las muestras fumarola 1 y fumarola 2 tienen una composición cercana a la del aire atmosférico, alejándose hacia una composición un poco más de origen magmático indicando una mezcla entre ambos componentes que está dada en su ascenso a la superficie; a diferencia de las muestras fumarola 3, fumarola 4 y fumarola 5, las cuales carecen por completo de He en su composición indicando un origen meramente somero.

En cambio, las muestras fumarola 6 y fumarola 7 tienen una composición mucho más cercana a un origen magmático que las demás, con altos contenidos de N₂ y una relación N₂/Ar de alrededor de 800, indicador claro de dichas condiciones de origen. Las muestras fumarola 1 y fumarola 2 tienen una relación N₂/Ar de 130 y 146 respectivamente, confirmando una vez más la mezcla de gases atmosférico y magmático en su composición; condiciones representativas de características geotérmicas.

Los geotermómetros de gases calculados a partir de la composición de los mismos proporciona un rango de temperaturas de **270°C a 290°C**; el cual se puede confirmar con el diagrama de equilibrio de relaciones $H_2/Ar - CO_2/Ar$, y que nos indica el estado de equilibrio de los gases con la fase líquida y gaseosa del fluido que asciende a la superficie. Este rango de temperaturas se asemeja mucho al rango supuesto para los geotermómetros catiónicos. Ver figura 26.

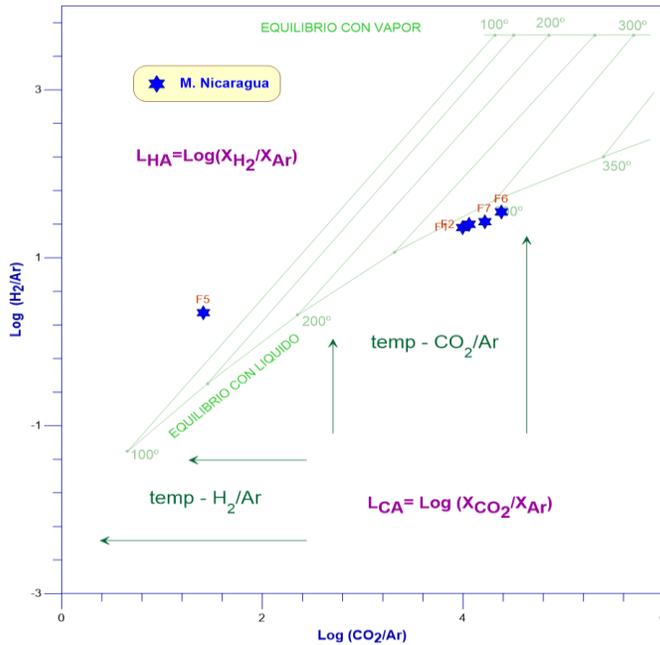


Figura 26: Diagrama de relaciones $H_2/Ar - CO_2/Ar$ para las muestras de gases en la zona termal de Nicaragua.

9.2.3. Isotopía

Las concentraciones de isótopos de las muestras de agua tomadas en toda la zona de estudio, tanto como los isótopos muestreados y analizados en las muestras de gases se presentan en la figura 27.

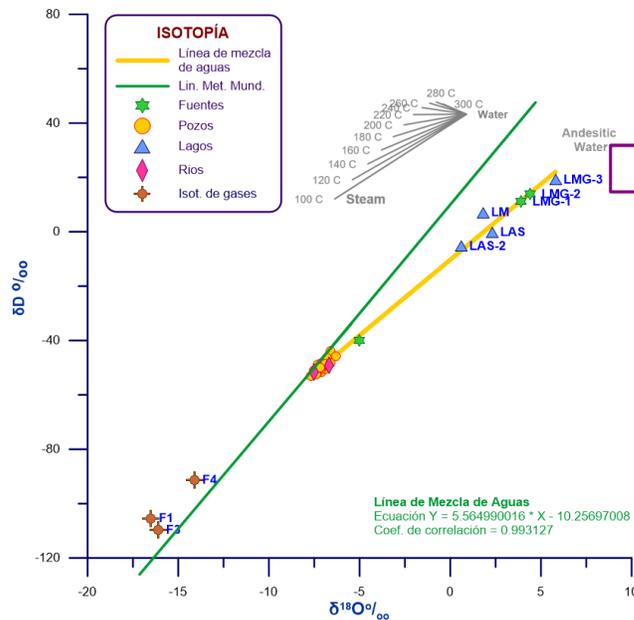


Figura 27: Análisis isotópico de las muestras de la zona termal de Nicaragua.

La isotopía nos indica que en las aguas del grupo de lagunas se ha llevado a cabo un fraccionamiento isotópico generado por procesos de ebullición – evaporación, lo más probable, en el subsuelo y a medida que los fluidos en estos puntos ascienden a la superficie. El origen de estos fluidos es de origen andesítico, ya que los fluidos que afloran en estos puntos han estado en interacción con rocas de este tipo en el subsuelo, confirmando en esta zona el ascenso de fluido de origen profundo y posiblemente geotérmico.

Las demás muestras, tanto de pozos, manantiales, ríos y los isótopos de gases analizados, muestran una firma isotópica de tipo meteórico, al encontrarse tan cerca de la línea meteórica mundial; las concentraciones de ^{18}O y D son debidas a la mezcla de las aguas en estos puntos con aire atmosférico.

Los isótopos de gases son también de origen meramente meteórico; lo cual confirma el origen observado en la figura 27, para estas muestras.

Los datos de ^{18}O , graficados vs la altura de muestreo en las descargas analizadas, nos permite estimar la altura sobre el nivel del mar de la recarga del posible reservorio o al menos la altura estimada a la cual existe la infiltración en el subsuelo.

Dadas las concentraciones de isotopía de la zona de estudio, se vuelve muy complicado definir la altura de la infiltración utilizando el método gráfico, ya que hay mucha dispersión en los datos, lo que reduce significativamente el coeficiente de correlación de los datos aumentando el porcentaje de error para la estimación de una tendencia en los mismos (figura 28).

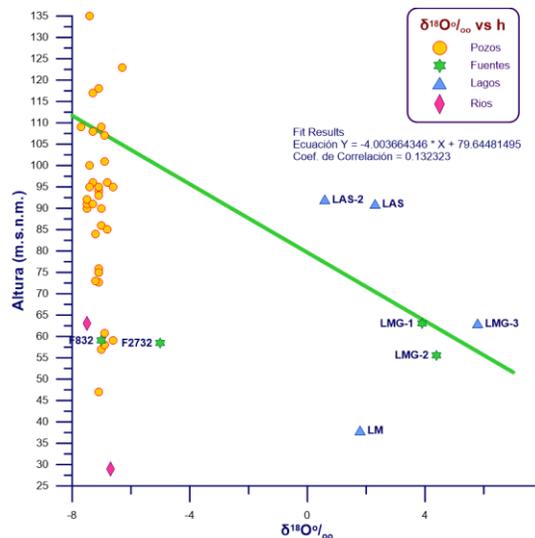


Figura 28: Análisis de ^{18}O vs altitud de muestreo para la zona termal de Nicaragua.

La línea verde es la línea de tendencia calculada únicamente con los datos de isotopía que se acercan más a la composición de origen andesítico – LAS, LAS-2, LMG-1, LMG-2, LMG-3 y LM – y que son las muestras con la composición más representativa de fluido de circulación profunda. Aun tomando en cuenta únicamente estos datos, el índice de correlación para el ajuste lineal que requiere el método es demasiado bajo (0.1323), por lo cual, el método no puede aplicarse con resultados confiables.

10. Presentación de los Resultados.

Modelo conceptual

En esta sección se discutirá y expondrán los resultados obtenidos, de la interpretación de los datos geológicos y geoquímicos. En la figura 38, se muestra integración de los resultados descritos en secciones anteriores. En la figura 42, se observa un corte vertical de esta integración donde se representan los principales componentes del modelo conceptual propuesto para el área geotérmica de Nicaragua.

10.1. Fuente de calor.

En el área del complejo volcánico El Hoyo – Monte Galán, existe suficiente evidencia en superficie sobre la existencia de varias cámaras magmáticas distribuidas en el área, las que representan una posible fuente calor que pueden contribuir a la formación de un sistema geotermal de alta entalpía; sin embargo, dependiendo de la edad, profundidad y tamaño, puede ser o puede propiciar la formación de un sistema geotérmico de interés económico.

El complejo de El Hoyo es un típico volcán escudo, el cual se formó en correspondencia de una zona de particular debilidad tectónica, la que ha facilitado un ascenso rápido y abundante de magma hacia la superficie, limitando la ocurrencia de importantes procesos de diferenciación por residencia del magma a niveles corticales (Van Wyk de Vries, 1993). Swetha V. et al, 2016., plantea que la cámara magmática del Complejo Volcán El Hoyo, posee un embalse (depósito) que contiene residuos evolucionados de magma. Esta cámara magmática estaría ubicada a una profundidad aproximada de 4 km y podría ser sería el lugar de mezcla entre el magma primitivo de Cerro Negro y el magma del Volcán El Hoyo.

La presencia de los amplios cráteres como El Picacho, aparentemente originados por erupciones explosivas, la actividad de desgasificación y explosión del Volcán El Hoyo, son otros indicios de actividad relacionada con cámaras magmáticas emplazadas a niveles relativamente someros. Todo esto indicaría que durante la evolución del proceso volcánico, se emplazaron también cuerpos magmáticos a niveles (crustales) relativamente someros, los cuales constituyen fuentes de calor que podrían desarrollar sistemas geotérmicos de interés.

En el caso del área Volcan EL Hoyo, la interpretación de los datos geoquímicos proporcionó indicios para aceptar la presencia de una intrusión de origen magmático actualmente suministrando calor a los alrededores y creando un sistema geotermal. El análisis geoquímico de las muestras de gases tomadas de las fumarolas de la cima del Volcán reveló la presencia de gases volcánicos, este resultado surge de la aplicación de geotermómetros de gases, los cuales indican que los fluidos han sido calentados a temperaturas alrededor de los 270°C – 290°C. De esta manera se puede inferir la existencia de una cámara magmática debajo del volcán lo que representa una posible fuente de calor para sistema geotérmico.

La posible existencia de otras fuentes de calor está limitada a la actividad volcánica en el sector Cerro Colorado – Cerro Montoso y Caldera de Galán, se puede considerar que la actividad de este sistema es reciente, siendo demostrado por la buena conservación del borde caldérico y por la morfología muy joven del Cerro Montoso (Van Wyk de Vries, 1993, reporta una edad de 50,000 años para la Caldera de Galán). Se asume que el colapso de

la caldera haya ocurrido a raíz de alguna erupción explosiva. OLADE, 1982, interpretaron la existencia de una gran cámara magmática a profundidad máxima de 8 km, debajo de la Caldera de Galán. El análisis geoquímico de las muestras de gases tomadas de las fumarolas en el área del Cerro Colorado revela la presencia de gases de origen hidrotermal, este resultado surge de la aplicación de geotermómetros de gases, los cuales indican que los fluidos han sido calentados a temperaturas alrededor de los 270°C – 280°C. De esta manera se puede inferir la existencia de una cámara magmática en el sector del Cerro Colorado y Caldera de Galán, representa una posible fuente de calor para sistema geotérmico. En estudios anteriores consideran por lo tanto que la actividad y los procesos evolutivos de este sistema necesitan ser investigados con mayor detalle antes de poder definir la efectiva importancia de la correspondiente fuente de calor.

10.2. Estructura del yacimiento.

Basados en los resultados de la perforaciones del campo geotérmico Momotombo, se puede discernir que el subsuelo en el área del complejo volcánico del Hoyo Monte – Galán, está compuesto por rocas volcánicas (lavas, tobas, piroclastos y aglomerados) de edad terciarias correlacionadas con las formaciones Coyol, Matagalpa, Las Sierras; y de rocas sedimentarias del Terciario correlacionadas con la formación Tamarindo y El Salto. Estas rocas están cubiertas por lava, rocas piroclásticas, asociados a depósitos de las estructuras de edad cuaternaria presentes en el área. En general se puede argumentar que estas formaciones no son permeables, por lo tanto la presencia de manifestaciones y circulación de fluidos hidrotermales profundos y superficiales están estrechamente ligada a zonas de fracturas y fallas que se extienden a profundidad, lo que genera una permeabilidad secundaria que permite el ascenso y circulación de fluidos geotérmicos hacia la superficie. Se propone que el reservorio geotérmico esté comprendido entre las profundidades de 1,000 – 2,500 m.b.n.m, abarcando las unidades V, IV y parcialmente la unidad III.

10.3. Dirección de circulación de fluidos.

De acuerdo con el análisis estructural del área se identificó que el sistema N – S, está constituido por estructuras con desplazamiento normal; este sistema de fallas y lineamiento controlan el ascenso de fluidos en el sector de cerro colorado y su posterior descarga hacia el sur, el sistema NW - SE está conformado por fallas de desplazamiento lateral derecho, a través de estas estructuras se produce el ascenso de fluidos en el sector este del volcán y posterior descarga hacia la planicie donde el fallamiento N-S forma la zona de Outflow del sistema. El sistema de fallas y lineamientos NE-SW, está caracterizado por presentar estructuras de desplazamiento lateral izquierdo este sistema de fallas en el sector de cerro colorado, se pueden interpretar como barreos estructural las cuales no permiten la migración de fluidos para sectores aledaños ejemplo sector del cerro montoso.

En el sector Volcán el Hoyo los lineamientos y fallas más importantes inferidas son las estructuras L 27, L52, L6 y Falla F9. En el sector de Colorado se definieron las fallas F4, F3, y lineamientos L 29, L3; las que se correlacionan con la existencia de zonas de alteración en el área (suelos calientes), lo que indica que estas fallas contribuyen a la circulación de fluidos termales desde las profundidades hacia niveles poco profundos de la superficie de la parte superior del Cerro Colorado y posterior descarga hacia sur – suroeste hacia el lago de Managua.

De la misma manera se puede decir que las fallas y lineamientos identificados en el Volcán El Hoyo y Cerro Picacho, presentan una tendencia NW- SE, se puede decir que permiten el ascenso y posterior descarga al sector del Cerro Colorado, la zona donde los fluidos fluyen hacia arriba debido a convección térmica parece estar ubicada debajo del Complejo Volcán El Hoyo - El Picacho y Cerro Colorado; desde allí los fluidos calientes se descargan hacia el sur a través de las estructuras: L 26, L25 y F2, esto puede aseverarse por la existencia de una zona de anomalía térmica representada por la manifestación termal conocido como el obraje y sectores aledaños en los que se han detectados temperaturas superiores a los 35 °C.

10.3. Fluidos y temperatura del yacimiento.

Teniendo en cuenta la evaluación geoquímica realizada en anteriormente, y realizando una correlación entre los geotermómetros de composición iónica, la litología propuesta en el área y los geotermómetros de gases de todos los puntos de muestreo en la zona de estudio, se configura el mapa térmico que se muestra en la figura 29.

La muy limitada presencia de fluidos termales en manifestaciones superficiales, la limitada mezcla entre aguas profundas y someras, acompañada por amplios procesos de re equilibrio químico, impiden la aplicación de geotermómetros catiónicos y de sílice para estimar la temperatura de equilibrio del fluido geotérmico. Las temperaturas calculadas se consideran indicativas de condiciones de re-equilibración del fluido a niveles someros. A pesar de eso, la presencia de temperaturas más elevadas a profundidad se considera muy probable, aunque no sea posible estimarse a partir de la información química disponible.

En el cálculo de las isotermas, se tomaron en cuenta todos los datos de temperatura de que se cuenta, en ambas zonas y con los geotermómetros de gases. Los datos de geotermómetros de cationes son meramente de referencia; sin embargo, pueden ser útiles si se toma en cuenta que la litología a la profundidad donde se aloja el posible reservorio geotérmico son rocas piroclásticas con intercalaciones de rocas sedimentarias marinas, ricas en Ca y Na, y aglomerados andesítico, cuya base química son sales de Na, K y Ca.

En los estratos superiores se estima la presencia de alteración propilítica y argilítica. Esto confiere al fluido que interactúa a profundidad y que asciende por los sistemas de fallamiento principales su carácter de sales de Na, K y Ca, aún en su condición precaria de equilibrio químico, constituyendo una buena referencia para la estimación de la temperatura probable, y con las debidas reservas en la información.

Los gases por otra parte, proporcionan características mucho más estables de la composición geotermal de los fluidos, al tener concentraciones acordes a dicha composición de He, Ar y N₂ (explicado en la evaluación geoquímica anterior). Los geotermómetros calculados con estos parámetros proporcionan una referencia mucho más sólida de la temperatura que podría tener el posible reservorio geotérmico a profundidad.

Con las temperaturas calculadas de forma general para toda el área de estudio, se aprecia que las zonas más calientes, con temperaturas muy cercanas a los 300°C, se localizan en la parte central de la planicie (entre los complejos volcánicos del NO y SE) y al sur del área de estudio.

Con las temperaturas calculadas con los geotermómetros de gases se puede confirmar la temperatura de la zona de la planicie central. La información geoquímica general, obtenida de los análisis de las muestras tomadas en toda el área de estudio, se han podido calcular plantas de isotermas a fin de poder deducir el patrón de movimiento de fluidos, zonas de descarga de los mismos, zonas de mayor y menor concentración de los parámetros geoquímicos principales, entre otras características químicas que permitan la elaboración de un modelo geoquímico más completo. En la zona de estudio se han perforado 15 pozos de gradiente, los cuales fueron terminados a profundidades entre 23.5 m y 150 m de profundidad. Se midieron temperaturas de fondo de los pozos, y se registraron temperaturas con un rango entre 39°C y 125°C.

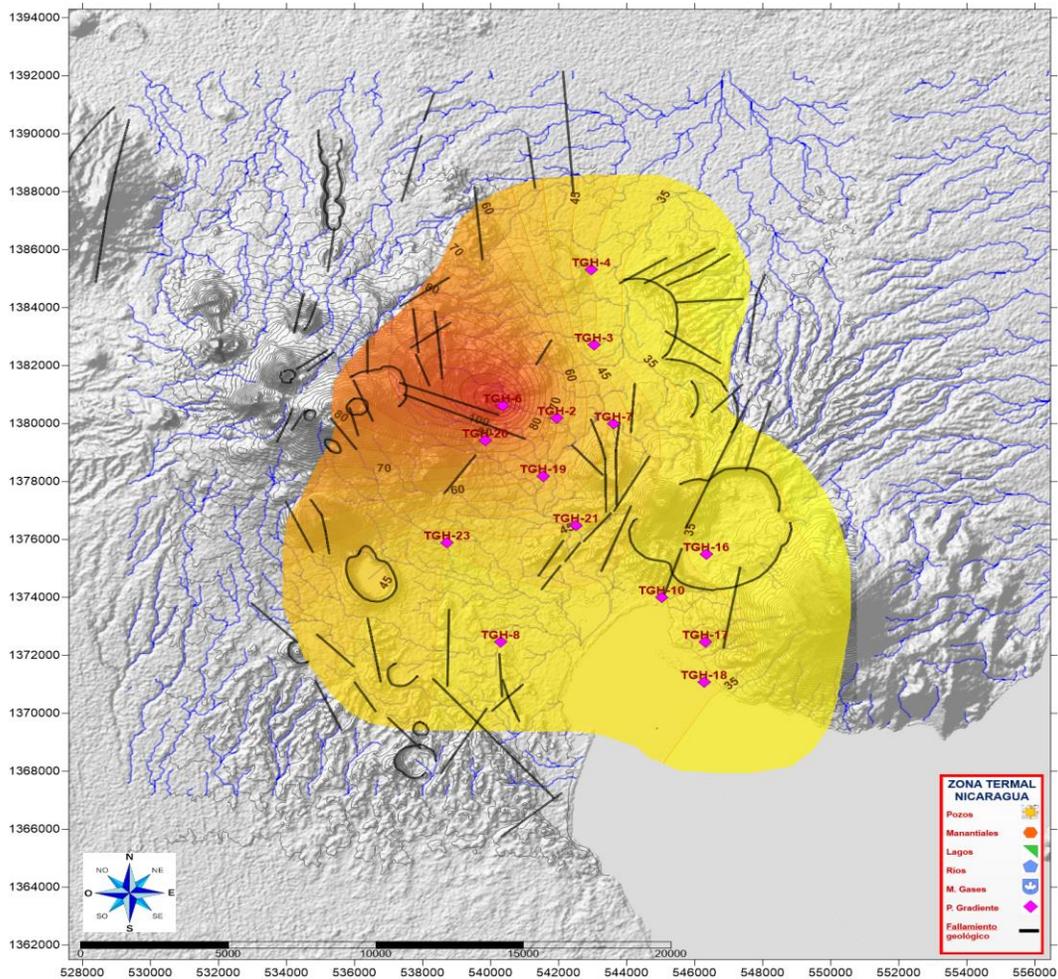


Figura 29: Isotermas calculadas para el área El Hoyo - Monte Galán.

El conjunto de los resultados geoquímicos y los pozos de gradiente evidencian una anomalía termal que se extiende ampliamente en la planicie de la zona central de la zona de estudio entre los dos sistemas volcánicos. Las anomalías de gradiente térmico se encuentran más marcadas hacia el NO de la planicie, en el volcán localizado en dicha zona, bajo el cual parece encontrarse el núcleo del sistema hidrotermal. El pozo de gradiente más caliente que se perforó se perforó en ladera oriental del sistema volcánico y es el pozo TGH-6. Durante la perforación se encontró agua a 125°C, a tan solo 80 m de profundidad y se identificó una intensa alteración hidrotermal (figura 30).

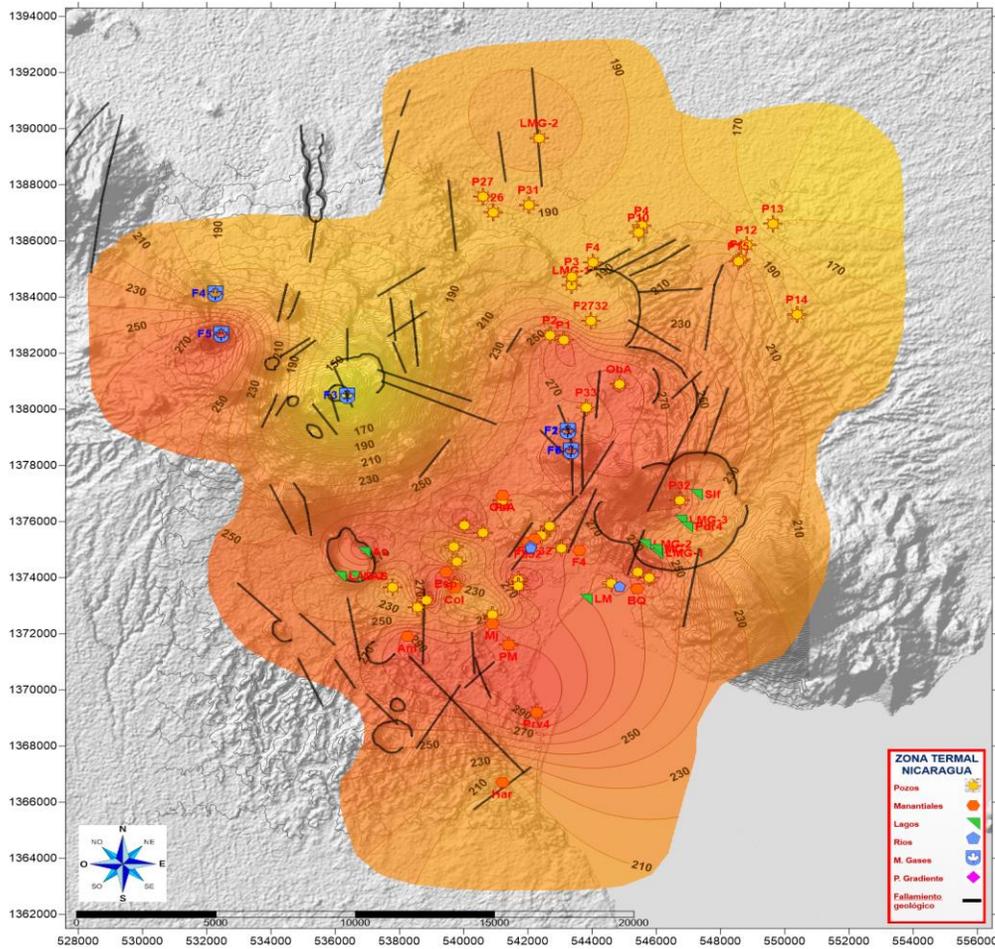


Figura 30: Isotermas de fondo de pozo medidas en los pozos de gradiente del área El Hoyo - Monte Galán.

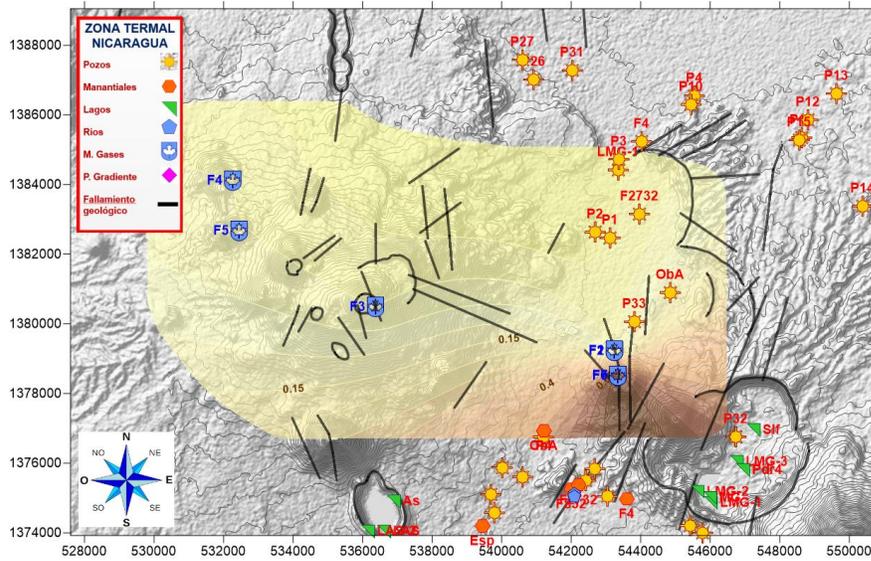


Figura 37: Isolíneas de concentración de helio analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.

Figura 37: Isolíneas de concentración de H₂S analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.

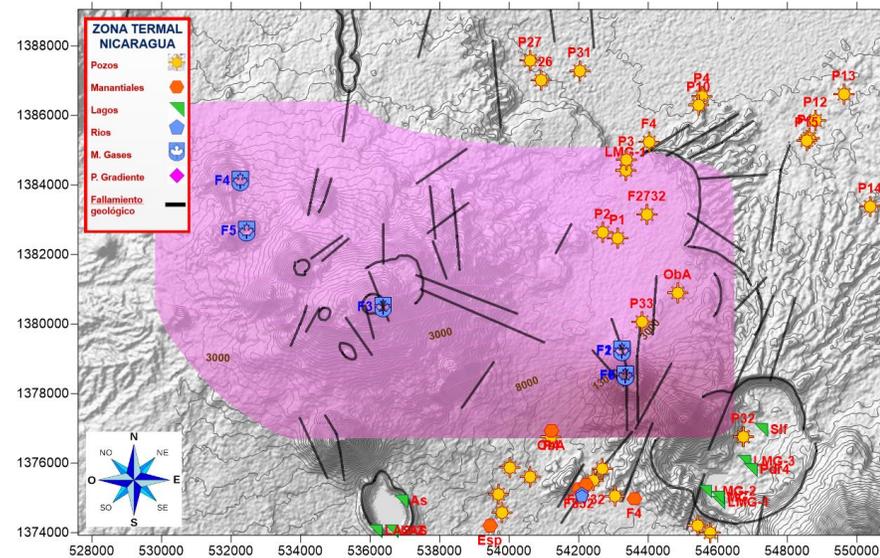
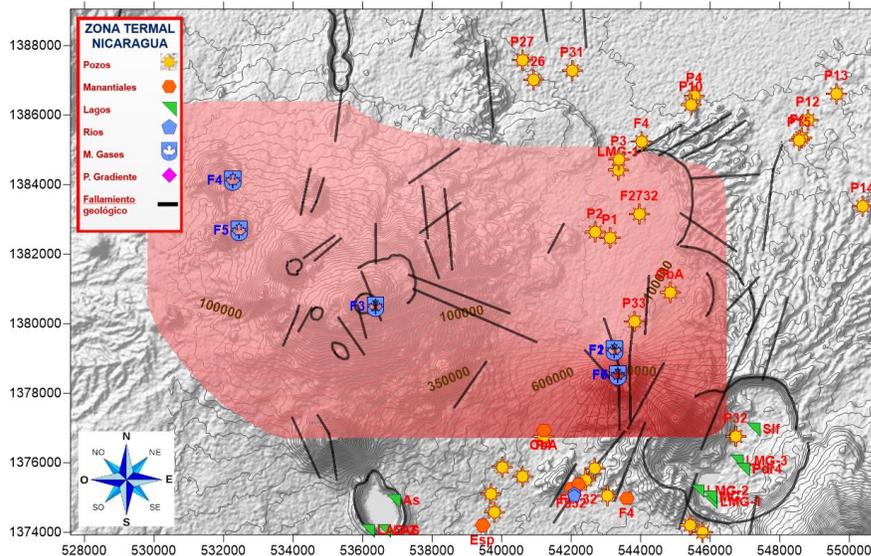


Figura 37: Isolíneas de concentración de CO₂ analizado en las muestras tomadas en la zona termal de Nicaragua.



En las figuras se puede observar una zona activa de ascenso de fluidos por debajo del área del volcán El Hoyo y otra la orilla este de la planicie central. Se encuentran aguas sulfatadas en el área de la caldera de Galán en esa zona tienen una concentración alta de sulfatos – cloruros, que han sido reconcentradas por evaporación (las lagunas que se encuentra dentro de la caldera), pero a pesar de eso, son sin duda se pueden tener huellas de origen geotérmico.

El contenido de cloruros (hasta 1000mg/L) es muy probable que provenga de agua geotérmica profunda y los sulfatos (hasta 3600mg/L) del gas geotérmico H_2S , que por procesos de mezcla con agua meteórica dentro de la misma caldera o en las proximidades, se transforma en SO_4 y se equilibra con los mantos freáticos superiores y con la roca de los mismos, neutralizando el pH ácido que se genera con este proceso (las aguas de la caldera tienen pH neutro).

En las figuras también se observan las mismas anomalías de flujo de los componentes, tanto en la concentración de los principales cationes de origen geotérmico, gases e incluso en la concentración de isotópos; dichas anomalías sugieren un flujo de agua geotérmica que se desplaza de la zona de fracturamiento del complejo volcánico El Hoyo – El picacho del Oeste, a través de la falla que conecta con el Cerro Colorados atravesando la planicie hacia el este; y luego toman dirección sur (hacia la zona 1). Existe un sistema de fallas NE-SW que funcionan de barrera a los fluidos e impiden que afloren en la caldera de Galán, donde se localiza otra descarga de fluidos, sin que se haya comprobado aún que pertenece al mismo sistema proveniente del sistema El Hoyo – El Picacho (Figura 37).

Las aguas de mezcla sulfatadas – cloruradas que afloran en la caldera de Galán, podrían pertenecer a las aguas que se originan por procesos de mezcla del grupo B que se describieron en la sección anterior. Sin embargo, el fondo de la caldera, se sabe que es poco elevado, y es poco probable que haya un gradiente hidrológico hacia afuera de la misma que pueda llevar esas aguas hacia el sur por los cuerpos superficiales.

El fondo de la caldera está formado por depósitos lacustres y diatomitas, que probablemente son impermeables, por lo tanto el componente sulfatado de las muestras del grupo B proviene de otro cuerpo hidrogeológico, quizá de origen más profundo.

Modelo geoquímico – geológico propuesto para el área geotérmica V. El Hoyo – Monte Galán

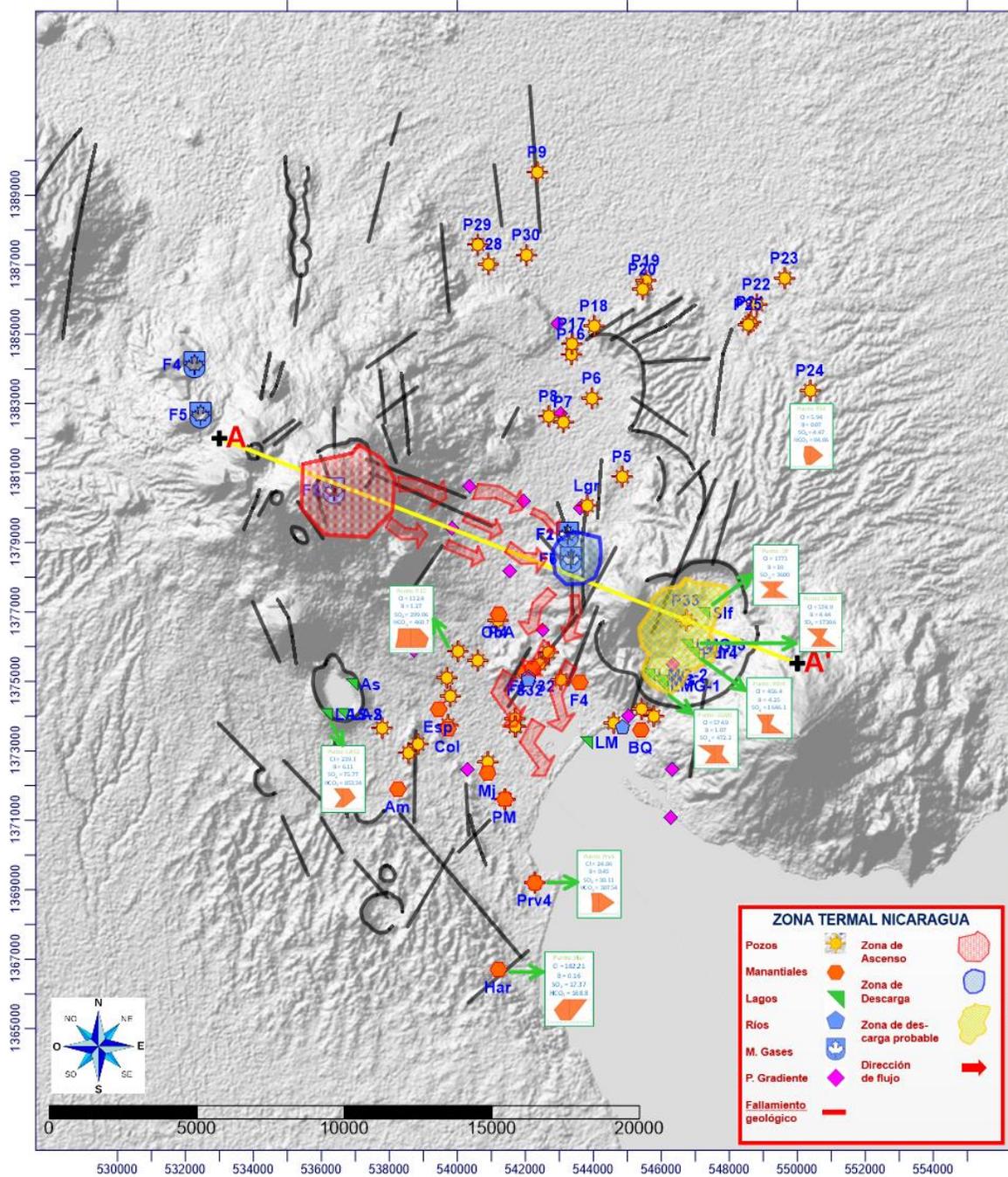


Figura 38: Modelo geoquímico y geológico estructural

11. Conclusiones y recomendaciones.

La geología del área se describió en base a la información existente, los rasgos estructurales del área, se describieron en base a de la interpretación de imágenes anteriormente descrita, se identificó que los principales sistemas de fallas y lineamientos existente en el área muestran tres tendencias N-S, NW-SE, NE-SW, siendo los sistemas N-S y NW-SE, los sistemas de fallas que controlan el ascenso y la circulación de los fluidos geotérmicos. Es decir que podría encontrarse un área de buena permeabilidad en los alrededores de las fallas y lineamientos: F3, F4; F9, L29, L52 y L27, estas coinciden con la distribución de las manifestaciones termales, suelos calientes, fumarolas, sínter.

Se puede inferir que el fluido geotérmico asciende principalmente por las estructuras L52, L27, las que presentan una dirección NW- SE y su posterior descarga al sector de cerro Colorado, en el sector del cerro se identificaron las estructuras F4 y F3, se considera que por estas estructuras se produce otra zona de Upflow, estas dos zonas de ascenso presenta su posterior descarga hacia el sector sur de la zona.

La permeabilidad de la zona aún no ha sido totalmente comprobada. Se tienen identificados los principales sistemas de fallamiento, y las zonas donde los fluidos afloran en la superficie; sin embargo, las características de los fluidos que afloran sugieren que la permeabilidad de la zona es limitada, principalmente debido a la serie de eventos eruptivos que han formado los estratos litológicos sobre los sistemas de fallamiento.

Se infirió la estratigrafía del subsuelo del área, se proponen la posible existencia de cinco unidades litológicas, se propone que el reservorio geotérmico est comprendido entre las profundidades de 1,000 – 2,500 m.b.n.m, abarcando las unidades V, IV y parcialmente la unidad III, estas unidades puede ser correlacionadas con las identificadas en los pozos de campo geotérmico Momotombo.

La fuente de calor del sistema se puede inferir que está relacionada a los sistemas o cámaras magmáticas pertenecientes al sistemas de los complejos volcánicos El Hoyo – Las Pilas, Caldera de Galán y una posible fuente de calor puede estar relacionada a un relicto de la cámara magmática de cerro Colorado, pero se deben desarrollar estudios vulcanológicos y geofísicos para identificar, caracterizar cada una de las posibles fuentes de calor.

El área en general tiene una zona de ascenso de gases principalmente en las cumbres de los volcanes, tanto en el Hoyo como en el Cerro Colorado. La caldera de Galán presenta diversos afloramientos en las lagunas dentro de la misma, de carácter sulfatado neutro.

El tipo de aguas y las condiciones de equilibrio químico bajo hacen, en cuestiones prácticas, poco viable la aplicación de geotermómetros catiónicos. La litología sugiere que el posible yacimiento se aloja en una unidad de rocas volcánicas con intercalaciones rocas sedimentarias que confieren al fluido un carácter sódico, potásico y cálcico fuerte; de forma que los geotermómetros catiónicos se han tomado únicamente como referencia pero la información proporcionada debe tomarse con las reservas correspondientes.

A pesar de eso, los puntos alrededor del Cerro Colorado, la Loma Chistata y hacia la caldera de Galán, tienen una concentración de elementos de origen geotérmico (B, SO₄ y en algunos puntos Cl) aceptables, sugiriendo que los fluidos de origen geotérmico se mezclan en los mantos someros, re-equilibrándose con los mismos.

Las concentraciones de gases en las zonas donde afloran (Cumbre del volcán El Hoyo y el Cerro Colorado) permiten estimar una temperatura en el rango de 270°C – 290°C.

Tomando en cuenta la información generada en el presente trabajo, las zonas promisorias para la existencia del recurso geotérmico están ubicadas en el sector este del volcán El Hoyo, en Cerro Colorado y la Caldera de Galán. Se propone una zona upflow en la ladera este del v. El Hoyo, una zona de outflow de fluidos en la zona del Cerro Colorado proveniente de la parte este del complejo El Hoyo y circulan a lo largo de la de la planicie central de la zona, y descargan al sur a través del sistema de fallas N-S, generando en algunos sectores manifestaciones termales que descargan hacia el Lago de Managua.

Es probable la existencia de un sistema de Upflow que asciende por la caldera de Galán, dicho sistema es aislado por el fallamiento NE-SW; sin embargo, dicha zona de ascenso no ha sido comprobada hasta el momento.

Dadas las concentraciones de isotopía de la zona de estudio, se vuelve muy complicado definir la altura de la infiltración utilizando el método gráfico, ya que hay mucha dispersión en los datos, lo que reduce significativamente el coeficiente de correlación aumentando el porcentaje de error para la estimación de una tendencia en los mismos.

Recomendaciones.

Se sugiere realizar el análisis y reinterpretación de los datos generados en este informe con los resultados que se obtuvo en la exploración geotérmica ejecutada por la empresa GONICA en el área, lo permitirá tener una visión acertadas de la estructura del sub suelo y de lineación con más exactitud del área más promisoría para el desarrollo geotérmico del área.

Realizar levantamiento empleando la técnica de gases difusos en el área, con los resultados del mismo se podrá localizar e identificación de estructuras (fallas y fracturas) permeables las que posiblemente permitan la circulación de fluidos geotérmicos de alta temperatura.

Realizar un estudio isotópico de la precipitación pluvial en el área, a fin de determinar las zonas de infiltración de fluidos y las zonas de recarga en toda el área. La metodología para realizar este estudio debe planearse con mucho cuidado, ya que por lo general, este tipo estudio tienen una duración de varios años.

Realizar dataciones radiométricas de muestras representativas de cada unidad litológica definida en este trabajo y realizar análisis geoquímicos y petrográficos de muestras de rocas pertenecientes a las unidades litológicas para determinar con mejor precisión el tipo de roca.

Generar un modelo integrado 3G, que incluyan todos los resultados de las investigaciones desarrolladas en el área, lo que permita ubicar áreas (objetivos) de perforación prioritarios para validar y evaluar el sistema geotérmico en el sub suelo del área.

12. Agradecimientos.

A las instituciones Universidad de las Naciones Unidas, Universidad Nacional de El Salvador, Fondo Nórdico para el Desarrollo y LaGeo S.A de C.V, por brindarnos la oportunidad de participar en este Diplomado edición 2018.

A los profesores que han transmitido su experiencia técnica y profesional, en especial a nuestros tutores Lic. María Inés Magaña e Ing. Marvyn Oziel García.

13. Referencias bibliográficas.

Badilla, E., et al., 2001. Fotogeología De Los Complejos Volcánicos El Hoyo y Asososca (Nicaragua). Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, Revista Geológica de América Central, 24: 79-86, 2001.

Comisión Nacional de Energía, 2001. Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, Volumen V: Evaluación del área de San Jacinto-Tizate. Nicaragua: CNE.

Comisión Nacional de Energía, (2001). Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua. Volumen VII. Evaluación del área de Momotombo Managua. Nicaragua: CNE.

Comisión Nacional de Energía, (2001). Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua. Volumen VI. Evaluación del área de El Hoyo – Monte Galán. Nicaragua: CNE.

DeMets C., 2001. A new estimate for present-day Coco- Caribbean plate motion: Implications for slip long the Central American volcanic arc: Geophysical Research Letters, v. 28, no. 21, p. 4043–4046, doi: 10.1029/2001GL013518.

Frischbutter, A. (2002). Structures of the Managua Graben, Nicaragua, from remote sensing images.

Giggenbach W.F. 1991. Chemical Techniques In Geothermal Exploration. Chemistry Division, Dsir, Private Bag

Hodgson, G. (2000). Geología Regional de Nicaragua, Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua.

Hodgson, G. (2002). Geología Histórica e Historia Geológica Estructural, Tectónica simplificada de Nicaragua y América Central, 2da Edición.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2004. Hoja Topográfica de La Paz Centro, número 2853 II.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2004. Hoja Topográfica de Malpaisillo, número 2853 I.

Kuang, J., (1971). Estudio geológico del Pacífico de Nicaragua. División de Geología. Catastro e Inventario de Recursos Naturales de Nicaragua. Informe 10. Managua.

La Femina P., Dixon T., and Strauch W., 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua: Geology, v.30, p. 751–754, doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0751: BFIN>2.0.CO; 2.

La Femina P. C., 1997. Monitoring of soil mercury and soil gas radon and carbon dioxide at two active volcanoes: Cerro Negro and Telica, Nicaragua. Florida International University, Miami, Florida. USA. MS Thesis.

OLADE, 1982. Aprovechamiento de los recursos geotérmicos de la República de Nicaragua. Estudio de Prefactibilidad del área El Hoyo - San Jacinto.

Ostapenko S. V., S. V. Spektor, y Y. P. Netesov, 1998. San Jacinto - Tizate geothermal field, Nicaragua: exploration and conceptual model. Geothermics, Vol. 27, No. 3, pp. 361-378.

Martínez, S., Murillo., 2015. "Cartografía Geológica-Estructural Con Fines De Exploración Geotérmica En La Zona Oeste De La Concesión San Jacinto–Tizate. Tesis grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. UNAN - Managua. 2015.

Powell, T. (2000). A review of Exploration Gas Geothermometry. Universidad de Stanford, California.

Powell, T., y Cumming, W., (2010). Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry. Universidad de Stanford, California.

Quijano, J., 2007. Manual De Geotermia, Ciencias De La Tierra E Ingeniería De Reservorios. Biblioteca Digital Cfe – Gpg. 2007.

Servicio Geológico Checo e INETER, 2000. "Estudio geológico y reconocimiento de la Amenaza geológica, en el área de León, La paz Centro y Malpaisillo, Nicaragua. Managua, Nicaragua.

Sevilla, S. 2016. Mapa Metalogenético de Nicaragua. Tesis grado. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. UNAN - Managua. 2016.

Van Wyk de Vries B., 1993. Tectonics and magma evolution of Nicaraguan volcanic systems. Thesis (Doctoral), Department of Earth Sciences, the Open University, September 1993, 328 pp.

Venugopal, Swetha & Moune, Séverine & Williams-Jones, Glyn. (2016). Investigating the subsurface connection beneath Cerro Negro Volcano and the El Hoyo Complex, Nicaragua. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 325. 211–224. 10.1016/j.jvolgeores.2016.06.001.

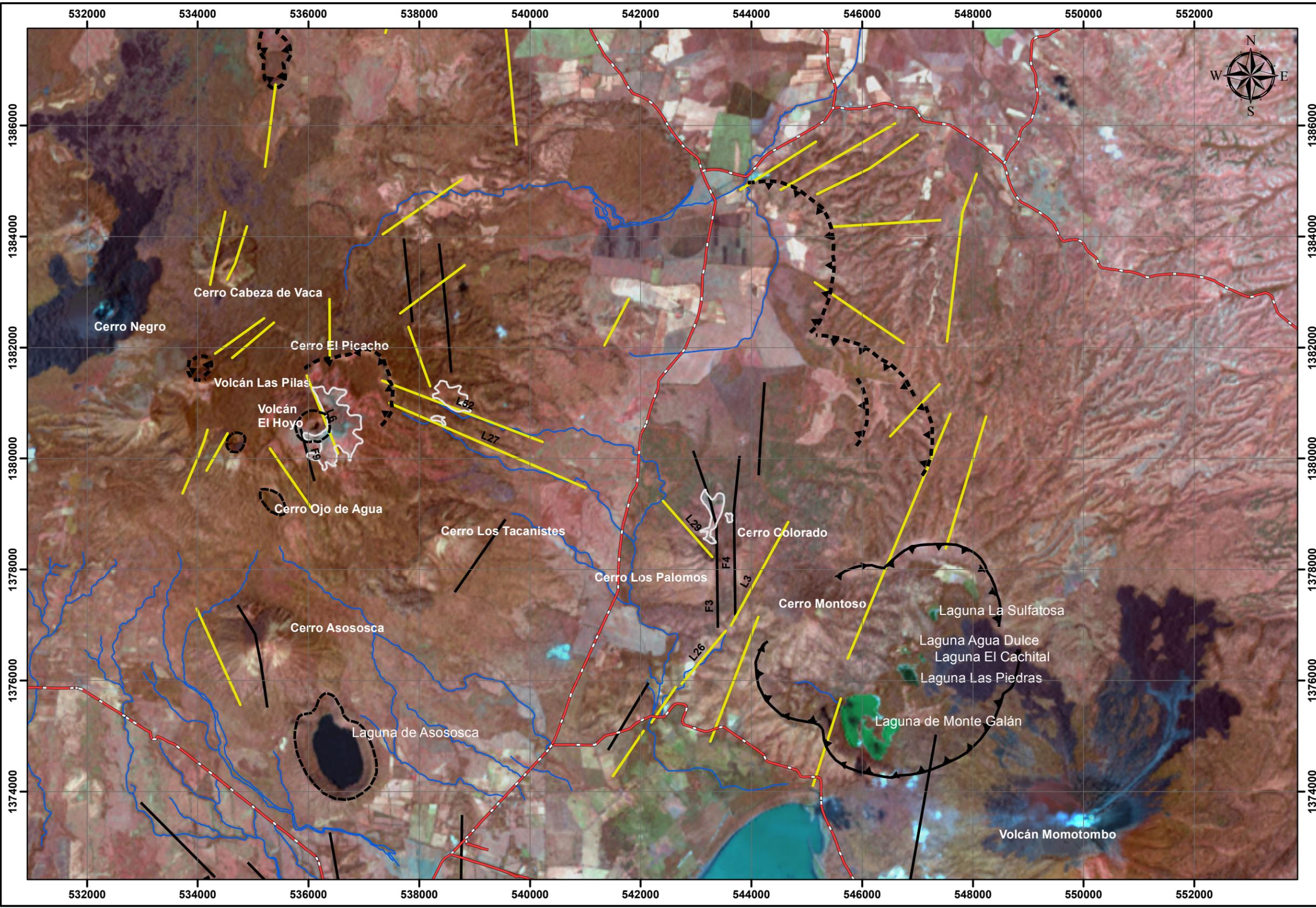


14. Apéndices (gráficas y datos adicionales).

Macro Localización



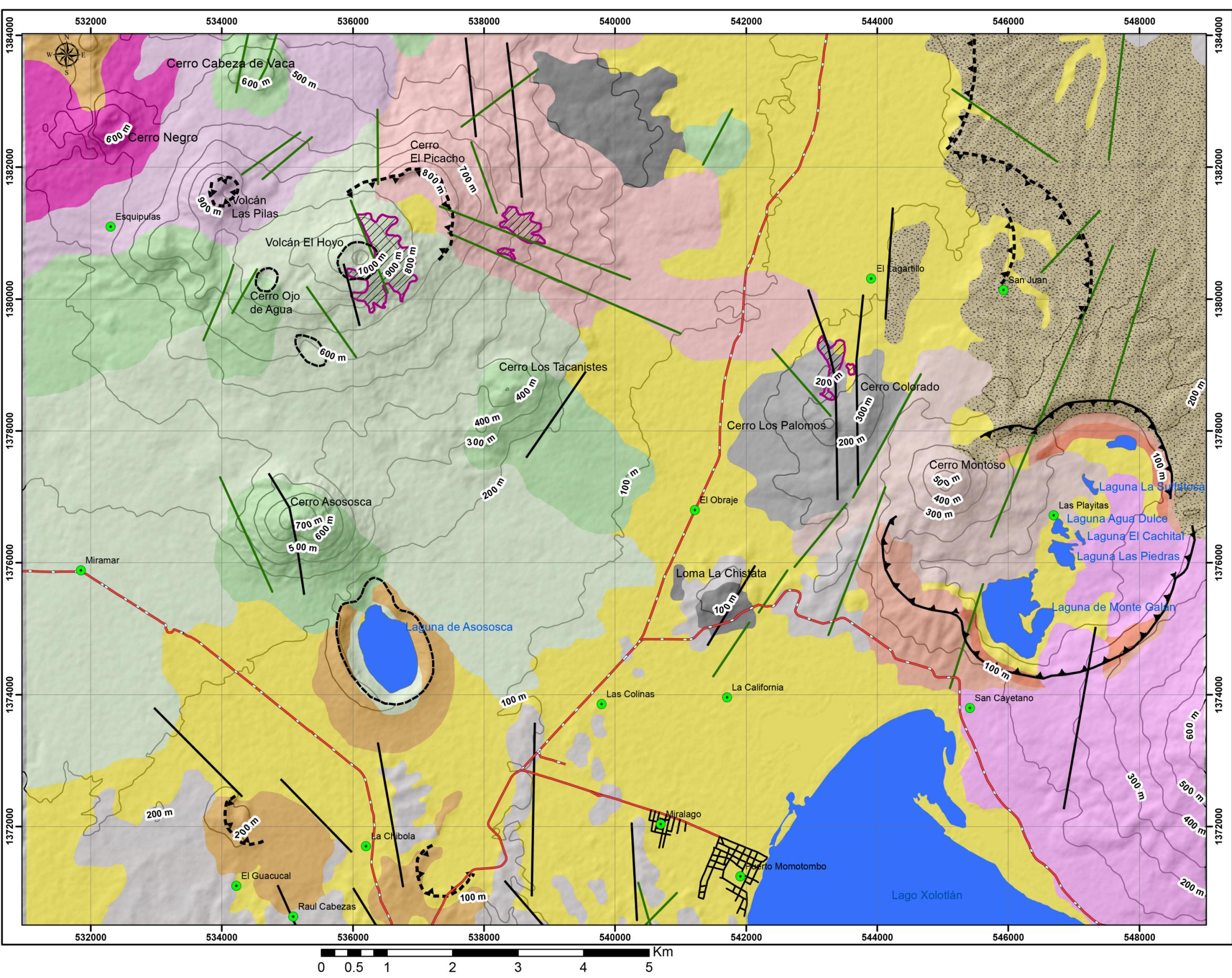
Leyenda



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 16N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA EDICION 2018			
Propuesta de modelos geológico y geoquímico de un área geotérmica en Nicaragua.			
Mapa Estructural Área Geotérmica de Nicaragua - Imagen Landsat 8_ combinacion 432			
Elaborado por: Martínez, K & Hernández E.	Revisado por: Magaña & García		
Recopilado: PMGN, 2001; Kuang, J et al.1980	Escala: 1:50 000	Fecha: 21/11/2018	Modificado por: Martínez, K & Hernández E.

Figura 39: Mapa estructural del área El Hoyo - Monte Galán



Leyenda

Litología

Depósitos Superficiales

- Planicies Aluvionales y Lacustres; Abanicos Aluvionales; Coluvial

Complejo Volcánico Momotombo - Galán

- Edificio Volcánico De Momotombo
- Edificio Cerro Montoso (Post-Caldera)
- Depósitos De Material Volcánico Retrabajado
- Tobas Del Edificio De Galán
- Plateau Lávico Galán - Guatusa
- Conos De Escorias

Complejo Volcánico De El Hoyo

- Edificio Del Volcán Cerro Negro
- Edificio Del Volcán Las Pilas
- Edificio Del Volcán El Hoyo
- Edificio El Picacho
- Edificios Pre - Picacho
- Edificios Volcánicos Menores
- Conos Piroclásticos Y Edificios De Explosión Freática

Escudo Ignimbrítico De Malpaisillo

- Productos No Diferenciados

Estructuras

- Lineamiento Morfológico
- Estructura Circular
- Estructura Semicircular
- Caldera
- Trazo de Falla
- Zona de alteración termal

Símbolos Convencionales

- Cuerpos de Agua
- Ríos
- Carretera principal

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA EDICION 2018

Propuesta de modelos geológico y geoquímico de un área geotérmica en Nicaragua.

Mapa Geológico Área Geotérmica de Nicaragua

Elaborado por: Martínez, K; Hernández E.

Revisado por: Magaña & García

Recopilado: PMGN, 2001; Kuang, J et al.1980

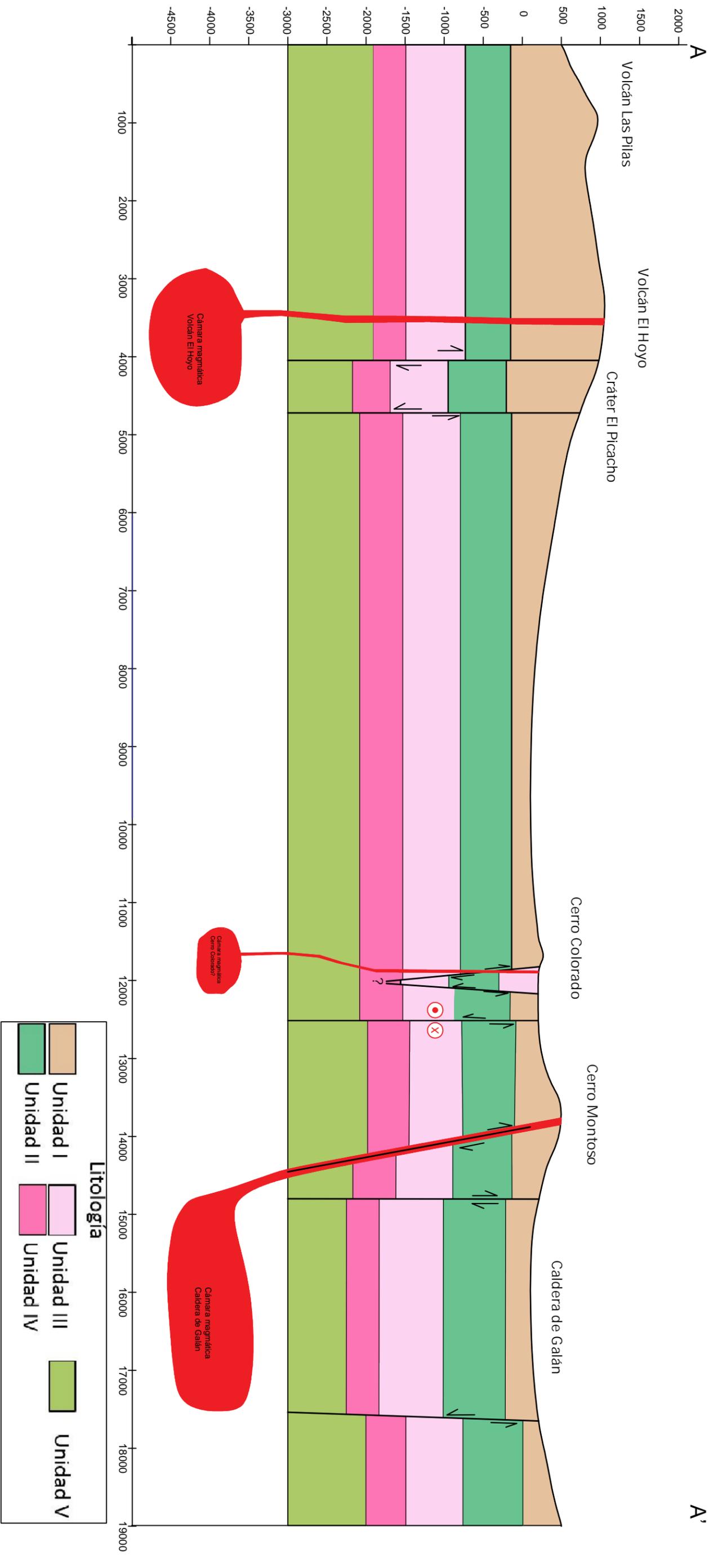
Escala: 1:50 000

Fecha: 21/11/2018

Figura 40: Mapa geológico - estructural del área El Hoyo - Monte Galán

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 16N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

Figura 41: Sección geológica del área El Hoyo - Monte Galán.



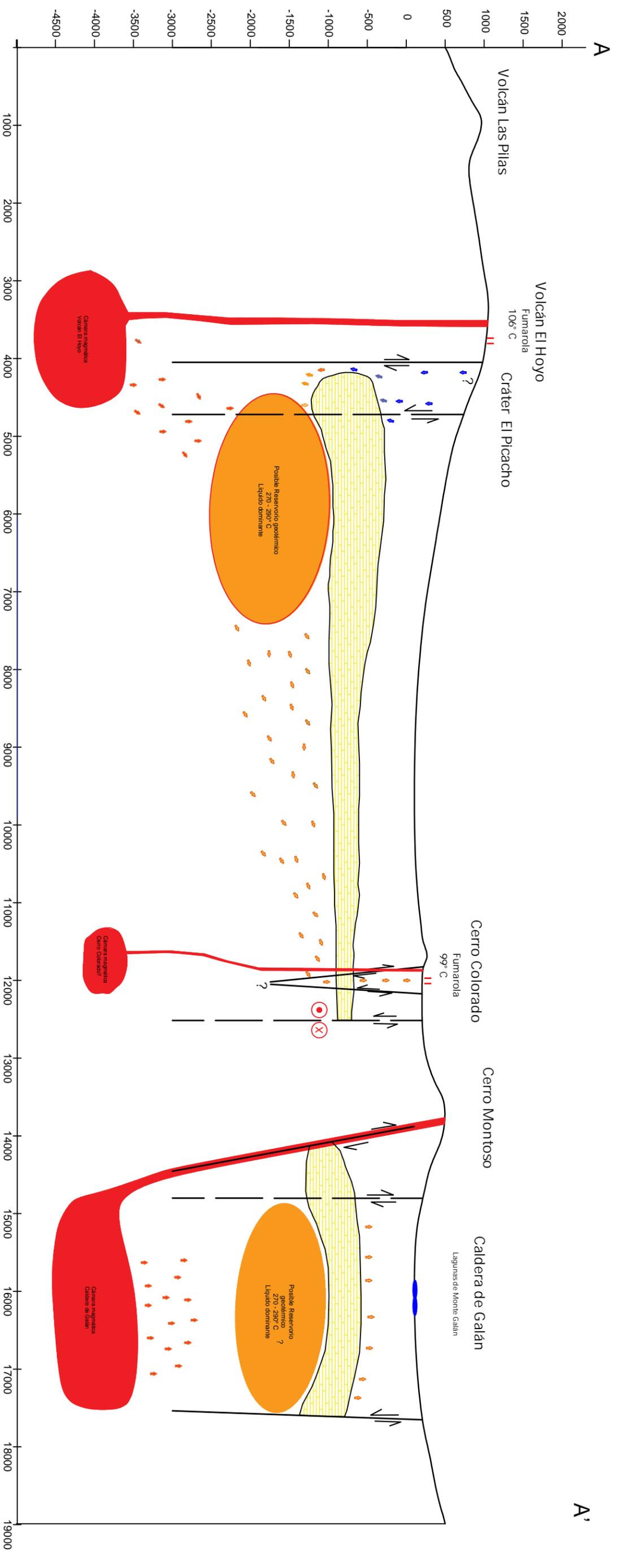


Figura 42. Modelo geológico y geoquímico del área El Hoyo-Monte Galán.