

PROGRAMA REGIONAL DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO (PREG)

Diplomado de Especialización en Geotermia-2015

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Postgrados

LaGeo



Caracterización e interpretación de estructuras geológicas y fumarolas a través de las emanaciones difusas en un área geotérmica de alta entalpía.

Por :
Hernández, Jacqueline Beatriz
Landaverde, Bessi Maricela
Chávez Molina, Liliana M.

Área de Estudio: Geoquímica y Socio Ambiental

*Tutores: Ing. María Inés Magaña
Ing. Luis Franco*

Presentado: 30 de Octubre de 2015

Contenido

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN.....	4
OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
I. DESARROLLO DEL ESTUDIO	6
1.1 GENERALIDADES	6
1.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS.....	6
1.3 FUMAROLAS	6
1.4 DESGASIFICACIÓN DIFUSA	7
1.4.1 FENÓMENOS DE TRANSPORTE QUE RIGEN LA DESGASIFICACIÓN A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS.....	7
1.5 GASES EN ESTUDIO.....	8
1.5.1 Dióxido de carbono (CO ₂).....	8
1.5.2 Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S).....	9
1.5.3 Radón 222-Rn y Torón (220-Rn)	9
1.5.4 Mercurio (Hg)	10
1.5.5 Helio (He).....	11
1.5.6 Hidrógeno (H ₂).....	12
1.6 MÉTODOS ESTADÍSTICOS A APLICAR.....	12
II. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	14
III. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	16
3.1. COMPARACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DESGASIFICACIÓN EN EL ÁREA GEOTÉRMICA DE ALTA ENTALPÍA CON SU REFERENCIA ESTADÍSTICA	16
3.2. ESTUDIO DE LOS COMPLEJOS FUMARÓLICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LA DETERMINACIÓN DE RIESGOS POR EXPOSICIÓN DE GASES A LA COMUNIDAD.	28
3.2.1. Monitoreo de Inmisiones Fumarólicas	28
3.2.2 Resultados de mediciones en campo	30
3.2.3 Exposición de los Gases Geotérmicos y su relación con el Medio Ambiente	31
3.2.4 Legislación Aplicable.....	35
3.2.5 Riesgo por Exposición, según resultados	37
IV. CONCLUSIONES	46
V. RECOMENDACIONES	47
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	48
VII. ANEXOS	50

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de caracterizar e interpretar estructuras geológicas y fumarolas a través de las emanaciones difusas en un área geotérmica de alta entalpía tomando una referencia estadística que da un grado de confiabilidad a los resultados que permiten identificar estructuras geológicas; además se destaca la importancia del estudio del comportamiento del sulfuro de hidrógeno y del mercurio en el ambiente así como probables efectos a la salud de poblaciones aledañas a dichas emanaciones. La caracterización de anomalías a través de gases difusos busca enriquecer técnicas asociadas a la exploración por lo tanto se considera como una herramienta complementaria a las utilizadas tanto por geoquímica como por el resto de disciplinas geocientíficas (Geología y Geofísica) para la identificación de zonas que potencialmente pueden ser consideradas como benéficas para el desarrollo de un futuro campo geotérmico, el cual puede ser aprovechado comercialmente para generación de energía eléctrica. Los estudios como el presente, permiten la identificación de zonas con alta permeabilidad que poseen potencial para la explotación geotérmica, a través del estudio de las emanaciones difusas y la detección de anomalías.

Según resultados obtenidos en esta investigación se infiere la existencia de posibles estructuras geológicas en el área Norte tanto en el Este como Oeste, donde se muestran la mayor concentración de gases como el He, Hg, CO₂, indicando una zona permeable que permite la emanación de fluidos a la superficie, por lo tanto la geoquímica de gases difusos en relación con otras ciencias como geología y geofísica son un excelente aporte en la exploración de campos geotérmicos.

Además se presenta el estudio de las emanaciones de H₂S y Hg en el medio ambiente para determinar el riesgo por exposición. Se utilizó como herramienta de análisis, gráficos basados en las mediciones de H₂S y Hg realizadas en la gira de campo a diferentes distancias con respecto a la fuente y en puntos situados en las comunidades cercanas, tomando como base la Norma Ambiental OMS en la cual se indican los valores máximos permisibles del H₂S que es de 0.102 ppm en 24 horas y de 1 µg/m³ en un año; lo cual manifiesta que los datos del campo geotérmico de alta entalpía en estudio no sobrepasa los límites establecidos por lo tanto se descartan daños a poblaciones aledañas por no considerarse contaminante a las concentraciones de estudio.

INTRODUCCIÓN

El Salvador se caracteriza por estar en una zona donde el volcanismo y la actividad tectónica no son extraños. Recientemente, la cadena volcánica salvadoreña ha tenido gran actividad, y aunque un volcán posee un gran potencial destructivo, también es capaz de generar recursos que pueden ser aprovechados para el bienestar común.

Esta actividad volcánica se manifiesta en superficie a través de la desgasificación difusa de suelos en sistemas hidrotermales como fumarolas, géysers, pozas de lodo, entre otros, y éstos son indicadores que al estudiarse cuidadosamente, pueden permitir la ubicación de flujos subterráneos que denoten estructuras geológicas.

Actualmente, la medición de gases en suelo representa una señal geoquímica proveniente de las capas más profundas del suelo que evidencia los cambios que se producen en los sistemas geológicos (Delgado, H.), manifestados en actividad de volcanes, actividad de fallas, fractura de sistemas, trayectoria de flujos verticales de reservorios calientes, etc.

En el presente trabajo dan a conocer los resultados del estudio de emanaciones difusas en un área geotérmica de alta entalpía con la finalidad de conocer el comportamiento de estos gases y determinar a través de ellos estructuras geológicas.

Se realiza un tratamiento estadístico descriptivo e inferencial lo cual permite confirmar la existencia de estructuras con referencia cuantitativa que será una metodología práctica y útil para aplicaciones en el campo de la geotermia.

Así mismo, se determina el impacto socio ambiental de las emisiones de estos gases a través de las inmisiones que se midan en las comunidades cercanas a los puntos de monitoreo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar emanaciones difusas a fin de determinar estructuras geológicas y riesgos ambientales en el área geotérmica en estudio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar mapas de gases difusos de la zona de estudio.
- Identificar posibles estructuras geológicas por medio del análisis de las emanaciones difusas en suelo.
- Realizar análisis estadístico descriptivo e inferencial para definir estructuras.
- Identificar riesgos ambientales que puedan representar las emanaciones caracterizadas en fumarolas identificadas en la zona de estudio.

I. DESARROLLO DEL ESTUDIO

1.1 GENERALIDADES

Los volcanes emiten importantes cantidades de gases a la atmósfera a través de sus manifestaciones visibles como penachos, fumarolas y hervideros, pero numerosos trabajos de investigación realizados durante los últimos 20 años reflejan que importantes tasas de emisión de gases pueden también ocurrir a través del ambiente superficial de los sistemas volcánicos de una forma no visible, difusa, dispersa y silenciosa. Este último tipo de manifestación se conoce también como emanaciones volcánicas difusas.

1.2 ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

Algunos autores definen como estructuras geológicas a las fallas, pliegues y diaclasas por dar un ejemplo, mientras que otros autores hacen referencia hacia las mismas citando a los graben. Analizando cada punto de vista, encontramos que estas estructuras se relacionan una de las otras, puesto que todas son producto de los esfuerzos a los cuales se someten las rocas en la corteza terrestre, es por ello que si analizamos el termino estructura (del latín structūra) esta se refiere a la disposición y orden de las partes dentro de un todo, por lo cual se debería considerar entonces como estructura geológica al conjunto de eventos tectónicos que originan una particularidad en las rocas.

1.3 FUMAROLAS

Las fumarolas normalmente son descargas convectivas directas de la fase vapor de un reservorio de alta temperatura; sin embargo, en ciertos casos éstas se originan del desprendimiento de vapor de una descarga líquida en ascenso o de un reservorio secundario de menor temperatura.

Estas se pueden producir a lo largo de pequeñas grietas, o a lo largo de fisuras, o sobre la superficie de flujos de lava y depósitos espesos de flujos piroclásticos. Si estas se encuentran sobre una fuente constante de calor, pueden persistir durante décadas o siglos; pero también pueden desaparecer en semanas o meses si se producen sobre un volcán nuevo que se enfría rápidamente.

Según un reporte realizado por el Centro de Estudios de Castilla-La Mancha, en el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, "Las fumarolas emiten tanto gases magmáticos como vapor de agua generado por calentamiento de los acuíferos por contacto de las rocas confinantes con la intrusión de magma".

Actualmente en El Salvador, algunas zonas donde se pueden apreciar las fumarolas son impulsadas como lugares turísticos, que ofrecen a los visitantes la magnífica experiencia de disfrutar las emanaciones de vapor y aguas termales provenientes de las fumarolas.

1.4 DESGASIFICACIÓN DIFUSA

El estudio de la desgasificación difusa en sistemas volcánicos es empleado para identificar los gases emanados por una fuente magmática profunda, que eventualmente son parte activa de los sistemas hidrotermales en superficie y son liberados a la atmósfera (Gutiérrez, 2009).

La desgasificación es un proceso continuo, debido a que los gases son emitidos de forma constante por todos los diferentes tipos de magma. La mayoría de los volcanes activos liberan gases volcánicos como una expresión en superficie de este fenómeno de desgasificación en forma de plumas, actividad discreta de fumarolas y la desgasificación difusa en el suelo.

Los gases liberados por volcanes son una mezcla de componentes provenientes de al menos dos fuentes distintas: a) Una fuente magmática liberando compuestos volátiles hacia las rocas, y, b) Vapor que se separa desde fluidos externos (Dietrich *et al.*, 2003).

Éstos últimos pueden ser fluidos meteóricos, aguas subterráneas, o aguas de mar que circulan alrededor de los conductos magmáticos a través de medios porosos o fracturas. La fuerza detrás de este movimiento es el gradiente de temperatura entre la fuente magmática y la superficie, lo que se evidencia por las emisiones fumarólicas (Dietrich *et al.* 2003).

Se han realizado estudios alrededor del mundo, sobre la importancia de caracterizar la desgasificación difusa, puesto que son buenos trazadores de zonas de permeabilidad del suelo (Chiodini *et al.*, 1995; Magaña *et al.*, 2004; Fu *et al.*, 2005).

1.4.1 FENÓMENOS DE TRANSPORTE QUE RIGEN LA DESGASIFICACIÓN A TRAVÉS DE MEDIOS POROSOS.

La desgasificación de gases volcánicos puede ocurrir de tres formas distintas: a) difusión, b) advección y, c) convección.

1.4.1.1 Difusión

Si el transporte se da por difusión a través de un medio estacionario, el flujo difuso constante (φ_d) es proporcional al gradiente de concentración ($dC/d\lambda$), tal como lo expresa la primera Ley de Fick:

$$\varphi_d = -vD(dC/d\lambda)$$

Donde v representan la porosidad del suelo y el coeficiente de difusión, respectivamente. El signo menos indica que las moléculas de gas se desplazan de zonas donde hay mayor concentración, hacia zonas donde hay menos concentración.

1.4.1.2 Advección

Si el transporte se da por advección, esto involucra el movimiento de materia resultado de la acción de una fuerza, lo que implica, un gradiente de presión ($dP/d\lambda$). El flujo advectivo (φ_a), se describe entonces por la Ley de Darcy:

$$\varphi_a = (k/\mu)(dC/d\lambda)$$

Donde k es la permeabilidad específica, y μ es la viscosidad del fluido, suponiendo que estos son incompresibles (Scheidegger, 1974).

1.4.1.3 Convección

El transporte por convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura.

1.5 GASES EN ESTUDIO

1.5.1 Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, ligeramente soluble en agua, y tiene una densidad de 1.799 g/L (Lide, 2005).

El estudio de los flujos de dióxido de carbono es una de las técnicas de exploración geoquímica ya que éste gas es uno de los más abundantes en sistemas geotermales asociados a volcanismo.

La medición de los flujos de dióxido de carbono en los suelos es una herramienta para cuantificar los cambios en la actividad geotermal en superficie. Además el estudio de este gas tiene aplicaciones ambientales, ya que la medición del flujo de las emanaciones naturales de este gas permite generar una línea base, que puede ser comparada con las emisiones artificiales y estimar posibles aumentos en las cantidades

El origen de este gas en sistemas geotermales es debido a reacciones químicas que se dan en las rocas carbonatadas, en algunos minerales, en rocas sedimentarias no carbonatadas, en la materia orgánica presente en sedimentos; o puede ser de origen magmático (éste representa la mayor cantidad emitida) (Fridriksson, 2009b).

El dióxido de carbono es el gas más abundante (hasta un 95%), en vapor seco a alta temperatura, y es utilizado de forma efectiva como un trazador de desgasificación del magma debido a su baja solubilidad en fundidos de silicatos y a su presión moderada (Gutiérrez, 2009).

Según Fridriksson (2006), la medición de la concentración de dióxido de carbono en el vapor liberado, permite cuantificar directamente el flujo de vapor y el flujo de calor, a partir de los flujos de dióxido de carbono medidos en el sistema hidrotermal.

La medida de fondo que se ha estimado para el flujo de CO₂ en la región es de 10 g/m²-día, que corresponde a aproximadamente 1.13 ppm/s.

En los puntos donde se mide la concentración de este gas, se espera un valor superior a la medida atmosférica que corresponde a 456 ppm aproximadamente. Si se reportan valores por encima del mismo, se va a considerar como una anomalía.

De acuerdo a Padrón *et al.* (2003), Magaña *et al.* (2004) y López *et al.* (2004), el dióxido de carbono emitido en sistemas hidrotermales sirve para identificar zonas donde se presentan anomalías, que usualmente coinciden con zonas donde hay una gran permeabilidad vertical, o sea, que se produzca un mayor flujo de fluidos hidrotermales desde el reservorio hacia la superficie, que podrían indicar zonas permeables donde el agua rica en CO₂ se mueve con facilidad. Esto es confirmado por estudios realizados en el sur de Taiwán, donde el estudio de los flujos de dióxido de carbono permitió identificar fallas enterradas, por lo que es claro que el estudio de este gas tiene un rol importante en la localización y evolución de flujos hidrotermales a diferentes profundidades (Gutiérrez, 2009).

1.5.2 Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, muy tóxico e inflamable. Posee una densidad de 1.393 g/L (Lide, 2005).

Este gas puede ser de origen magmático, es un gas muy reactivo ya que en muchos sistemas es producto de pirólisis a partir de las rocas, es decir forma compuestos azufrados en superficie, ya que durante su ascenso va exponiéndose a los procesos de óxido reducción, formando minerales como la piritita y anhidrita. Está en un alto contenido en vapor separado a alta temperatura.

El sulfuro de hidrógeno gaseoso es muy reactivo por tanto no siempre es posible detectarlo como flujo, sin embargo las concentraciones *in situ* a 50 cm de profundidad sí dan algunos resultados de interés en el área de fumarolas. El gas H₂S es originado por la alteración de rocas en el reservorio o directamente de la fuente magmática. (Magaña, 2010).

El H₂S es un gas reactivo que al interactuar con las rocas genera sulfuros de hierro así como sulfatos de elementos alcalinotérreos. Su solubilidad es mayor que la del CO₂ por lo cual se enriquece en la fase líquida a medida que el flujo avanza (Gutiérrez, 2008).

1.5.3 Radón 222-Rn y Torón (220-Rn)

El Radón es un elemento gaseoso incoloro e inodoro, radioactivo por ocurrencia natural, que se produce continuamente debido al decaimiento del Radio. Es un gas monoatómico de densidad 9.73g/L. (Lide, 2005).

El radón posee 37 isótopos, de los cuáles son de interés el Radón-222, proveniente del Radio, que tiene una vida media de 3.823 días, y es un emisor de partículas alfa; y, el Radón-220, emanado

naturalmente del Torio y llamado Torón, con una vida media de 55.6 segundos, y también es un emisor de partículas alfa (Lide, 2005).

Según Padrón *et al.* (2003), el hecho que se encuentren altas concentraciones de radón y torón en superficie, permite identificar regiones de alta permeabilidad, así como generar conclusiones sobre la velocidad de los flujos relacionados en esa misma región (puesto que la detección del torón está relacionado con flujos de alta velocidad debido a su corta vida media).

El grado de emanación de este elemento en las formaciones geológicas depende de varios factores, entre ellos, la distribución espacial del Radio en el suelo; el área superficial expuesta al decaimiento del radio (las partículas de radón interactúan con el suelo generando partículas alfa); y, el grado de porosidad del suelo así como el tipo de geo fluidos que portan al gas (Stoker *et al.*, 1975; Rodríguez *et al.*, 2003).

Altas concentraciones de Radón en sistemas volcánicos o hidrotermales, indican un transporte de flujos de tipo convectivo; mientras que altas concentraciones de torón, en el mismo tipo de sistemas, indican un transporte de flujos de tipo advectivo (Gutiérrez, 2009).

La presencia de estos gases se espera que se manifiesten en zonas con temperaturas iguales o superiores a los 50°C.

1.5.4 Mercurio (Hg)

El mercurio es un gas magmático asociado con estructuras volcánicas activas, por lo que proviene directamente de la desgasificación de magma saturado. La desgasificación es entonces estudiada en superficie como una herramienta para la exploración de recursos geotérmicos, y la identificación de sistemas hidrotermales. (Bagnato, 2009).

Varekamp y Busseck (1983), sugirieron que el estudio de anomalías de mercurio en superficie da información sobre la posible existencia de patrones de circulación hidrotermal, esto quiere decir, que tales anomalías ocurren cuando los fluidos geotérmicos escapan desde un reservorio profundo hacia la superficie.

Los altos valores de mercurio, en conjunto con datos geológicos, permiten definir los bordes de un reservorio (para su explotación geotérmica), y permiten dar una imagen general sobre la geometría del campo geotérmico.

El mercurio se vaporiza en profundidad, y su emisión se da desde sistemas geotérmicos activos de alta temperatura hacia la superficie, por medio de difusión, a través de regiones permeables (Murray, 1996). El mercurio es entonces inmovilizado por las arcillas y material orgánico en el suelo, por encima del sistema geotermal, pudiendo ser detectado al analizar el material presente en superficie (Van Kooten, 1986).

La medida mínima de Mercurio es 0.003 ppm, a mayores concentraciones puede tener efectos tóxicos al medio ambiente. (Magaña, 2015).

1.5.5 Helio (He)

El helio es un gas noble, incoloro e inodoro, no es tóxico. Después del hidrógeno, es el segundo elemento más abundante en nuestra galaxia. Su densidad es de 0.1785 g/L. El helio natural posee dos isótopos estables: ^3He y ^4He (Lide, 2005).

El gas noble como Helio se utiliza porque son químicamente inertes, tiene múltiples isótopos, baja abundancia natural, su composición en la atmósfera es bien conocida y su solubilidad está bien establecida sabiendo que es función de la temperatura y la presión.

Debido a esta carencia de reactividad química los gases nobles, a diferencia de lo que sucede con otros elementos químicos gaseosos tales como el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el flúor o el cloro, no forman moléculas diatómicas sino que están constituidos por átomos individuales. Asimismo, tal como se desprende de su nombre, en condiciones normales se presentan siempre en estado gaseoso.

Salvo el helio y el radón, el resto de los gases nobles se encuentran en pequeñas cantidades en el aire, de donde se obtienen por destilación del mismo. El helio, por ser muy ligero, no existe en las capas bajas de la atmósfera ya que, aunque se está generando continuamente en las desintegraciones radiactivas que emiten las partículas alfa, que son sus precursoras, emigra inmediatamente a las capas altas de la atmósfera.

En general los gases nobles son inertes y por lo tanto retienen importante información concerniente a su origen, por ejemplo la parte superior del manto o la corteza profunda. Su composición química no se ve distorsionada por subsecuentes reacciones químicas. El considerado como el más importante de los gases nobles es el helio. Es generalmente aceptado que las variaciones de este isótopo con el tiempo se podrían usar para predecir erupciones volcánicas. Como se ha mencionado antes, la principal fuente de helio en gases volcánicos e hidrotermales es el manto, aunque también reciben helio proveniente de la corteza.

De lo anterior se deriva que el helio puede usarse para conocer pequeñas variaciones en el balance entre las contribuciones de volátiles provenientes del manto y de la corteza en gases volcánicos de hasta un 5% (Hilton, 2002).

Padrón *et al.* (2003) estimó que los gases nobles se desplazan hacia la superficie a través de zonas donde existe permeabilidad vertical, por lo que si se pueden desplazar fácilmente por tales zonas, esto sugiere que provienen de fuentes profundas.

Este gas se reporta como un diferencial con respecto a la atmósfera (5.24 ppm) por tanto las concentraciones representan de manera clara el ascenso desde las profundidades de un gas que no reacciona con ningún tipo de roca. Se debe mencionar que por tanto proporciona información sobre ascenso vertical de fluido y regiones de buena permeabilidad. (Magaña, 2010).

1.5.6 Hidrógeno (H₂)

El hidrógeno está presente en la mayoría de los gases magmáticos y debido a su elevada fugacidad escapa rápidamente hacia zonas menos profundas de la corteza. Éstas características convierten al hidrógeno en un excelente trazador de los procesos que tienen lugar en las zonas profundas de la corteza.

1.6 MÉTODOS ESTADÍSTICOS A APLICAR

Los métodos estadísticos a utilizar se basan en la estadística descriptiva e inferencial.

- **Estadística**

Existen muchas definiciones de Estadística, pero en síntesis la podemos definir como la ciencia rama de la Matemática que se ocupa de recolectar, organizar, presentar, analizar e interpretar información cuantitativa para obtener conclusiones válidas, solucionar problemas, predecir fenómenos y ayudar a una toma de decisiones más efectivas.

- **Estadística Descriptiva o Deductiva**

Es un proceso mediante el cual se recopila, organiza, presenta, analiza e interpreta datos de manera tal que describa fácil y rápidamente las características esenciales de dichos datos mediante el empleo de métodos gráficos, tabulares o numéricos.

- **Estadística Inferencial o Inductiva**

Llamada también inferencia estadística, la cual consiste en llegar a obtener conclusiones o generalizaciones que sobrepasan los límites de los conocimientos aportados por un conjunto de datos. Busca obtener información sobre la población basándose en el estudio de los datos de una muestra tomada a partir de ella.

El nivel de confianza es la probabilidad de que el parámetro a estimar se encuentre en el intervalo de confianza.

- **Distribución Normal**

Una distribución normal de media μ y desviación típica σ se designa por $N(\mu, \sigma)$. Su gráfica es la campana de Gauss:

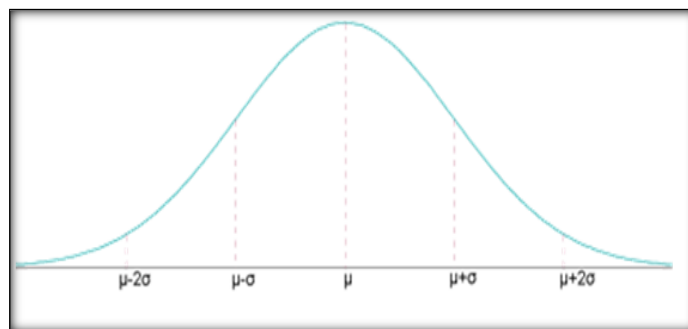


Figura 1. Curva de distribución normal

El área del recinto determinado por la función y el eje de abscisas es igual a la unidad. Al ser simétrica respecto al eje que pasa por $x = \mu$, deja un área igual a 0.5 a la izquierda y otra igual a 0.5 a la derecha.

La probabilidad equivale al área encerrada bajo la curva.

- **El nivel de confianza**

Es la probabilidad de que el parámetro a estimar se encuentre en el intervalo de confianza. El nivel de confianza (p) se designa mediante $1 - \alpha$, y se suele tomar en tanto por ciento.

- **El nivel de significación** se designa mediante α .
- **El valor crítico (k)** como $z_{\alpha/2}$

Distribución normal estándar

La distribución normal estándar, o tipificada o reducida, es aquella que tiene por media el valor cero, $\mu = 0$, y por desviación típica la unidad, $\sigma = 1$.

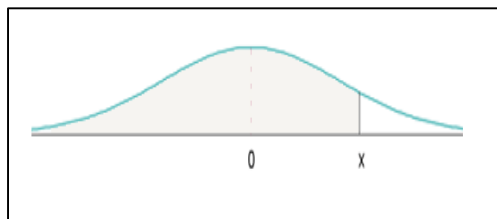


Figura 2. Distribución normal estándar

La probabilidad de la variable X dependerá del área del recinto sombreado en la figura. Y para calcularla utilizaremos una tabla o una función de Excel (INV.NORM.STAND) como en nuestro caso.

Tipificación de la variable

Para poder utilizar la tabla o función de Excel se tiene que transformar la variable X que sigue una distribución $N(\mu, \sigma)$ en otra variable Z que siga una distribución $N(0, 1)$.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Luego se calcula las probabilidades en distribuciones normales donde compara los datos para la toma de una decisión, o sea, se utiliza un solo "miembro" de la familia de distribuciones normales, aquella cuya media es 0 y desviación estándar 1 que es la que se conoce como distribución estándar normal, de forma que todas las distribuciones normales pueden convertirse a la estándar, restando la media de cada observación y dividiendo por la desviación estándar.

II. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

La metodología aplicada a este estudio se lleva a cabo en varias etapas como se presenta a continuación:

Etapla I: Recopilación y ordenamiento de datos, mediciones de H₂S y Hg en poblaciones aledañas a las emanaciones difusas.

Etapla II: Aplicación de estadística descriptiva e inferencial a concentraciones de gases difusos.

La metodología a seguir fue la siguiente:

- Se planteó una hipótesis nula tal que los valores eran iguales al promedio y si es así el dato cae en la distribución normal.
- Se establece la hipótesis alternativa donde la muestra será mayor al promedio, por lo tanto es un dato anómalo
- Luego para corroborar cual es la hipótesis a cumplir se calcula el estadístico de contraste Z en función del promedio y la desviación estándar.
- Luego se determina un valor crítico el cual representara el límite donde los mayores serán anómalos que dependerá del porcentaje de confiabilidad.
- Se compara el estadístico de contraste con el valor crítico y se toma la decisión si es anómalo o valor normal.
- Más específicamente primero, se convierte la distribución real en una distribución normal estándar utilizando un valor llamado Z, o estadístico Z que será la distancia entre un valor seleccionado, designado X, y la media μ , dividida por la desviación estándar σ .
- Formalmente, si $X \sim N(\mu, \sigma)$, entonces la variable:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Se distribuye según una normal de media 0 y desviación estándar 1: $Z \sim N(0,1)$, que es la distribución llamada normal estándar o tipificada. De esta manera, un valor Z mide la

distancia entre un valor especificado de X y la media aritmética, en las unidades de la desviación estándar. Al determinar el valor Z utilizando la expresión anterior, es posible encontrar el área de probabilidad bajo cualquier curva normal haciendo referencia a la distribución normal estándar en las tablas correspondientes.

Etapa III: Elaboración de mapas con software Surfer 12.

Los datos tabulados para cada serie de datos (Años 2005, 2006, 2007, 20013 y 2015) fueron tratados con el programa "Golden Software Surfer 12". En este programa se asignó a cada punto muestreado una coordenada espacial en sistema Lambert; y luego, a cada punto se le asignó un valor (ya sea de concentraciones, o de flujo), con el cual al obtener el conjunto de puntos graficados se obtiene el mapa general para la variable en cuestión.

Se construyeron mapas de flujos de desgasificación de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, así como de concentración de CO_2 , Helio y Mercurio en el suelo, y sobre éstos se superpusieron los mapas actuales de fallas, ya que son el punto de partida para realizar una interpretación de datos correcta.

Etapa IV: Selección de gases que representan mayores concentraciones y mejor identificación de anomalías.

Etapa V. Correlación de concentraciones anómalas estadísticamente con anomalías identificadas en mapas de Surfer 12.

Etapa VI. Comparaciones de H_2S y Hg recopilados en campo y exposición permisible para no causar daños a la salud y ambiente.

Etapa VII: Análisis de Resultados.

III. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. COMPARACIÓN DE MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DESGASIFICACIÓN EN EL ÁREA GEOTÉRMICA DE ALTA ENTALPÍA CON SU REFERENCIA ESTADÍSTICA

MAPAS SELECCIONADOS DEL AÑO 2005

Para todos los gases se aplicó la estadística con un nivel de significancia al 15% y nivel de confianza al 85%.

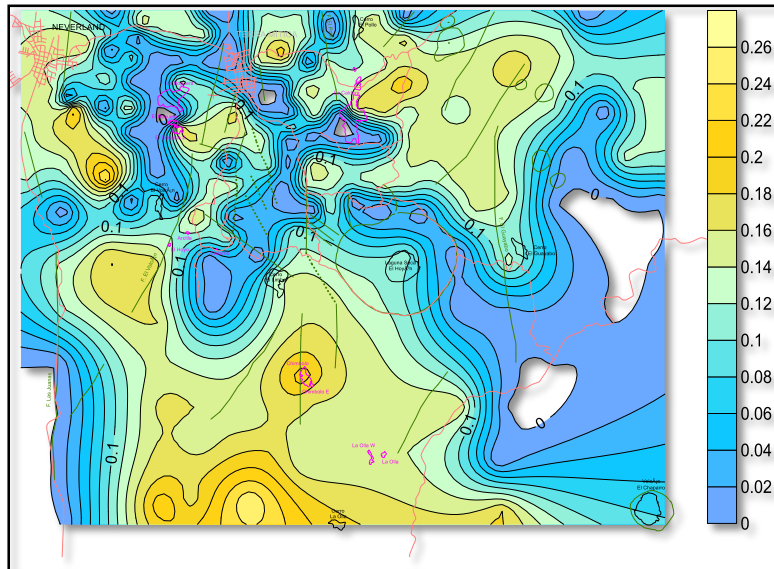


Figura 3. H₂S Total (ppm) sin referencia estadística

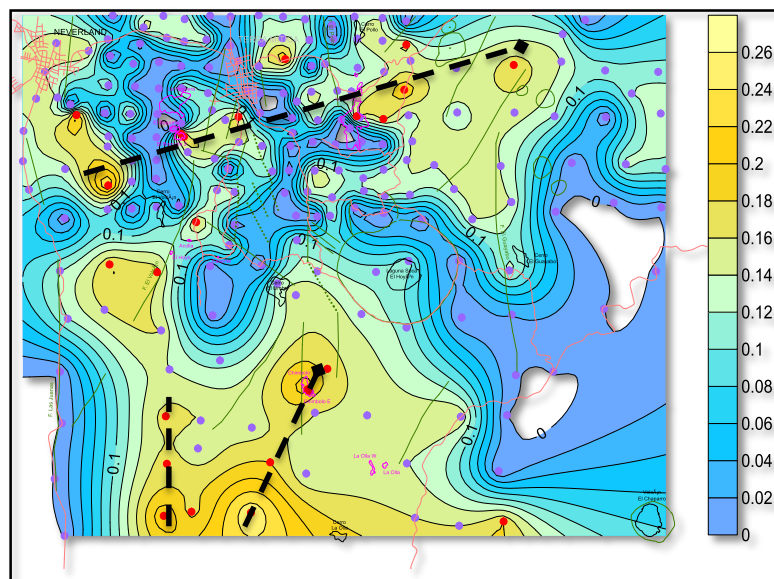


Figura 4. H₂S Total (ppm) con referencia estadística

A un nivel de confianza del 85% la presencia del Sulfuro de Hidrógeno total se observa en mayor proporción al S-O de la Laguna seca, donde es probable la presencia de dos estructuras, la cual una se ubica en orientación N-S y la otra SO-NE, de igual la manera se observa una tercera estructura al NO de la laguna seca en orientación NE-SO; por lo tanto éste indica la posible procedencia de origen magmático.

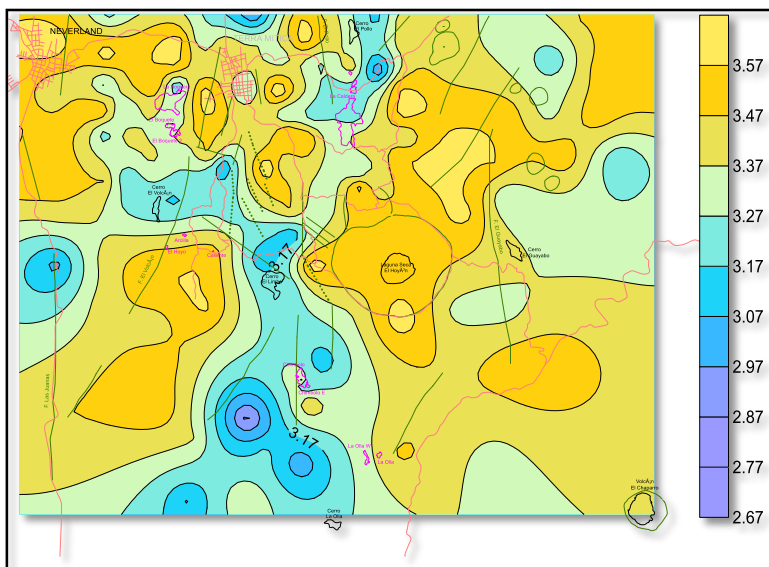


Figura 5. Log [CO₂] (ppm) sin referencia estadística

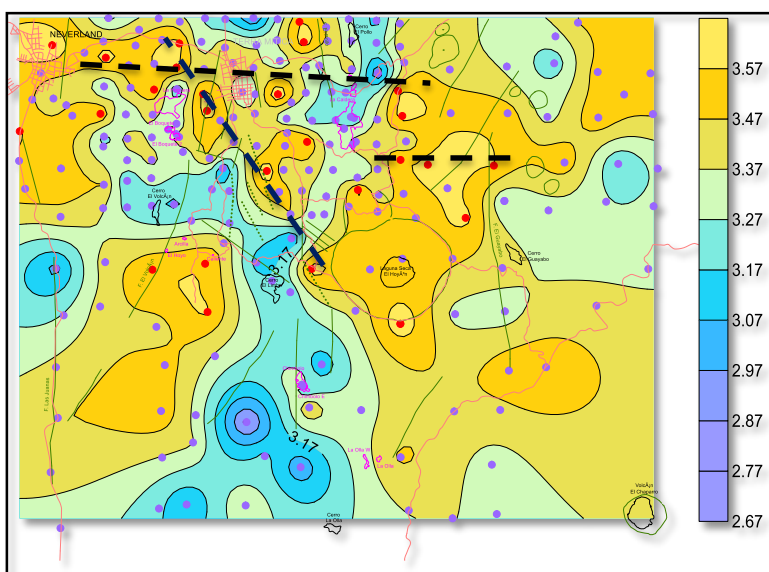


Figura 6. Log [CO₂] (ppm) con referencia estadística

En cuanto al logaritmo de concentración de CO₂, se observa una estructura en orientación NO-SE al Noroeste de la Laguna Seca, además dos estructuras en orientación E-O al Noroeste y Noreste de la misma, es posible que este asociado a fumarolas presentes dentro del área de estudio.

MAPAS SELECCIONADOS DEL AÑO 2006

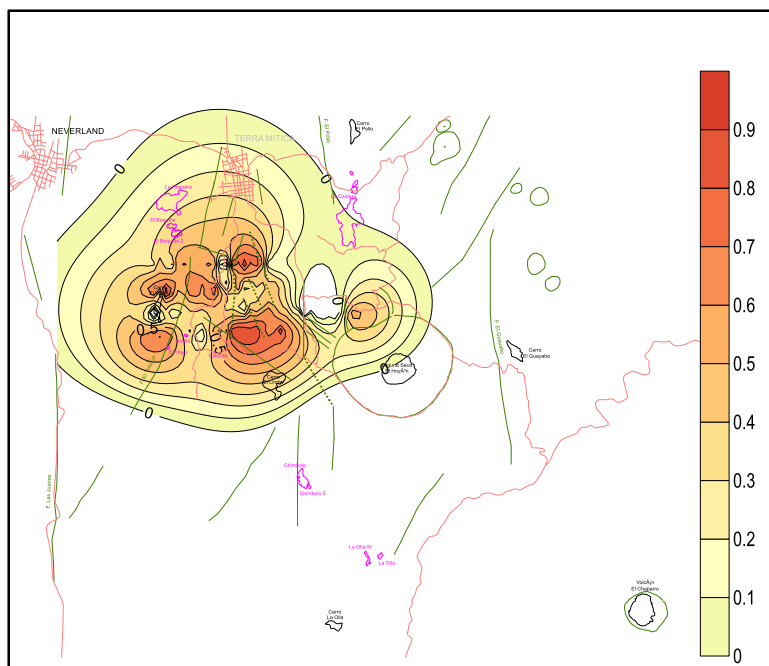


Figura 7. Helio (ppm) sin referencia estadística

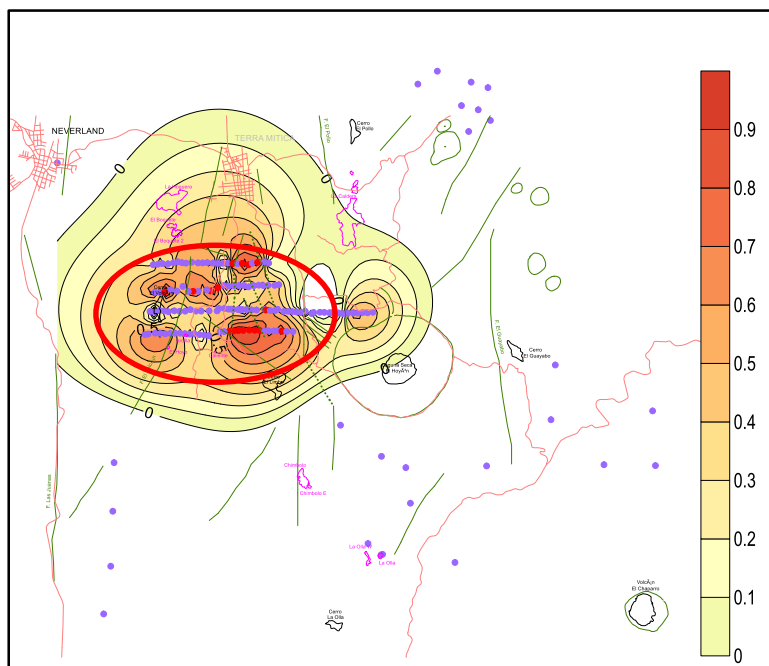


Figura 8. Helio (ppm) con referencia estadística

En la figura 8 se observa una zona anómala al NO de La Laguna seca, por lo tanto el gas Helio es un indicador de la existencia de permeabilidad vertical en la zona.

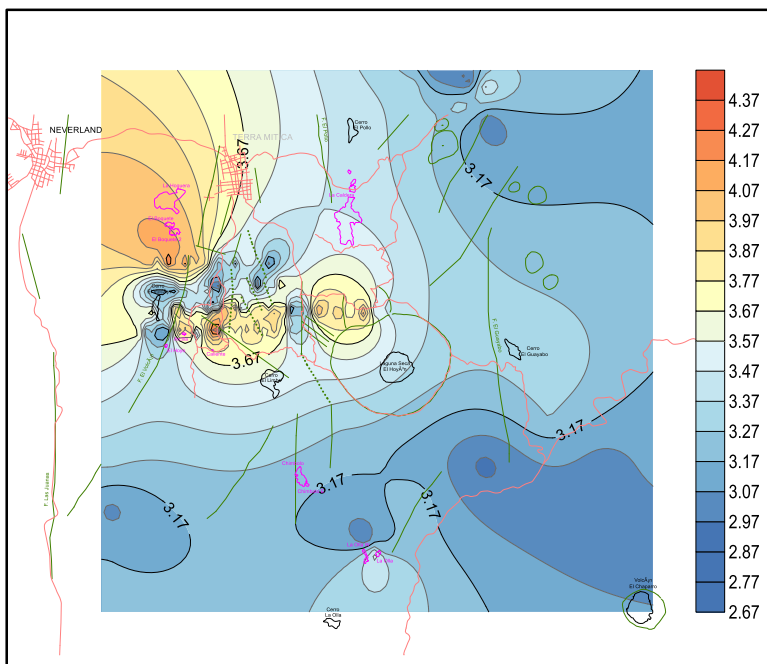


Figura 9. Log [CO₂] (ppm) sin referencia estadística

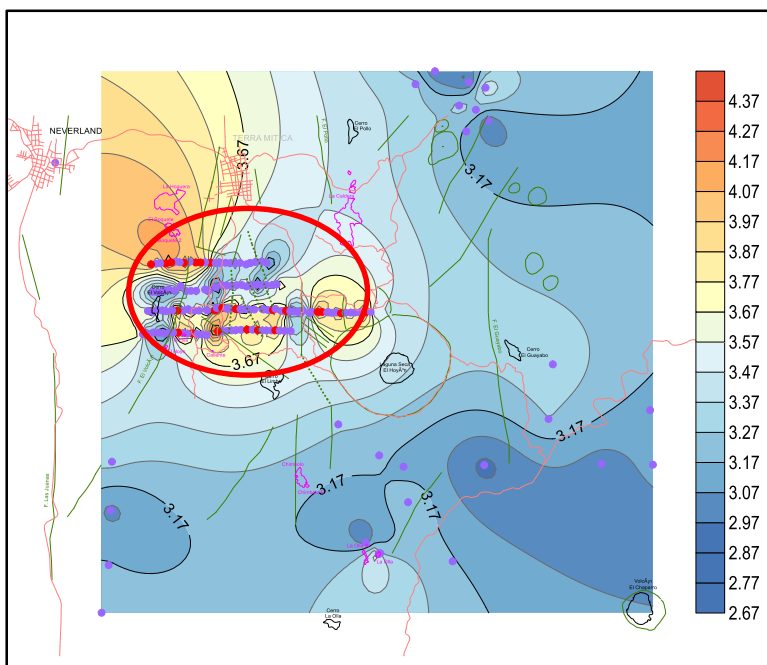


Figura 10. Log [CO₂] (ppm) con referencia estadística

Se observa la presencia del gas CO_2 al NO de la laguna seca, de igual manera se observa la presencia del gas Helio en dicha zona, por lo tanto esa coincidencia nos indica la presencia de anomalías gaseosas.

MAPAS SELECCIONADOS DEL AÑO 2007

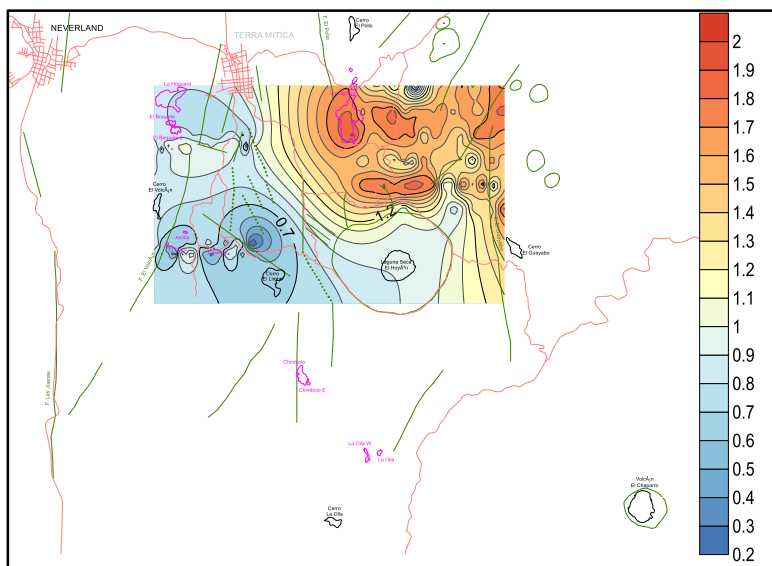


Figura 11. Helio (ppm) sin referencia estadística

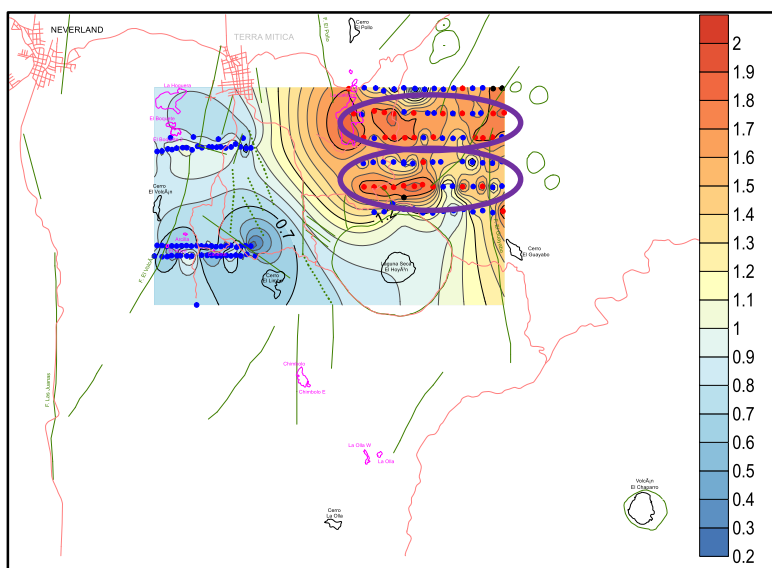


Figura 12. Helio (ppm) con referencia estadística

En la figura 12 se ve la presencia del gas Helio indicando la existencia de zona anómala la cual sugiere dos estructuras en orientación E-O. Este gas nos indica que proviene desde zonas profundas ascendiendo a la superficie por medio de zonas con permeabilidad vertical.

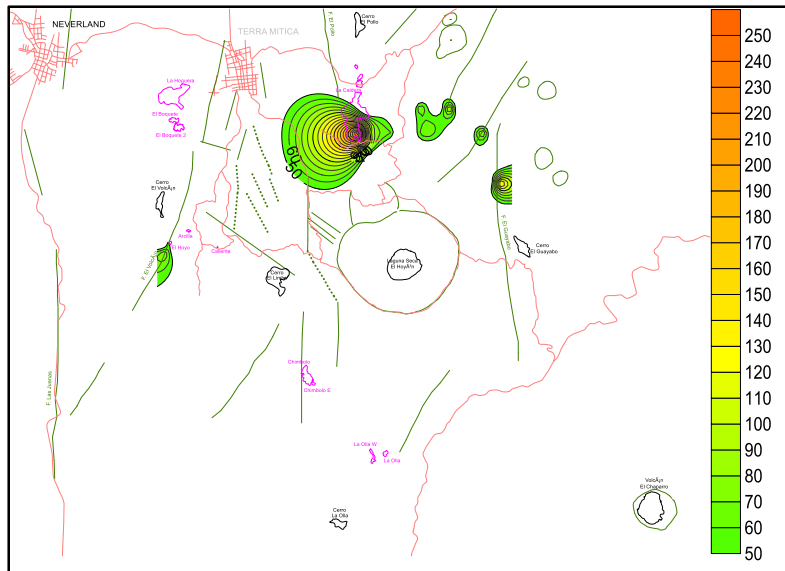


Figura 13. Radón (pCi/L) sin referencia estadística

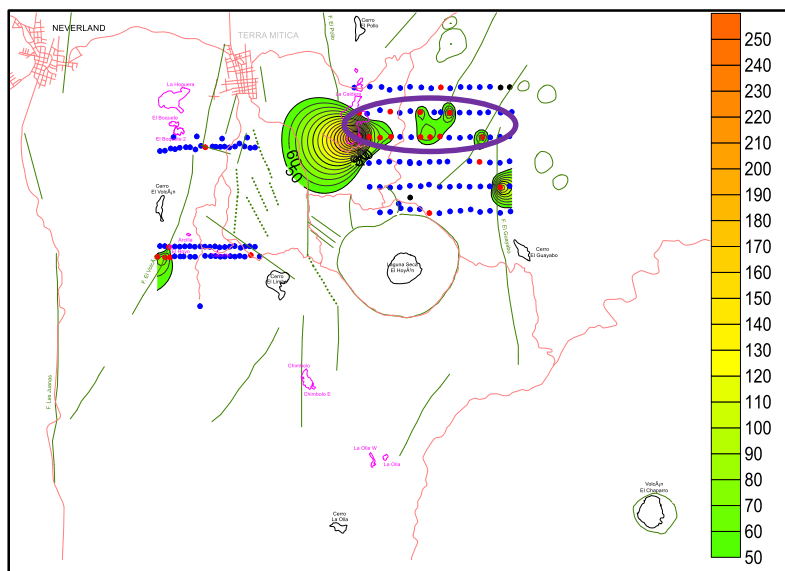


Figura 14. Radón (pCi/L) con referencia estadística

Al noreste de la laguna seca se observa la presencia del gas radón indicando que hay permeabilidad en la zona.

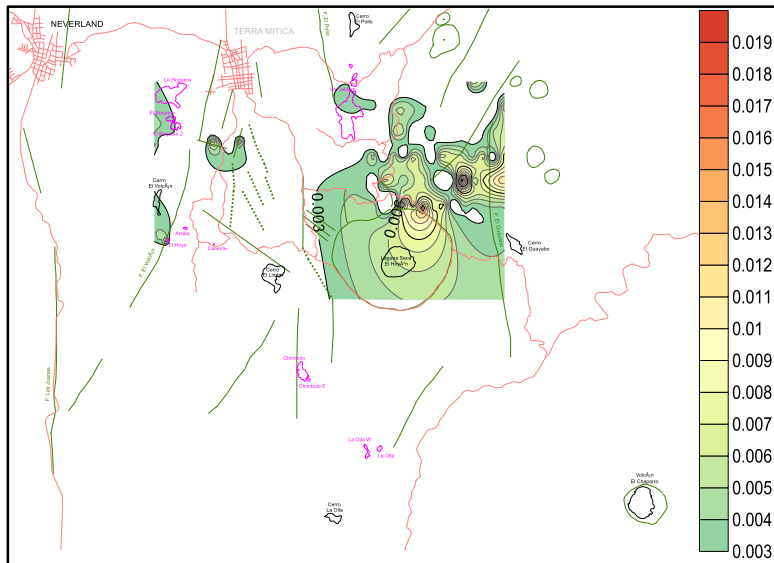


Figura 15. Mercurio (mg/m^3) sin referencia estadística

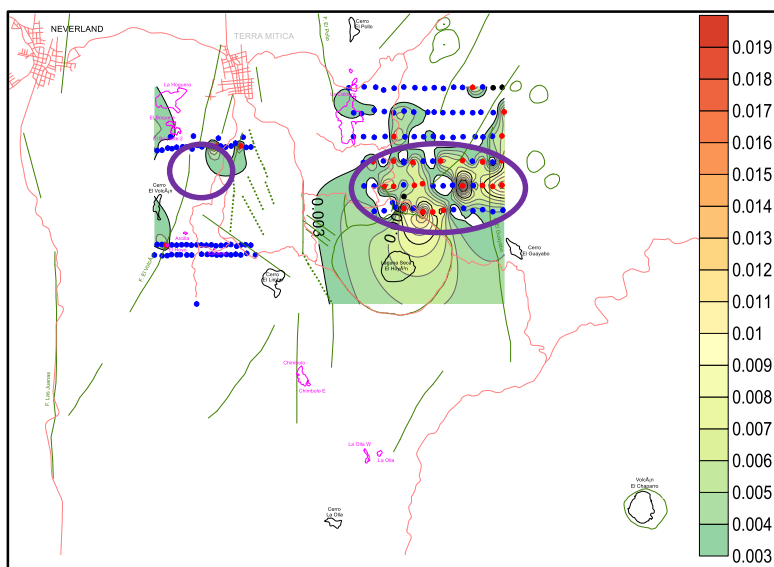


Figura 16. Mercurio (mg/m^3) con referencia estadística

Se observa la presencia de una alta concentración de mercurio en la zona NE de la laguna seca.

MAPAS SELECCIONADOS DEL AÑO 2013

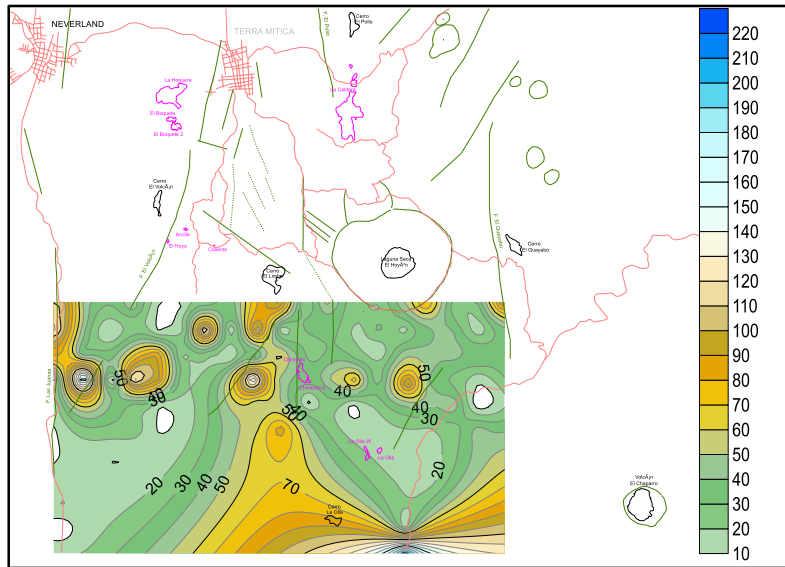


Figura 17. Flujo de CO₂ (g/m²-día) sin referencia estadística

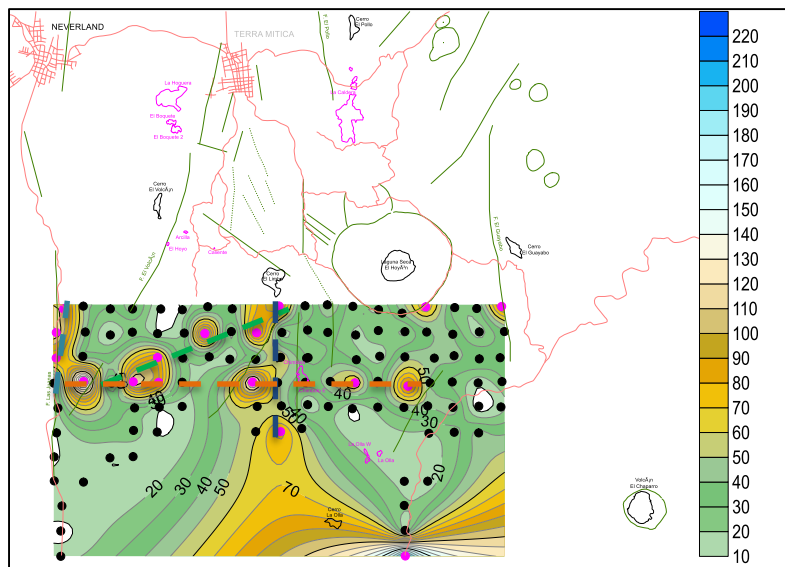


Figura 18. Flujo de CO₂ (g/m²-día) con referencia estadística

En la figura 18 se observan dos zonas anómalas con orientación N-S al SO de la Laguna seca, una en orientación E-O y una en orientación NE-SO, el cual es un buen trazador de desgasificación magmática debido a la baja solubilidad en fundidos de silicatos y su presión.

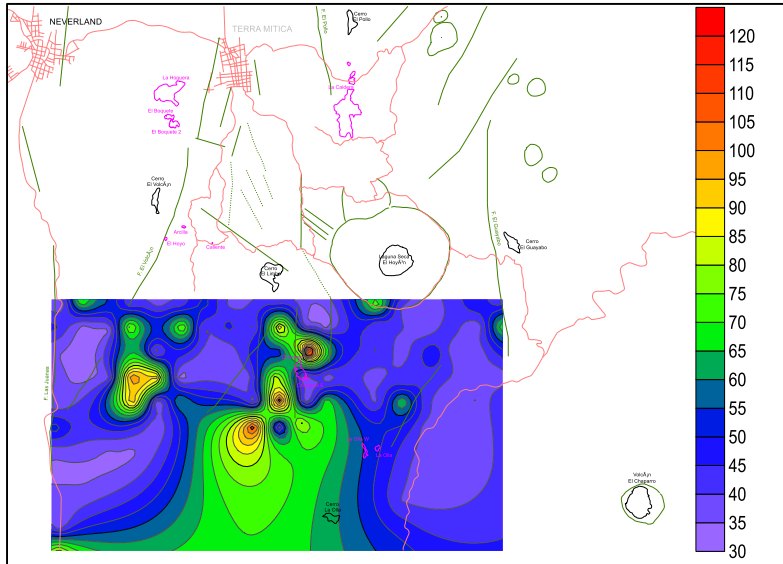


Figura 19. Hidrógeno (ppm) sin referencia estadística

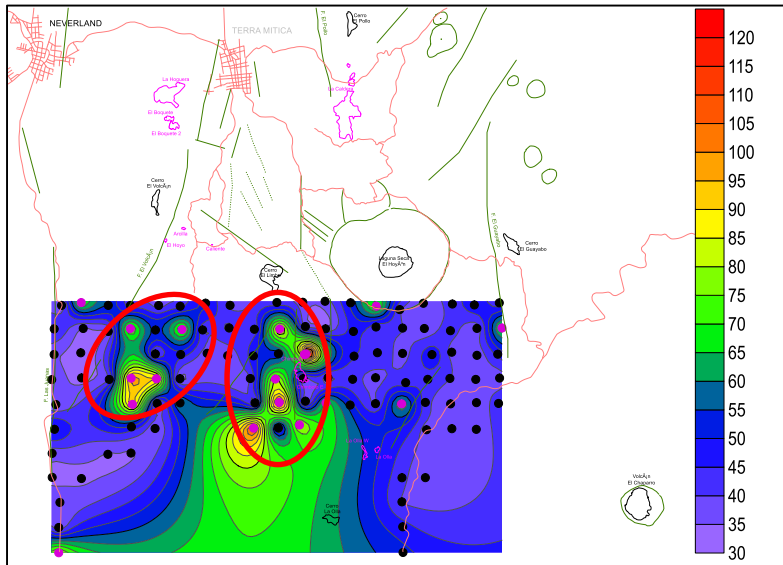


Figura 20. Hidrógeno (ppm) con referencia estadística

De igual manera que el flujo de CO₂ se muestra una alta concentración de Hidrógeno los cuales indican una procedencia de origen magmático que podría inferir en un posible reservorio geotérmico.

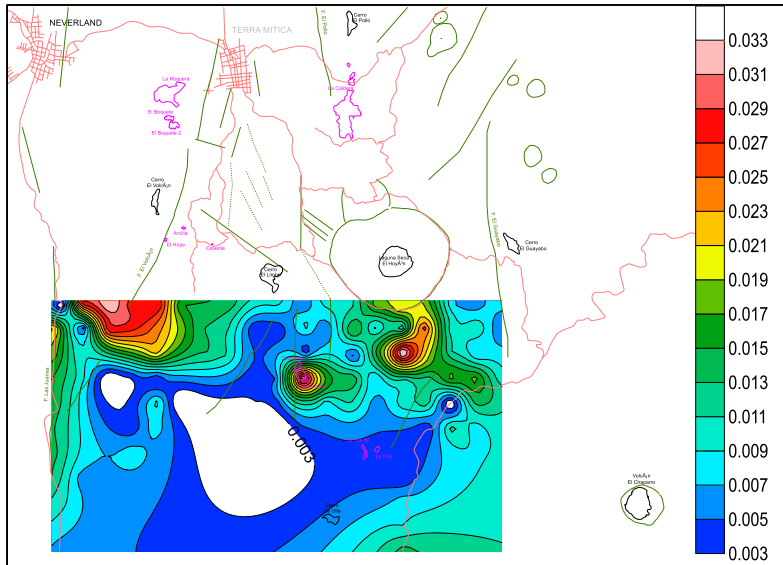


Figura 21. Mercurio (mg/m^3) sin referencia estadística

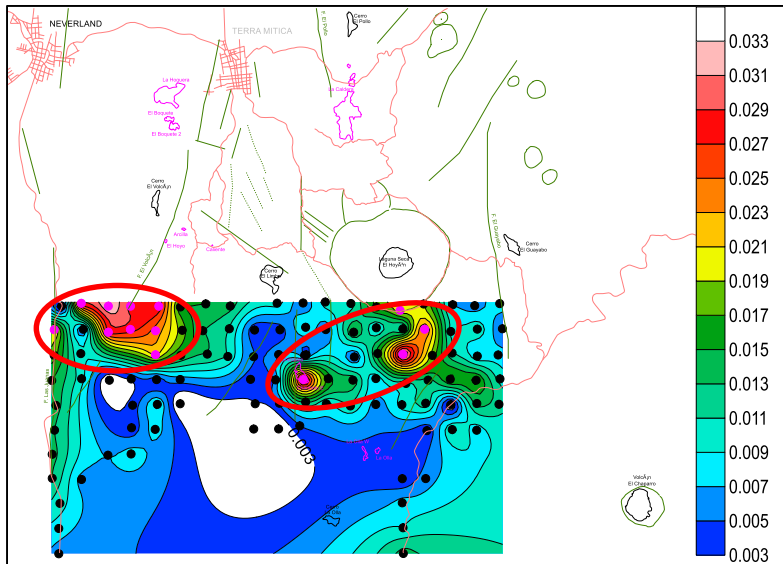


Figura 22. Mercurio (mg/m^3) con referencia estadística

En cuanto al gas Mercurio se observa dos zonas anómalas la cual indica la posible existencia de patrones de circulación hidrotermal.

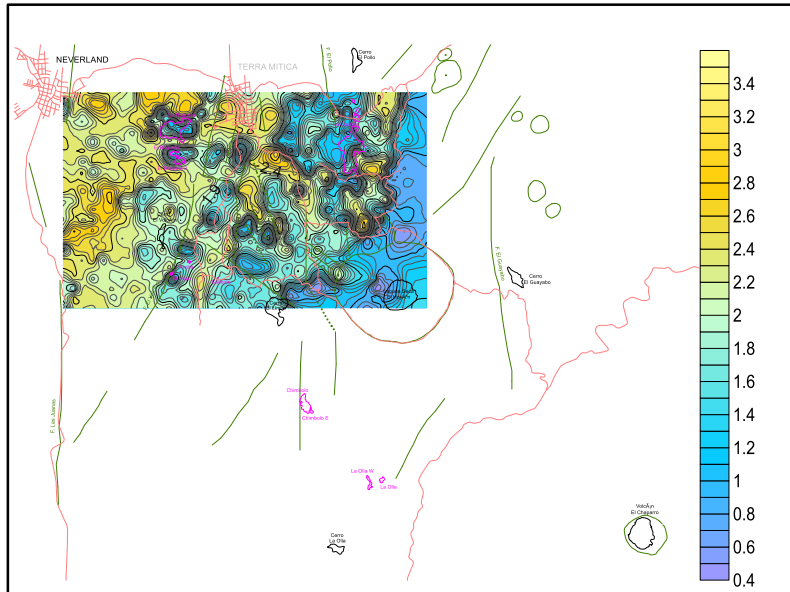


Figura 25. Helio (ppm) sin referencia estadística

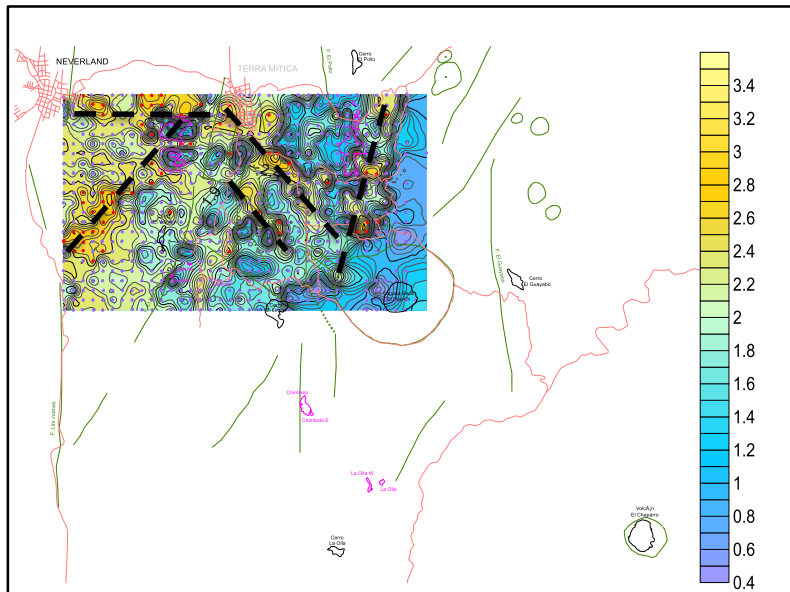


Figura 26. Helio (ppm) con referencia estadística

En la figura 26 se observan dos estructuras con orientación NE-SO, dos estructuras con orientación SO-NE y una estructura en orientación E-O, todas se encuentran al Noreste de la Laguna seca.

3.2. ESTUDIO DE LOS COMPLEJOS FUMARÓLICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO Y LA DETERMINACIÓN DE RIESGOS POR EXPOSICIÓN DE GASES A LA COMUNIDAD.

3.2.1. Monitoreo de Inmisiones Fumarólicas

Al hablar de calidad del aire, es inevitable no conocer la definición de los términos: Emisión e Inmisión. Donde el primero es la cantidad de contaminante vertido a la atmósfera en un período determinado desde un foco, mientras que el segundo término sería la concentración de contaminantes a nivel del suelo.

Debido a que las fumarolas son una fuente de emisión de gases, entre los cuales figura el sulfuro de hidrógeno (H_2S), Mercurio (Hg) y el Dióxido de Carbono (CO_2), de los cuales el H_2S y el Hg pueden representar una amenaza para la salud si la población es expuesta de forma prolongada a estos gases a una determina concentración.

Es por ello que durante el desarrollo del Trabajo Final del Diplomado de Especialización en Geotermia 2015, se realizó una gira de campo el 22 de octubre, con el fin de caracterizar el nivel de inmisiones de ambos gases, producto de las emisiones de dos fumarolas seleccionadas al norte de la zona de estudio (ver Figura 27) y en las comunidades aledañas a estas.

En las 28 y 29 se muestra la ubicación de la Fumarola #1 y Fumarola # 2, respectivamente, en el área de estudio; así mismo, los puntos de influencia de las mismas monitoreados en las comunidades aledañas.

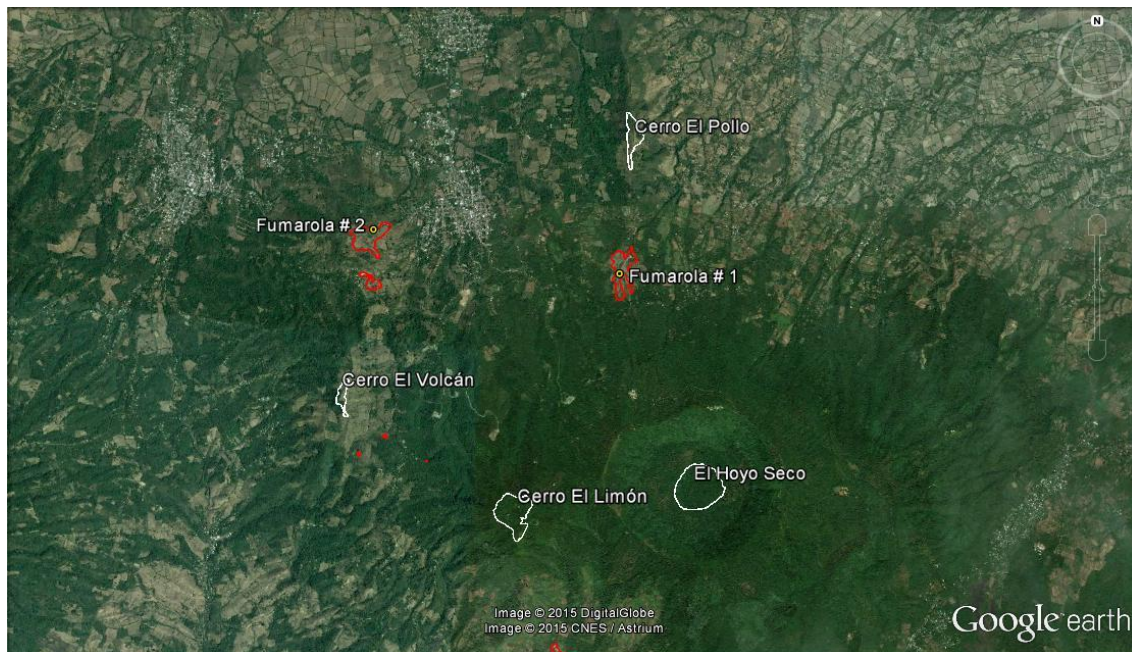


Figura 27. Ubicación de las fumarolas seleccionadas en el área de estudio.

Los puntos de monitoreo seleccionados, para la medición de H₂S y Hg, son 15 y se muestran junto al dato de elevación de cada uno, en la Tabla 1.

Tabla 1. Puntos de monitoreo seleccionados en el área de estudio.

ID	Lugar	Elevación (m)
1	Fumarola # 1	754
2	Punto a 12m de la Fumarola # 1	756
3	Punto a 24m de la Fumarola # 1	756
4	Punto a 36m de la Fumarola # 1	755
5	Punto a 48m de la Fumarola # 1	754
6	Iglesia Católica cercana a Fumarola # 1	826
7	Centro Escolar cercano a Fumarola # 1	827
8	Cantón cercano a Fumarola # 1	819
9	Entrada a Caserío cercano a Fumarola # 1	765
10	Fumarola # 2	593
11	Punto a 12m de la Fumarola # 2	590
12	Punto a 24m de la Fumarola # 2	599
13	Punto a 36m de la Fumarola # 2	604
14	Cantón y Caserío cercano a Fumarola # 2	685
15	Centro Escolar cercano a Fumarola # 2	763

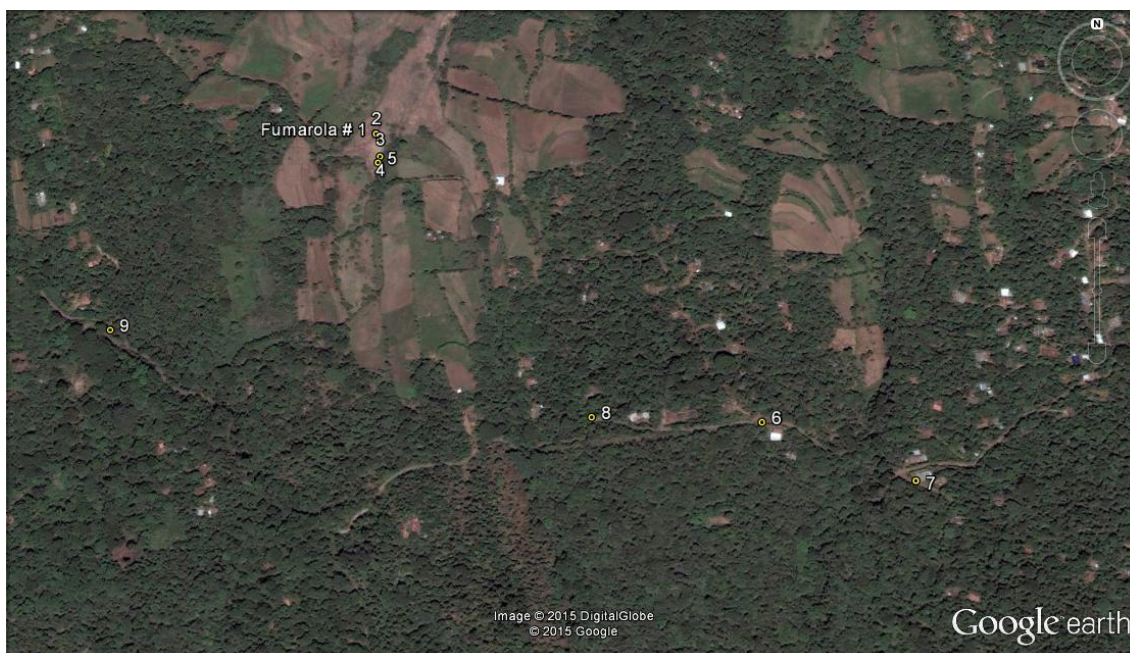


Figura 28. Fumarola # 1: Ubicación de puntos monitoreados.



Figura 29. Fumarola # 2: Ubicación de puntos monitoreados.

3.2.2 Resultados de mediciones en campo

Los resultados de las medidas realizadas el 22 de octubre de 2015, para H₂S y Hg, fueron los presentados en la Tabla 2.

Tabla 2 Mediciones promedio de Sulfuro de Hidrógeno y Mercurio.

ID	Lugar	Elevación (m)	Hora	H ₂ S prom (ppm)	Hg prom (µg/m ³)
1	Fumarola # 1	754	11:07	0.027	0.889
2	Punto a 12m de la Fumarola # 1	756	11:24	0.010	1.087
3	Punto a 24m de la Fumarola # 1	756	11:39	0.005	0.782
4	Punto a 36m de la Fumarola # 1	755	11:53	0.006	1.085
5	Punto a 48m de la Fumarola # 1	754	12:08	0.005	0.855
6	Iglesia Católica cercana a Fumarola # 1	826	12:40	0.003	0.218
7	Centro Escolar cercano a Fumarola # 1	827	12:58	0.003	0.450
8	Cantón cercano a Fumarola # 1	819	13:10	0.003	0.414
9	Entrada a Caserío cercano a Fumarola # 1	765	13:27	0.003	0.442
10	Fumarola # 2	593	15:03	0.087	0.870
11	Punto a 12m de la Fumarola # 2	590	15:20	0.020	0.331
12	Punto a 24m de la Fumarola # 2	599	15:32	0.014	1.249
13	Punto a 36m de la Fumarola # 2	604	15:45	0.005	1.263
14	Cantón y Caserío cercano a Fumarola # 2	685	16:07	0.002	0.662
15	Centro Escolar cercano a Fumarola # 2	763	16:27	0.003	1.412

3.2.3 Exposición de los Gases Geotérmicos y su relación con el Medio Ambiente

La presencia y concentración de posibles contaminantes del aire puede variar dependiendo de las características de la fuente geotérmica.

Las principales emisiones de gases monitoreadas en el aire y asociadas a las zonas con potencial geotérmico, son las de sulfuro de hidrógeno y mercurio, provenientes de las estructuras geológicas y fumarolas.

Es por ello que se monitoreó la concentración de ambos gases, durante la gira de campo mencionada en el apartado de “Monitoreo de Inmisiones Fumarólicas” del presente trabajo.

Se utilizó el Analizador Marca: Jerome Modelo: 631-X, para la medición de Sulfuro de Hidrógeno y el Analizador Marca: Jerome Modelo: J-605 para la medición de Mercurio.

3.2.3.1 Sulfuro de Hidrógeno (H_2S)

Características

El H_2S es incoloro e invisible, pero puede percibirse por su olor a concentraciones muy bajas. Su distintivo olor a huevo podrido ha hecho que sea conocido también como gas de alcantarilla. Sin embargo, el sulfuro de hidrógeno insensibiliza los nervios del olfato a partir de una concentración de 100 ppm.

Concentraciones más altas de 1000 ppm pueden provocar la muerte de manera inmediata. El H_2S es más pesado que el aire y por eso se acumula en las zonas más bajas y las zonas de trabajo cerca del suelo.

El sulfuro de hidrógeno se auto-inflama a una temperatura de 270 grados Celsius. Debido a que es altamente inflamable, puede dar lugar a atmósferas explosivas cuando se combina con el aire. Es posible que reacciones fuertes provoquen combustión espontánea, explosiones y detonaciones en caso de contacto con peróxido, bromato, amoníaco y otras sustancias químicas.

El H_2S combinado con aire y humedad puede corroer metales (como tuberías metálicas, láminas, etc.) debido a la formación de ácido sulfúrico. Posee una solubilidad de 2.9 g/litro.

Efectos de la exposición

Los efectos de la exposición prolongada al H_2S , en el cuerpo humano, pueden verse representados en la figura 30, los cuales son datos de la página web de Dräger de Centro y Sudamérica, “*Technology for Life*” (http://www.draeger.com/sites/es_csa/Pages/default.aspx).

A Corto Plazo, los efectos a la exposición son:

- Inhalación de 20 - 150 ppm causa irritación en el sistema respiratorio.

- En bajas concentraciones, la exposición puede desencadenar dolor de cabeza, fatiga, vértigo y diarrea, seguido de bronquitis y bronconeumonía. En pequeñas cantidades el gas actúa como sedante y como estimulante a mayores concentraciones.
- Altas concentraciones pueden llevar a parálisis del sistema respiratorio; exposiciones de 1000 a 2000 ppm pueden causar como luego de sólo una inhalación.

A Largo Plazo, los efectos a la exposición son:

- La exposición prolongada, en concentraciones menores a 50 ppm, puede causar faringitis y bronquitis.
- Concentraciones > 250 ppm pueden originar edemas pulmonares.

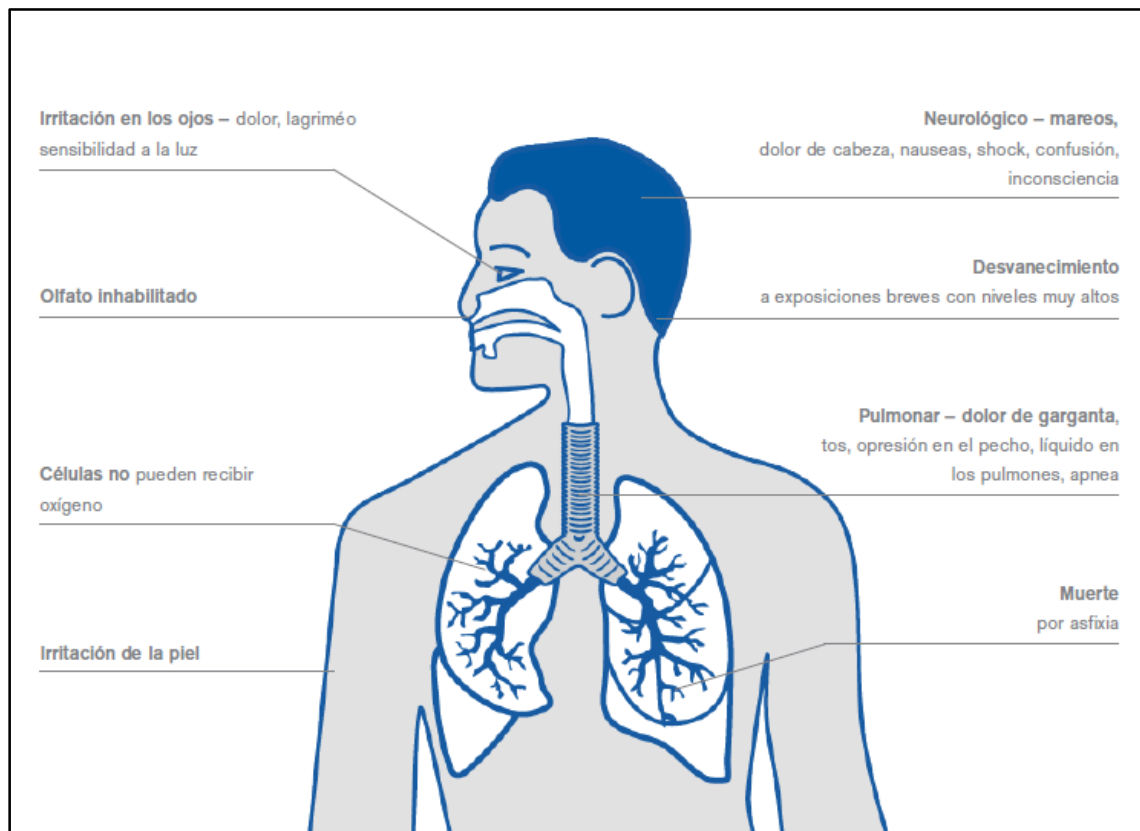


Figura 30. Efectos de la exposición prolongada a H₂S.

De acuerdo a la información contenida en la página web de Dräger de Centro y Sudamérica, “*Technology for Life*” (http://www.draeger.com/sites/es_csa/Pages/default.aspx), los niveles de exposición al sulfuro de hidrógeno se pueden identificar por los efectos descritos en la Tabla 3.

Tabla 3. Niveles de exposición y posibles efectos.

[H ₂ S] = 0 - 20 ppm		[H ₂ S] = 21 - 99 ppm		[H ₂ S] = 100 - 1,000 ppm	
Concentración (ppm)	Efectos en el Cuerpo Humano	Concentración (ppm)	Efectos en el Cuerpo Humano	Concentración (ppm)	Efectos en el Cuerpo Humano
0,00047	Umbral de percepción, 50% de las personas notan el olor.	A estos niveles, los niveles OEL se han excedido en todas las regiones.		Los límites IDLH ya se han excedido.	
0,13	Umbral de percepción del olor.	Hay que llevar protección respiratoria.		No se debería utilizar protección respiratoria sino sistemas de suministro de aire.	
0,77	Olor perceptible.	También hay que utilizar protección ocular.		Protección ocular indispensable.	
4,6	Olor fácilmente perceptible. Una exposición prolongada puede adormecer el sentido del olfato.	27	Olor fuerte y desagradable, pero no intolerable.	100	Irritación inmediata en los ojos y en las vías respiratorias.
5	Cambios metabólicos en ejercicios individuales, no significativos.	30	A este nivel, el olor a huevo podrido es fácilmente reconocible.	150	El sentido del olfato se paraliza rápidamente (2 – 15 min).
10	Irritación ocular, dolor, enrojecimiento, escozor.	30 – 100	El olor se convierte en peligroso. Una exposición prolongada puede causar daños en los ojos, migrañas, náuseas, mareos, tos, vómito y dificultad para respirar	200	Dolores de cabeza, mareos, náuseas.
10 – 20	Irritaciones dolorosas en los ojos, la nariz y la garganta, dolores de cabeza, fatiga, irritabilidad, insomnio, molestias gastrointestinales, pérdida del apetito, mareos. Una exposición prolongada causa bronquitis y neumonía.			500	Inconsciencia que lleva a la muerte en cuestión de 30 – 60 min. Fuerte estimulación del sistema nervioso, respiración rápida.
				1,000	Pérdida inmediata de la consciencia y parálisis respiratoria que lleva a la muerte.

3.2.3.2 Hg

Características

Se conoce al mercurio como un metal pesado plateado que a temperatura ambiente es un líquido inodoro. Cuando aumenta su temperatura -por encima de los 40 °C-, produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire por lo que se evapora creando miles de partículas en vapor ya que éstas se enfrían y caen al suelo.

Es dañino por inhalación, ingestión y contacto: se trata de un producto muy irritante para la piel, ojos y vías respiratorias. Es incompatible con el ácido nítrico concentrado, el acetileno, el amoníaco, el cloro y los metales.

En geotermia, el mercurio se vaporiza en profundidad, y su emisión se da desde sistemas geotérmicos activos de alta temperatura hacia la superficie, por medio de difusión, a través de regiones permeables (Murray, 1996).

Efectos de exposición

Según una publicación de febrero del 2009, "Datos básicos sobre el mercurio: Efectos de la exposición al mercurio sobre la salud", los efectos sobre la salud de la exposición de corta duración a unas concentraciones elevadas de vapores de mercurio son:

- Tos, irritación de garganta.
- Disnea.
- Dolor torácico.
- Náuseas, vómitos, diarrea.
- Aumento de la tensión arterial o la frecuencia cardíaca.
- Sabor metálico en la boca.
- Irritación ocular.
- Cefalea.
- Problemas de la vista.

Y los efectos sobre la salud, de la exposición prolongada a los vapores de mercurio son:

- Angustia.
- Timidez excesiva.
- Anorexia.
- Problemas de insomnio.
- Pérdida del apetito.
- Irritabilidad.
- Fatiga.
- Mala memoria.
- Temblores.
- Alteraciones en la visión.
- Alteraciones en la audición.

3.2.4 Legislación Aplicable

Actualmente en El Salvador, no existe una regulación para las emisiones ni concentraciones de gases emitidos en las plantas de energía geotérmica. Por lo tanto, en el presente trabajo se hará referencia a las normativas internacionales, tanto para la evaluación ambiental como para la seguridad ocupacional.

3.2.4.1 Seguridad Ocupacional

Sulfuro de Hidrógeno

Para protegerse y conocer cuáles son los equipos óptimos para la protección personal, es útil saber los límites nacionales e internacionales actuales de H₂S en el trabajo.

El H₂S es mundialmente identificado con el número de registro del Chemical Abstracts Service (CAS): 7783-06-4.

Los límites de exposición al Sulfuro de Hidrógeno son:

Tabla 4. Límites de exposición al Sulfuro de Hidrógeno

Autoridad	Descripción	TWA	STEL	IDHL
NIOSH	REL	10 ppm TWA	15 ppm STEL	100 ppm
OSHA	PEL	20 ppm Ceiling	50 ppm para 10 min	
ACGIH	TLV	1 ppm TWA	5 ppm STEL	

NIOSH: Instituto Nacional para la Seguridad y la Salud Ocupacional, EE. UU.

REL: Límite de exposición recomendado.

IDLH: Peligro inmediato para la vida o la salud.

OSHA: Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, EE. UU.

STEL: Límite de exposición a corto plazo.

TLV: Valor umbral límite.

ACGIH: Confederación Americana de Higiene Industrial, EE. UU.

TWA: Promedio ponderado de tiempo

PEL: Límite de exposición permisible

Mercurio

Para protegerse y conocer cuáles son los equipos óptimos para la protección personal, es útil saber los límites nacionales e internacionales actuales de Hg en el trabajo.

El Hg es mundialmente identificado con el número de registro del Chemical Abstracts Service (CAS): 7439-97-6.

Los límites de exposición al Mercurio son:

Tabla 5. Límites de exposición al Mercurio

Autoridad	Descripción	TWA	STEL	IDHL
NIOSH	REL	0,05 (Piel) mg/m ³ TWA hasta 10 horas	-	10 mg/m ³ escape en 30 minutos
OSHA	PEL	0,1 (Piel) mg/m ³ , 8 horas	-	-
ACGIH	TLV	0,025 (Piel) mg/m ³ , 8 horas	0,075 (Piel) mg/m ³ , límite de excursión 30 minutos	0,075 (Piel) mg/m ³ , límite de excursión instantánea

La notación "piel": Se designa con el estándar, indicando el contacto con la piel, ojos y mucosas como una vía significativa de absorción.

3.2.4.2 Estándares Ambientales.

Son pocos los organismos y países, que poseen normativas que regulan los niveles de calidad de aire.

Sulfuro de Hidrógeno

En la tabla 6 se presentan algunos de estos países e instituciones que sí cuentan con estos niveles para H₂S.

Tabla 6. Niveles permisibles de H₂S para Calidad de Aire.

País/ Institución	Nivel (ppm)	Nivel (µg/m ³)	Tiempo promedio	Notas	Ref.
Nueva Zelandia		7	1 hora	Medido a 0°C y 1 atm de presión. Basado en molestias olfativas y tal vez inconveniente en un área geotérmica.	a
WHO		150	24 horas	Nivel por irritación ocular.	b
Estado de Hawaii, EEUU	0.025	35	1 hora	-	c
Estado de California, EEUU	0.030		1 hora	-	d
Islandia		50	24 horas	El valor de sulfuro de hidrógeno se basa en la molestia del olor y puede ser inadecuado para el uso en las áreas geotérmicas.	e

- a. <http://www.mfe.govt.nz/publications/air/ambient-air-quality-may02/index.html>
- b. WHO, 2000. Guidelines for Air Quality, World Health Organisation, Geneva.
- c. State of Hawaii, 2002. 2001 Annual Summary Hawaii Air Quality Data, Department of Health Clean Air Branch, Honolulu, Hawaii.
- d. <http://www.arb.ca.gov/research/aaqs/caaqs/h2s/h2s.htm>
- e. Regulation 514/2010, Annex 1. <http://www.government.is>.

Para el presente trabajo se utilizará el Estándar de Calidad Ambiental de H₂S, cuyo valor es de 150 µg/m³ (0.102 ppm), para un promedio de 24 horas, propuesto por la OMS.

Mercurio

El límite NIOSH está basado en el riesgo de daño del sistema nervioso central, irritación de los ojos, piel y tracto respiratorio.

El valor inmediatamente peligroso para la vida o la salud (Immediately dangerous to life or health - IDLH), de acuerdo al NIOSH es la máxima concentración ambiental de un contaminante del cual una persona podría escapar dentro de los 30 minutos sin ningún síntoma de desmejora en el escape o efectos irreversibles a la salud; es decir, 10 mg/m³.

Para el presente trabajo se utilizará el valor guía de la OMS para el aire es de 1 µg/m³ (promedio anual), propuesto por la OMS.

La concentración tolerable se estima de 0.2 µg/m³ para exposiciones crónicas por inhalación para el vapor de Hg elemental.

3.2.5 Riesgo por Exposición, según resultados

Para determinar el riesgo por exposición, se utilizó como herramienta de análisis, gráficos basados en las mediciones de H₂S y Hg realizadas en la gira de campo, a diferentes distancias con respecto a la fuente y en puntos situados en las comunidades cercanas.

Durante el monitoreo, el viento registrado entre las 10:00 y 17:00 horas, del 22 de octubre, de acuerdo a la estación meteorológica 42: El Pacayal, reporta velocidades predominantemente entre 1.5 y 2.6 m/s (2.9 – 5.0 nudos), lo cual de acuerdo con la Escala de Beaufort se clasifica como una Brisa Suave, con dirección Sur-SurOeste.

La respectiva Rosa de los Vientos se presenta en las Figura 31 y Figura 32 para la Fumarola # 1, y en las Figura 33 y Figura 34 para la fumarola # 2.

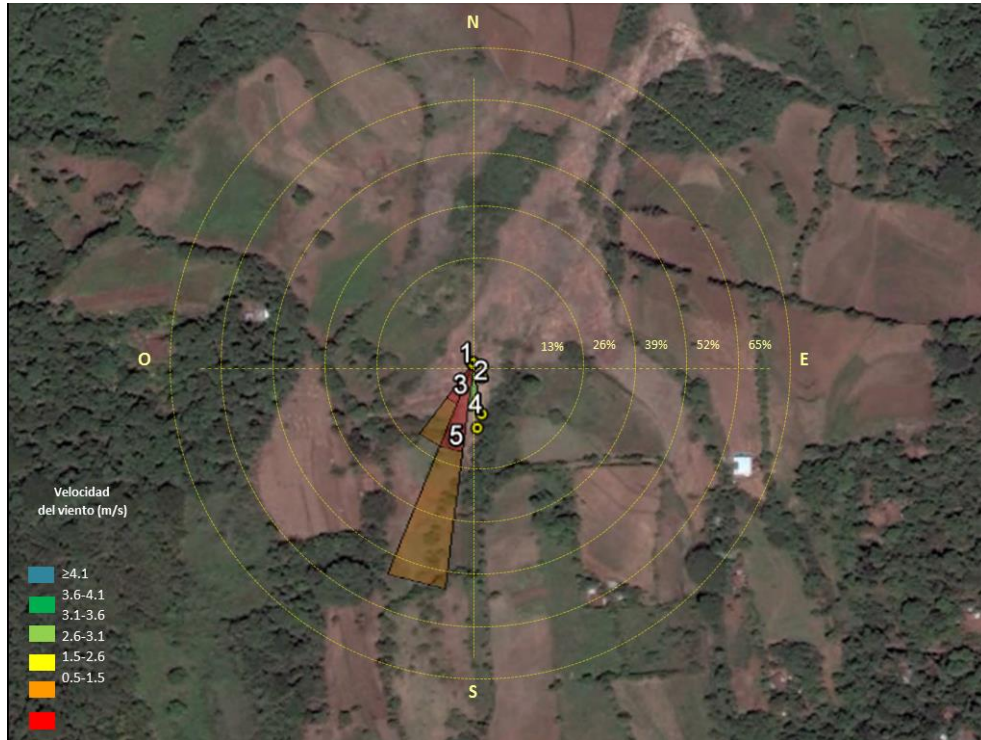


Figura 31. Rosa de los vientos: Puntos ID1-ID9, con un radio de 150m desde la Fumarola #1.

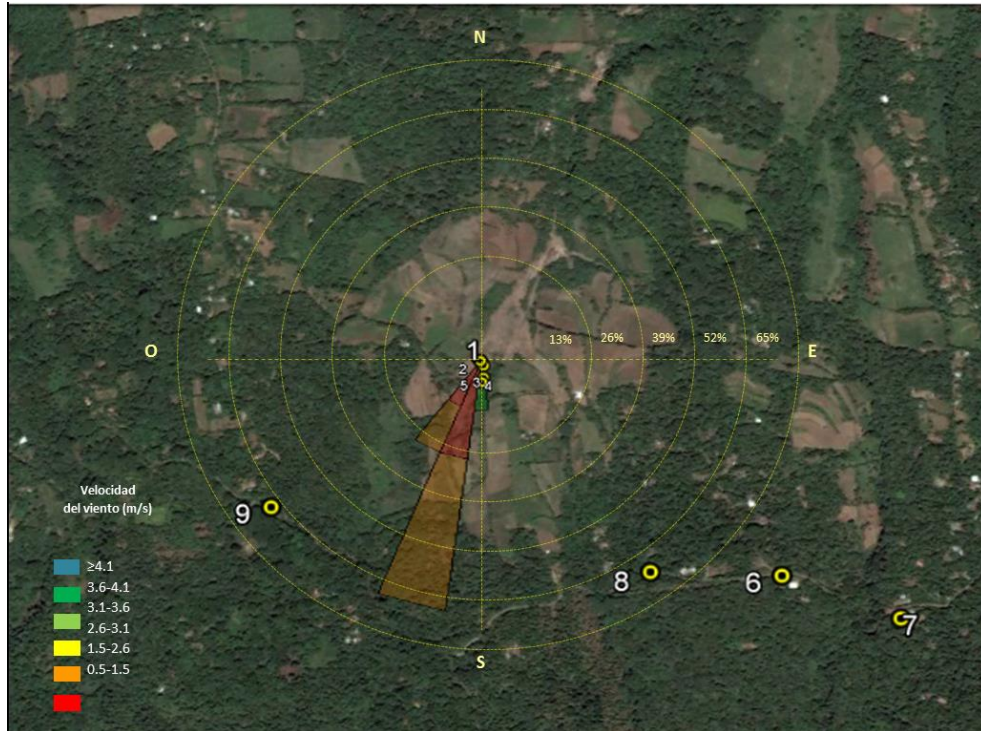


Figura 32. Rosa de los vientos: Puntos ID1-ID9, con un radio de 500m desde la Fumarola #1.



Figura 33. Rosa de los vientos: Puntos ID10-ID15, con un radio de 150m desde la Fumarola #2.

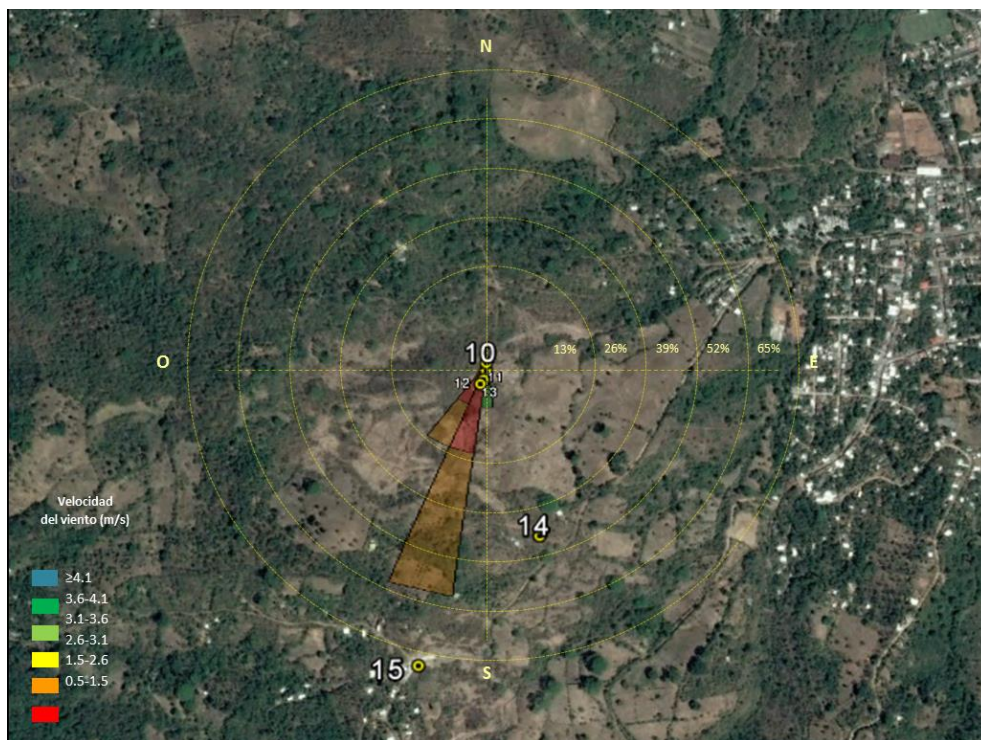


Figura 34. Rosa de los vientos: Puntos ID10-ID15, con un radio de 500m desde la Fumarola #2.

Se generaron gráficas que relacionan la concentración de los gases con respecto a la distancia del punto monitoreado de la fumarola, tal como se muestra en las Tabla 7 y Tabla 8, para la Fumarola # 1 y las tablas Tabla 9 y Tabla 10, para la Fumarola # 2.

El Gráfico 1 corresponde a los datos de la Tabla 7, el Gráfico 2 a los datos de la Tabla 8, el Gráfico 3 corresponde a los datos de la Tabla 9 y el Gráfico 4 a los datos de la Tabla 10.

Tabla 7. Concentración de H₂S y Distancia (km) desde la Fumarola # 1 hasta el punto de monitoreo.

Punto	Distancia aproximada (m)	H ₂ S promedio (ppm)
Fumarola 1	0	0.027
12m F1	12	0.010
24m F1	24	0.005
36m F1	36	0.006
48m F1	48	0.005
Vivienda 2 F1	490	0.003
Vivienda 1 F1	530	0.003
Iglesia 1 F1	710	0.003
Escuela 1 F1	940	0.003

Tabla 8. Concentración de Hg y Distancia (km) desde la Fumarola # 1 hasta el punto de monitoreo.

Punto	Distancia aproximada (m)	Hg promedio (µg/m ³)
Fumarola 1	0	0.89
12m F1	12	1.09
24m F1	24	0.78
36m F1	36	1.09
48m F1	48	0.85
Vivienda 2 F1	490	0.44
Vivienda 1 F1	530	0.41
Iglesia 1 F1	710	0.22
Escuela 1 F1	940	0.45

Tabla 9. Concentración de H₂S y Distancia (km) desde la Fumarola # 2 hasta el punto de monitoreo.

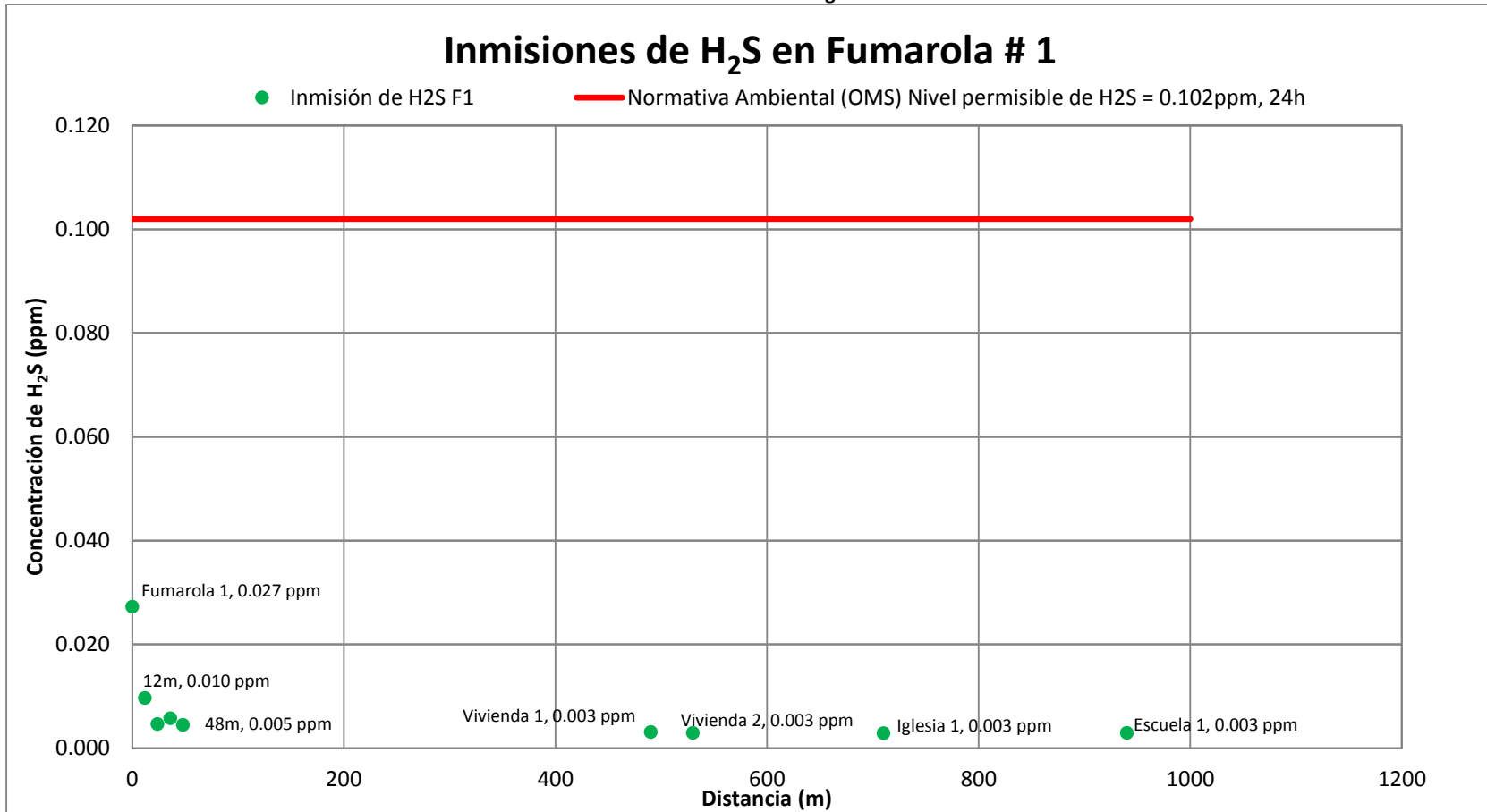
Punto	Distancia aproximada (m)	H ₂ S promedio (ppm)
Fumarola 2	0	0.087
12m F2	12	0.020
24m F2	24	0.014
36m F2	36	0.005
Vivienda 3 F2	400	0.002
Escuela 2 F2	660	0.003

Tabla 10. Concentración de Hg y Distancia (km) desde la Fumarola # 2 hasta el punto de monitoreo.

Punto	Distancia aproximada (m)	Hg promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Fumarola 2	0	0.87
12m F2	12	0.33
24m F2	24	1.25
36m F2	36	1.26
Vivienda 3 F2	400	0.66
Escuela 2 F2	660	1.41

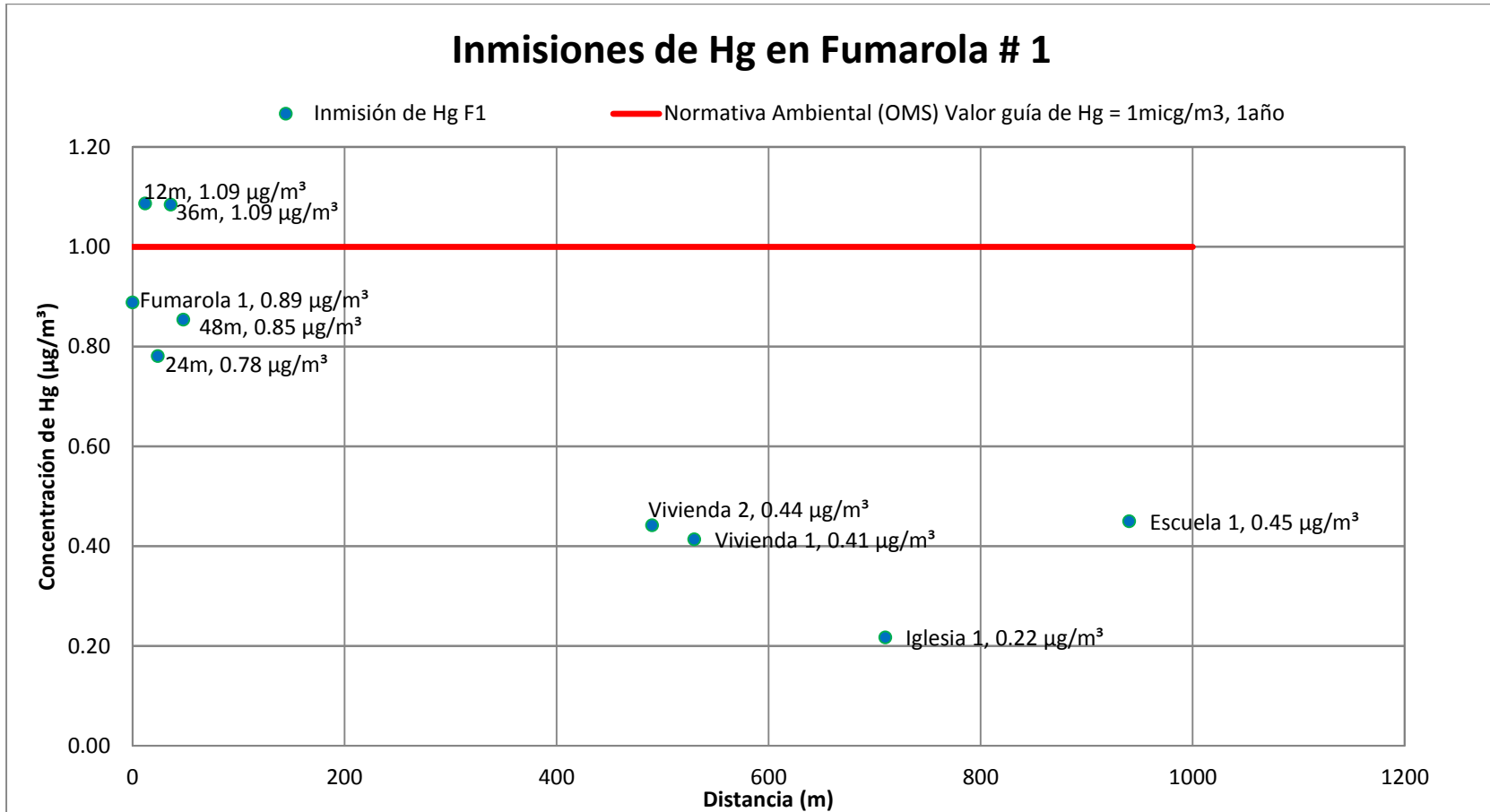
Los gráficos generados son los siguientes:

Gráfico 1. Inmisiones de Sulfuro de Hidrógeno en la Fumarola # 1.



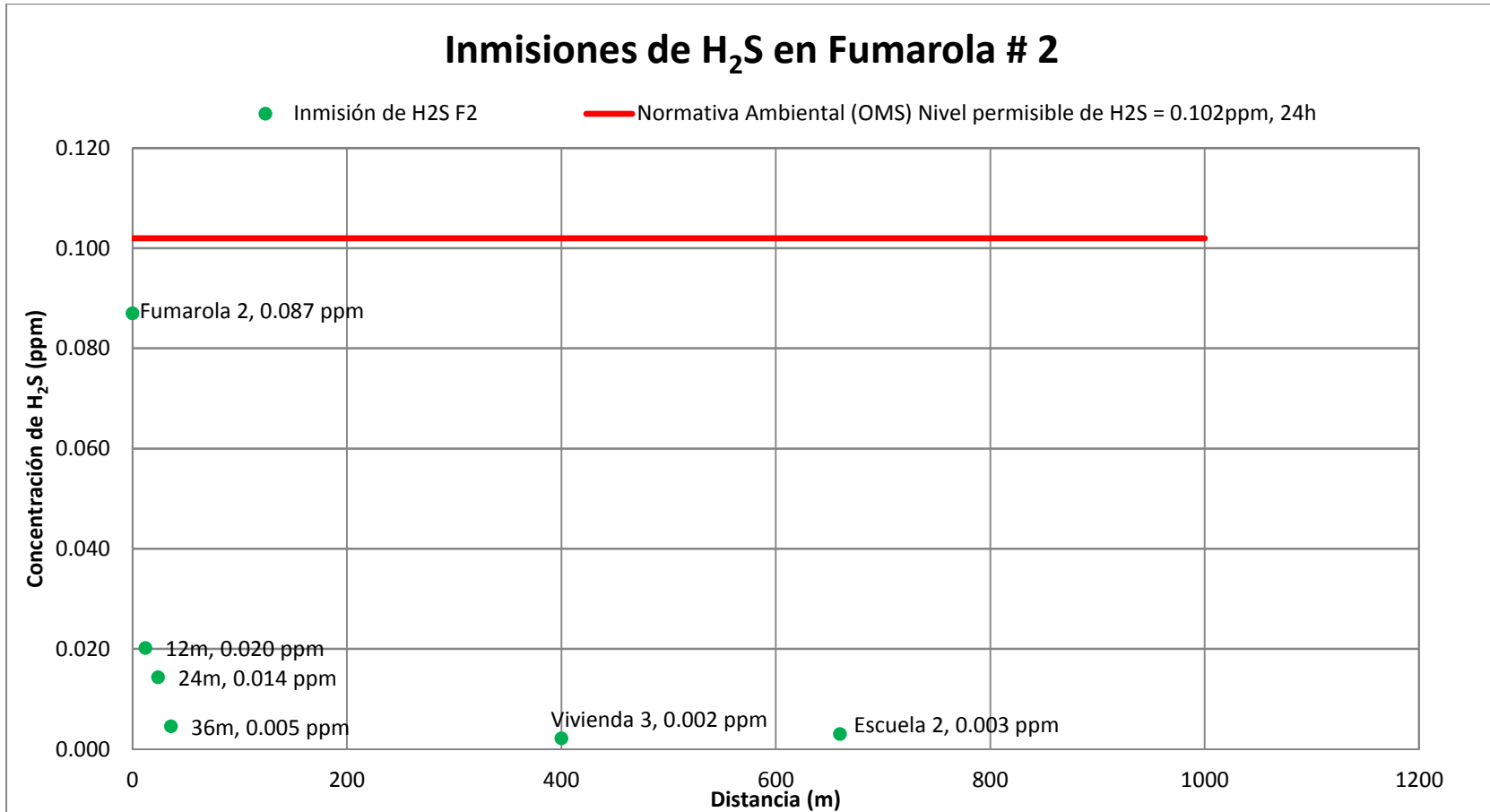
- En la Fumarola 1, los niveles de H₂S reportados no alcanzan el nivel máximo permisible propuesto por la OMS.
- Las emisiones de H₂S provenientes de la fuente no son lo suficientemente altas para que la concentración de los gases alcance niveles significativos en las comunidades aledañas a la Fumarola 1.

Gráfico 2. Inmisiones de Mercurio en la Fumarola # 1.



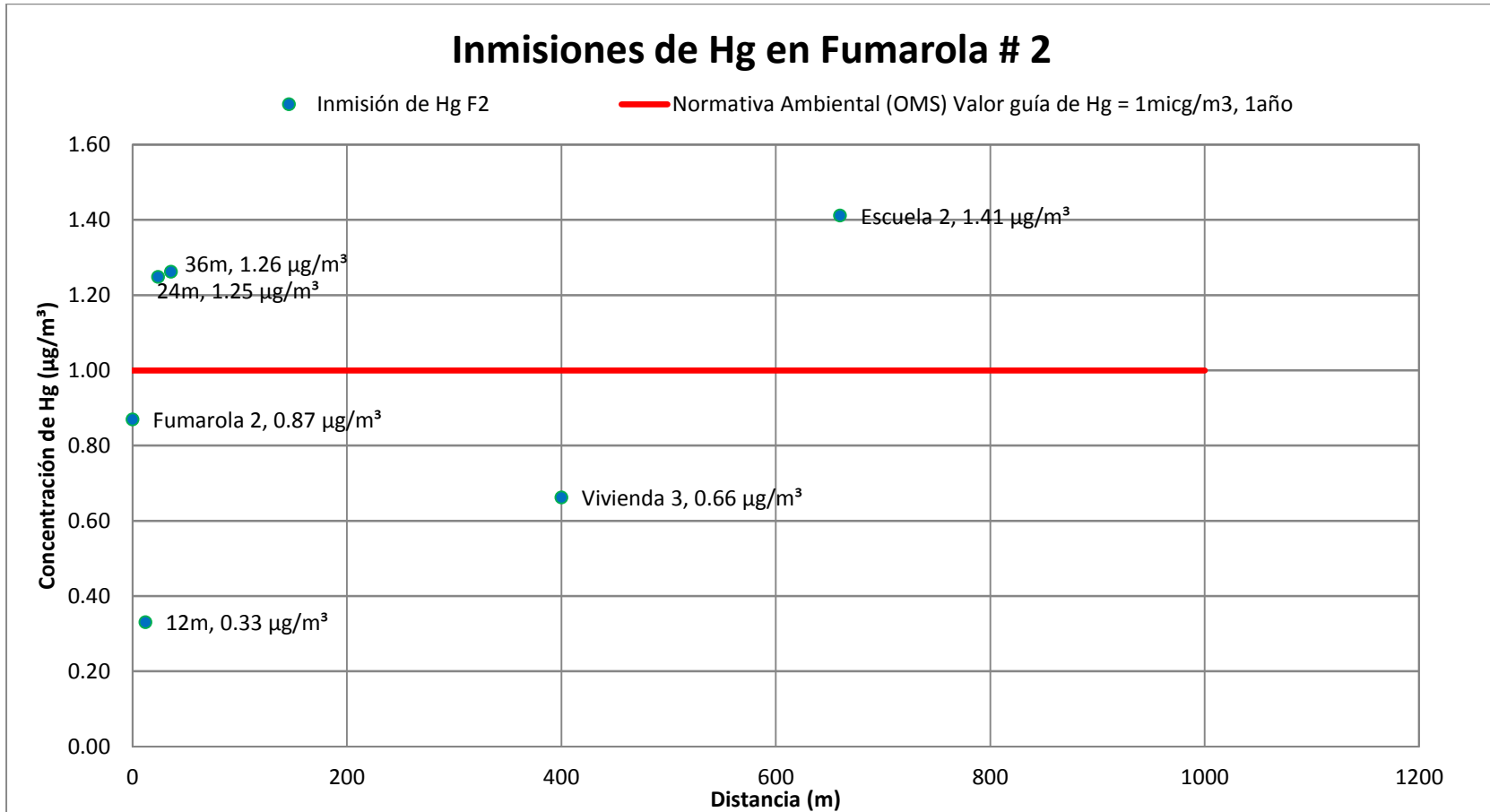
- En la Fumarola 1, los niveles de Hg reportados a 12m y 36m de la fuente, sobrepasan el nivel máximo permisible propuesto por la OMS.
- Las inmisiones de Hg a 12m y 36m de la fuente, de asumirse constancia durante un año en el resultado de la medición puntual, estarían ocasionando afectación por exposición a la salud de las personas.

Gráfico 3. Inmisiones de Sulfuro de Hidrógeno en la Fumarola # 2.



- En la Fumarola 1, los niveles de H₂S reportados no alcanzan el nivel máximo permisible propuesto por la OMS.
- Las emisiones de H₂S provenientes de la fuente no son lo suficientemente altas para que la concentración de los gases alcance niveles significativos en las comunidades aledañas a la Fumarola 1.

Gráfico 4. Inmisiones de Mercurio en la Fumarola # 2.



- En la Fumarola 2, los niveles de Hg reportados a 24m, 36m y 660m de la fuente, sobrepasan el nivel máximo permisible propuesto por la OMS.
- Las inmisiones de Hg a 24m, 36m y 660m de la fuente, de asumirse constancia durante 1 año en el resultado de la medición puntual, estarían ocasionando afectación por exposición a la salud de las personas de las comunidades aledañas y los estudiantes de la Escuela 2.

IV. CONCLUSIONES

- ✓ La coincidencia de la ubicación de las mayores concentraciones de CO₂ y Helio en las figuras 8 y 10 (mapas año 2006) indican la presencia de anomalías gaseosas, ya que es posible que haya una mayor producción de emanaciones de flujos de fluidos hidrotermales desde el reservorio hacia la superficie.
- ✓ Las altas concentraciones de Radón, Helio y Mercurio en la zona Noreste de la laguna seca mostrado en mapas del 2007, se evidencia la presencia de posibles estructuras que nos pueden estar indicando el borde Noreste del posible reservorio geotérmico.
- ✓ La mayor concentración de helio en los años 2006, 2007 y 2015 se complementan indicando permeabilidad vertical en toda la zona NO y NE de la zona de estudio.
- ✓ La mayoría de los gases tales como H₂S total, Helio, Mercurio y log de CO₂ se concentran en la zona Noroeste de la zona estudio, por lo tanto sugiere la presencia de anomalías que indiquen posibles estructuras geológicas que permiten el ascenso de fluidos desde zonas más profundas.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos en el año 2015 se concluye que estadísticamente se observa una mejor definición de estructuras ya que los puntos de muestreo fueron realizados cada 200 mts.
- ✓ El estudio de emanaciones difusas es de utilidad para identificación de zonas con alta permeabilidad, y posibles estructuras activas.
- ✓ Según resultados del tratamiento estadístico y mapeo de datos, el mercurio es un buen trazador de identificación de estructuras por su alta concentración en la zona de estudio y su relación con posibles reservorios geotérmicos.
- ✓ La aplicación de una referencia estadística en el estudio de emanaciones difusas es un enriquecimiento en las técnicas de exploración geotérmica que permite un grado de confianza en la obtención de resultados de anomalías gaseosas.
- ✓ Para el monitoreo puntual, las inmisiones de Sulfuro de Hidrógeno medidas en los diferentes puntos monitoreados son bajas, con respecto al valor del nivel permisible propuesto por la OMS para una exposición de 24 horas, de dicho gas.
- ✓ Para el monitoreo puntual, las inmisiones de Mercurio medidas de 12m-36m desde la fuente (Fumarola) son superiores al valor del nivel permisible propuesto por la OMS para dicho gas.

- ✓ Durante el monitoreo puntual realizado en la Escuela 2 (aledaña a la Fumarola #2) se obtuvo un valor de inmisiones de Mercurio $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mayor al valor recomendable por la OMS para exposiciones de 1 año.

V. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la aplicación de la estadística en el estudio de emanaciones difusas para tener una referencia con un grado de confianza cuantificable.
- ✓ Se recomienda que para futuros muestreos de gases difusos se realicen muestreos a distancias de 200 mts para una mejor definición de estructuras geológicas al presentar resultados.
- ✓ El estudio de anomalías a través de emanaciones difusas se pueden mejorar haciendo correlación de los diferentes gases y así obtener modelos de tendencias de las mismas para tener un mejor análisis de cuáles son los gases que definen mejor las estructuras geológicas.
- ✓ Realizar un monitoreo compuesto y estudios más profundos para un radio de 660m a partir de la Fumarola #2, debido a que se tiene mayor exposición a las inmisiones de este gas, en ese punto.
- ✓ Realizar estudios más profundos y concluyentes de las emisiones e inmisiones de Mercurio para un radio de 36 metros a partir de ambas fuentes (Fumarola #1 y Fumarola #2).
- ✓ Realizar el monitoreo de inmisión de los gases emitidos por las fumarolas, en las diferentes épocas del año, con el fin de estandarizar los factores que influyen en las variaciones de los resultados y verificando así el comportamiento de los mismos, el nivel de exposición de las comunidades y el tipo de afectación.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Bagnato E., Allard P., Parello F., Aiuppa A., Calabrese S. y Hammouya G., 2009: Mercury gas emissions from La Soufrière Volcano, Guadeloupe Island (Lesser Antilles). *Chemical Geology*, v. 266, p. 267-273
- Chiodini G., Cioni R., Guidi M. y Raco B., 1997: Soil CO₂ Flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, v.13, n.5, p.543-552
- Chiodini G., Frondini F. y Ponziani F., 1995: Deep Structures and Carbon Dioxide degassing in Central Italy. *Geothermics*, v. 24, p. 81-84
- Corporación Financiera Internacional. “Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la generación de energía geotérmica”. 15pp.
- Dietrich V.J., Hurni L., 2003: GEOWARN, Geospatial Warning Systems, Nisyros Volcano, Greece. <http://www.geowarn.ethz.ch/>
- Franco Nolasco, L. A. “Hydrogen sulphide abatement during discharge of geothermal steam from well pads: A case study of well pad TR-18, El Salvador”. Reports 2010, Number 13. United Nations University. Geothermal Training Programme, Orkustofnun, Grensásvegur 9, IS-108 Reykjavik, Iceland.
- Fridriksson, T., 2009a: Diffuse Degassing through soil and geothermal exploration. *Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources*
- Fridriksson, T., 2009b: Studies of diffuse CO₂ degassing: Applications to exploration and environmental monitoring in Iceland. *Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources*
- Gases Difusos en Área Geotérmica de El Salvador, Gerencia de Estudios María Inés Magaña y Jacqueline Hernández, Septiembre de 2015.
- Gutiérrez X., 2009: Estudio Geoquímico de gases en torno a la Falla el Hollón, Berlín, Usulután. *Tesis para optar al grado de licenciatura en Ciencias Químicas, Universidad de El Salvador, El Salvador*
- <http://geologiavenezolana.blogspot.com/2011/06/estructuras-geologicas.html>
- http://www.igme.es/Geotermia/Ficheros%20PDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf
- http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=122
- http://www.atsdr.cdc.gov/mercury/docs/Hg_Health_Effects_ES.pdf
- <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.2632.2012.pdf>
- <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0383.html>
- Lide D., 2005: CRC Handbook of Chemistry and Physics Internet Version. *CRC Press, Boca Raton, FL.*
- Murray K., 1996: The use of soil Hg to delineate zones of upwelling in low-to-moderate temperatura geothermal sites. *Geothermics*, v. 26, p. 193-202

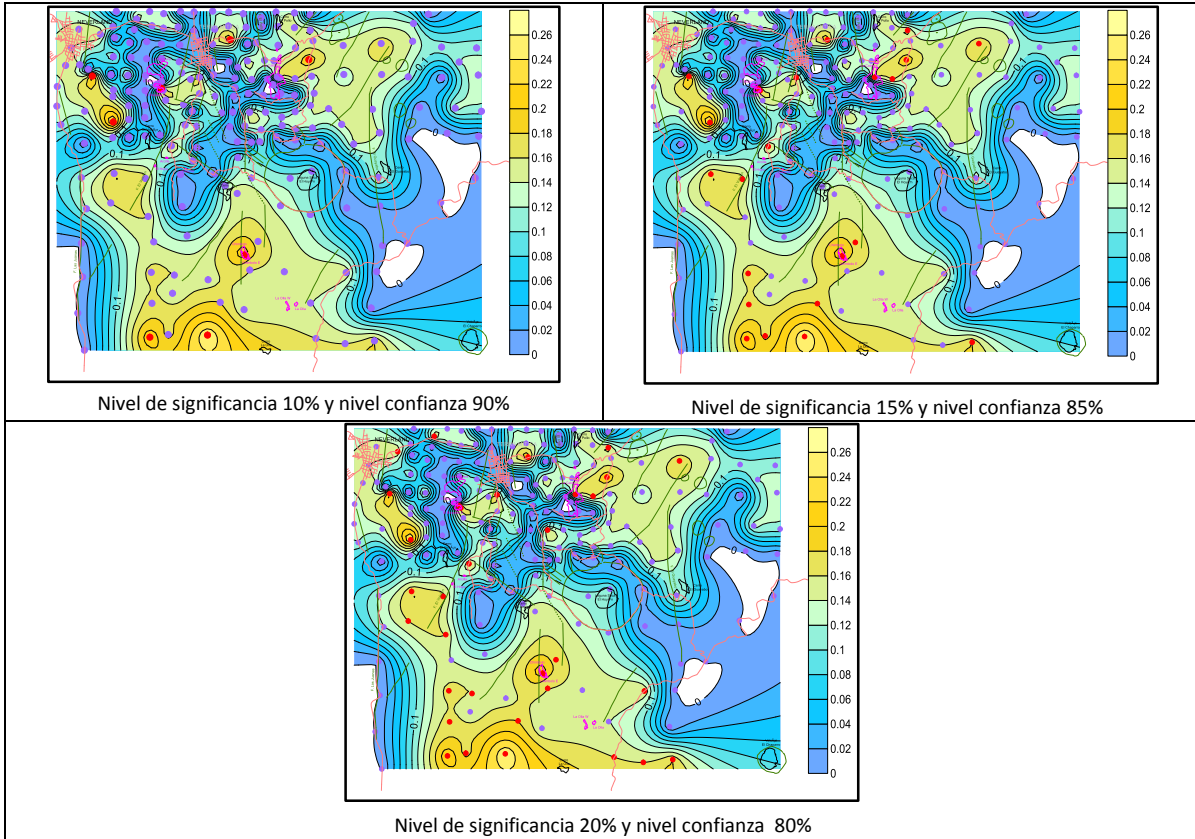
- Padrón E., Hernández P.A., Toulkeridis T., Pérez N.M., Marrero R., Melián G., Virgili G. y Notsu K., 2008: Diffuse CO2 emission rate from Pululahua and the lake-filled Cuicocha calderas Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v.176, p. 163-169
- Padrón E., López D., Magaña M.I., Marrero R. y Pérez N.M., 2003: Diffuse Degassing and Relation to Structural Flow Paths at Ahuachapán Geothermal Field, El Salvador. *Geothermal Resources Council Transactions*, v. 27, p. 325-330
- Scheidegger A.E., 1974: The physics of Flow through porous media 3rd Ed. *University of Toronto Press, Toronto*, p. 353
- Stoker A. y Kruger P., 1975: Radon in Geothermal Reservoirs. *Geothermics*, v. 5, p. 13-19
- Van Kooten G.K., 1984: Geothermal Exploration Using Surface Mercury Geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 31, p. 269-280

VII. ANEXOS

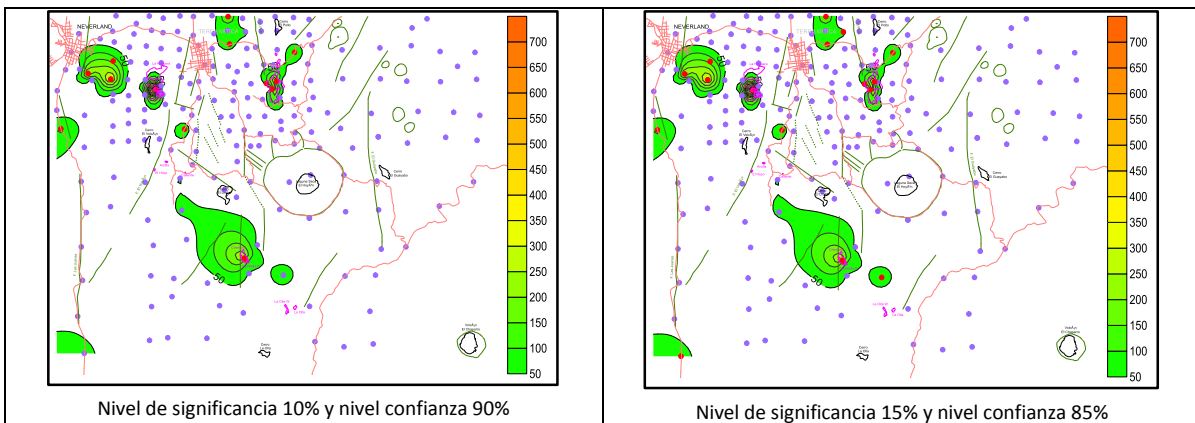
ANEXO 1. APLICACIÓN DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA E INFERENCIAL A CONCENTRACIONES DE GASES DIFUSOS.

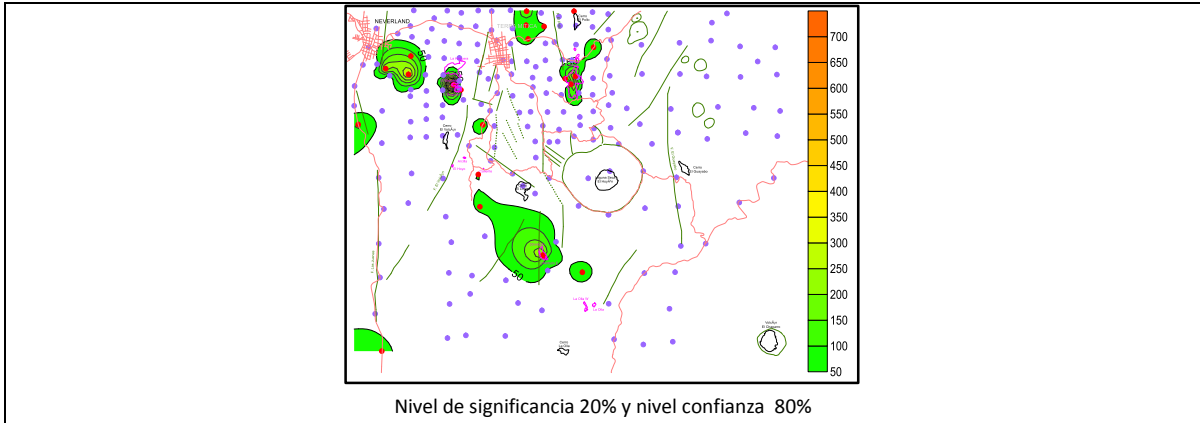
AÑO 2005

H₂S Total (ppm)

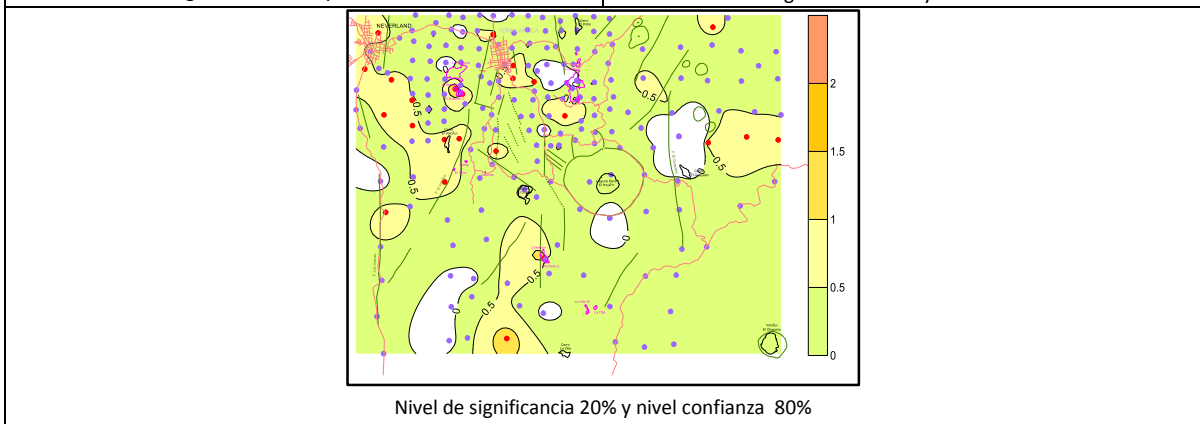
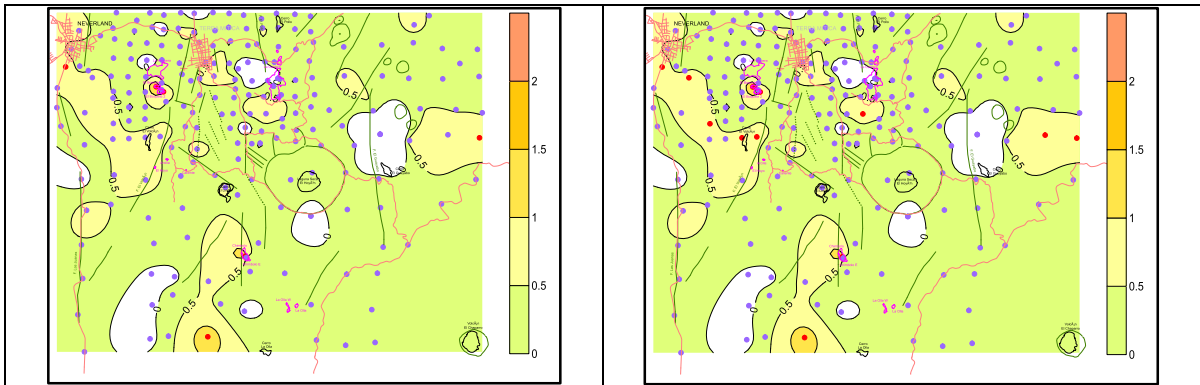


Radón (pCi/L)

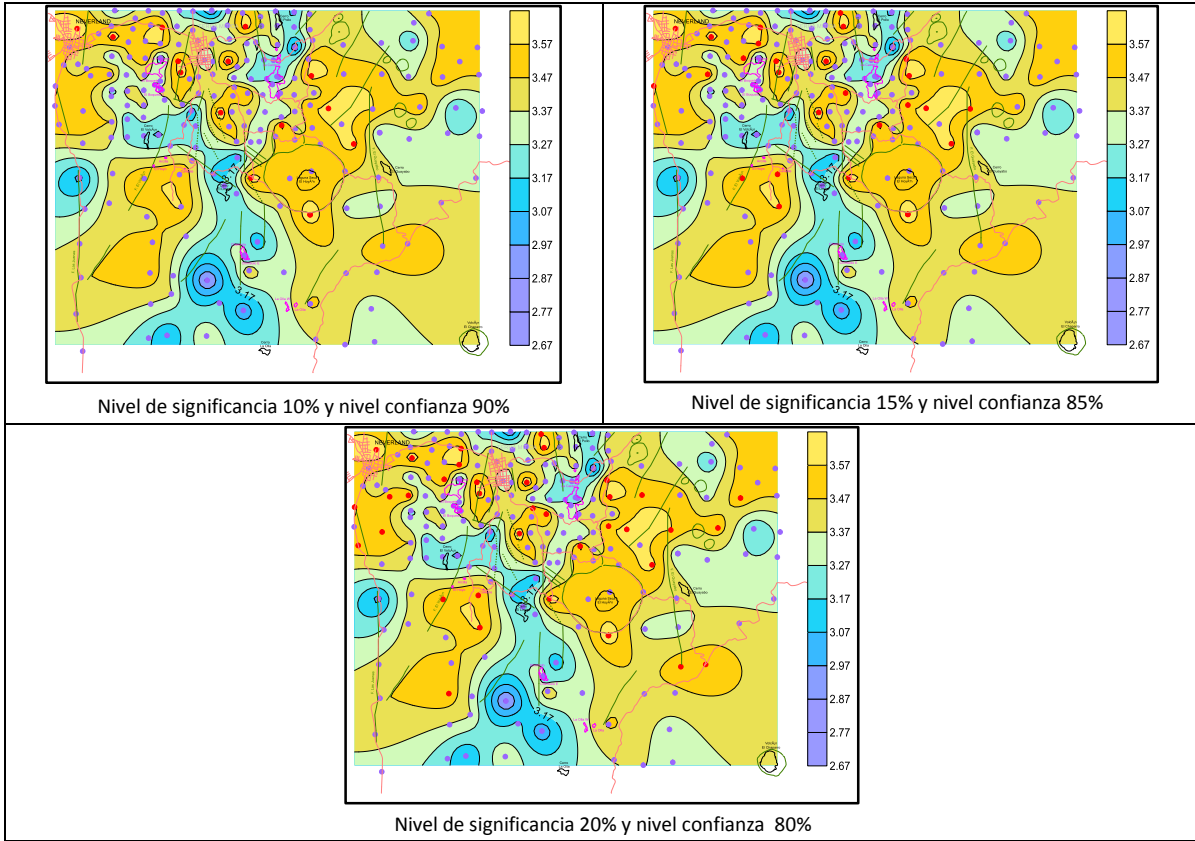




Helio (ppm)

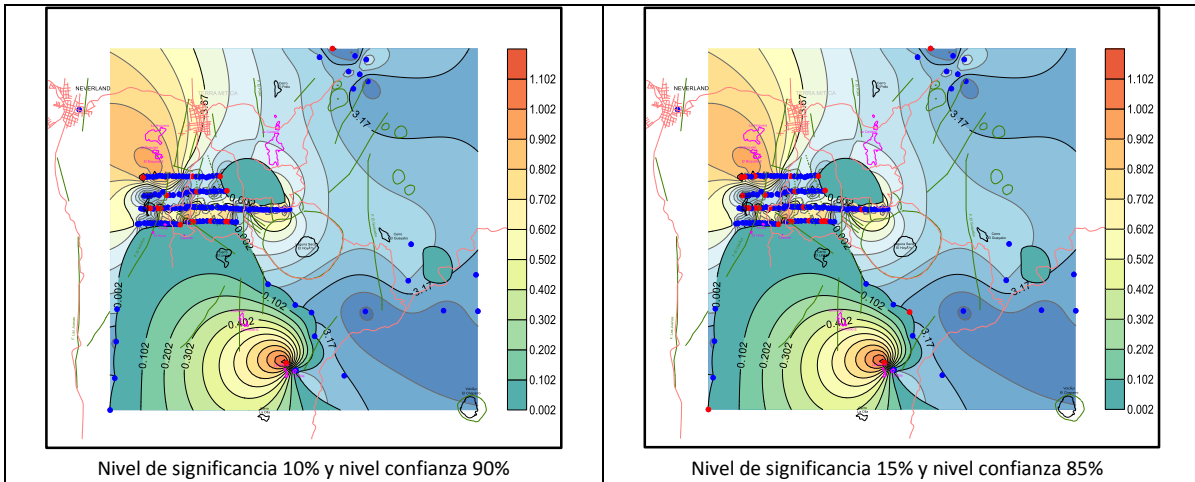


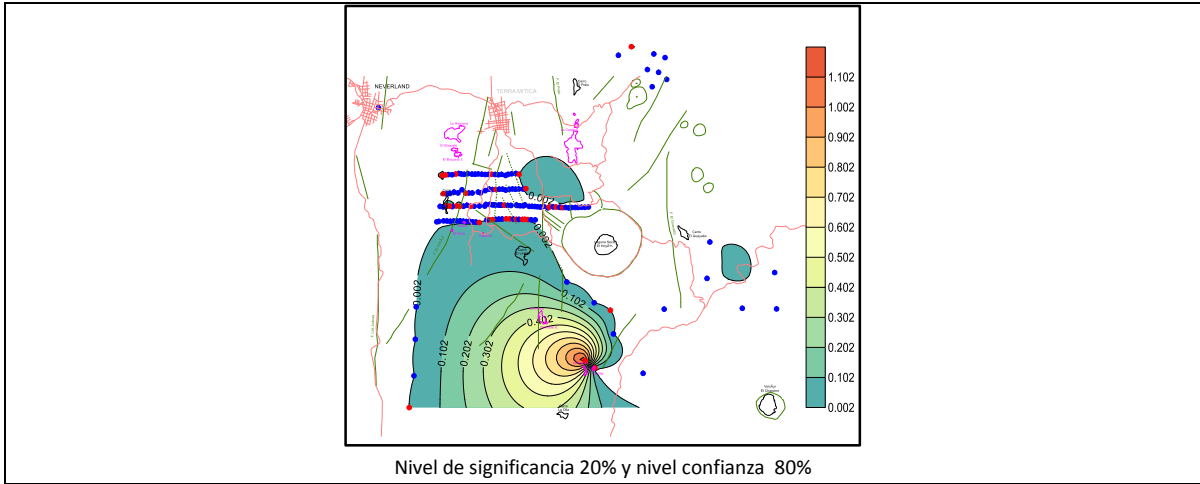
Log [CO₂] (ppm)



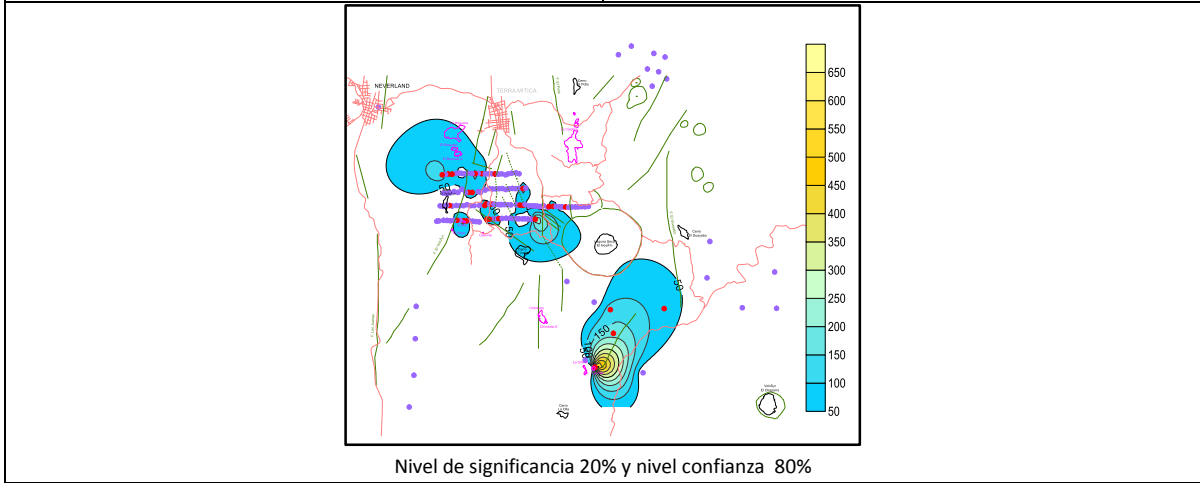
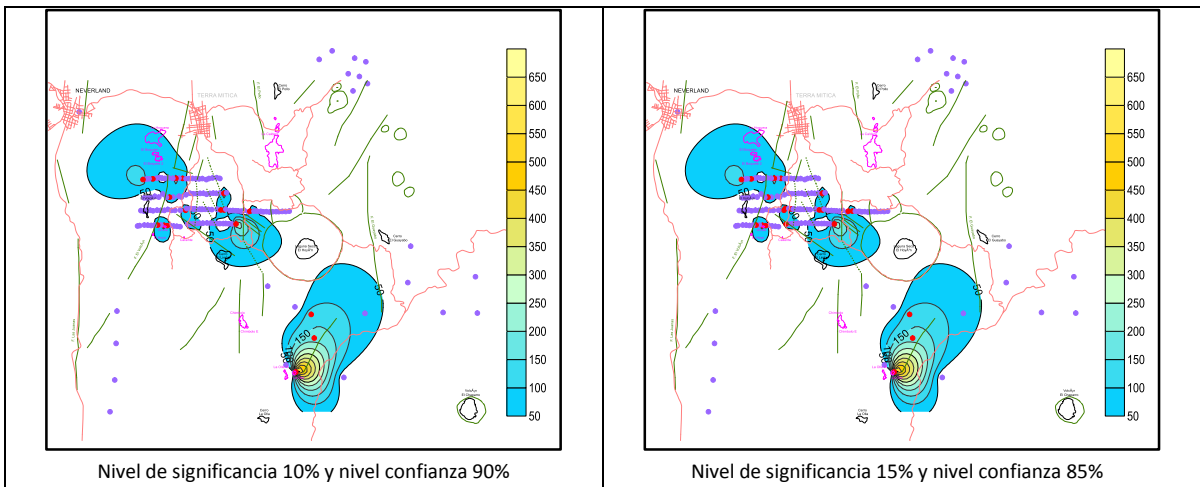
AÑO 2006

Flujo H₂S (ppm)

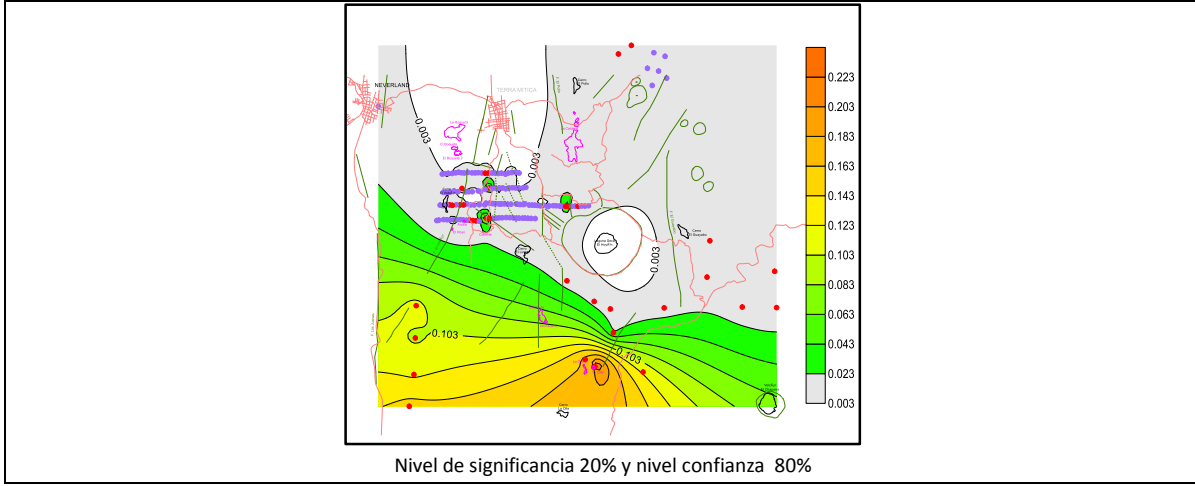
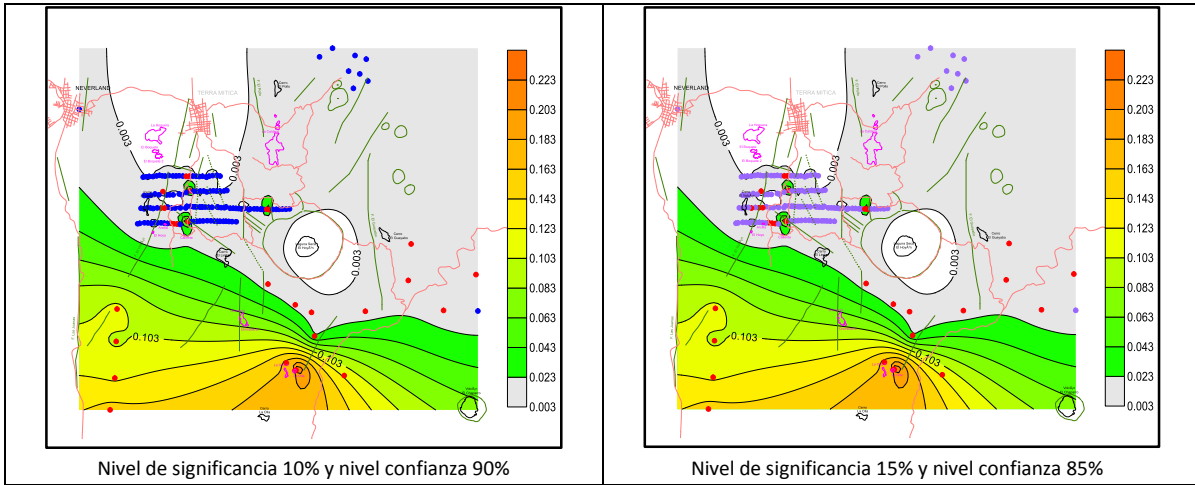




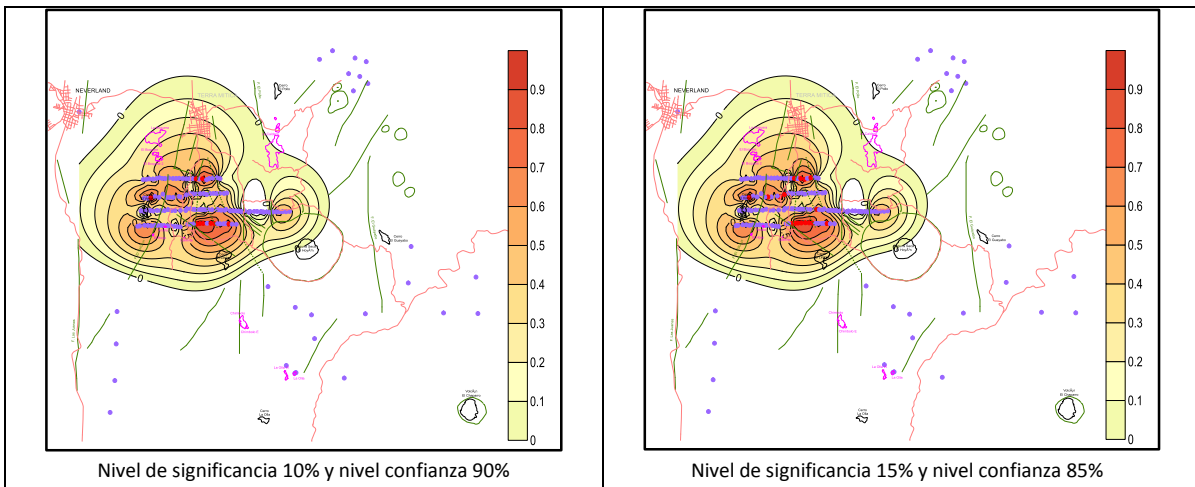
Radón (pCi/L)

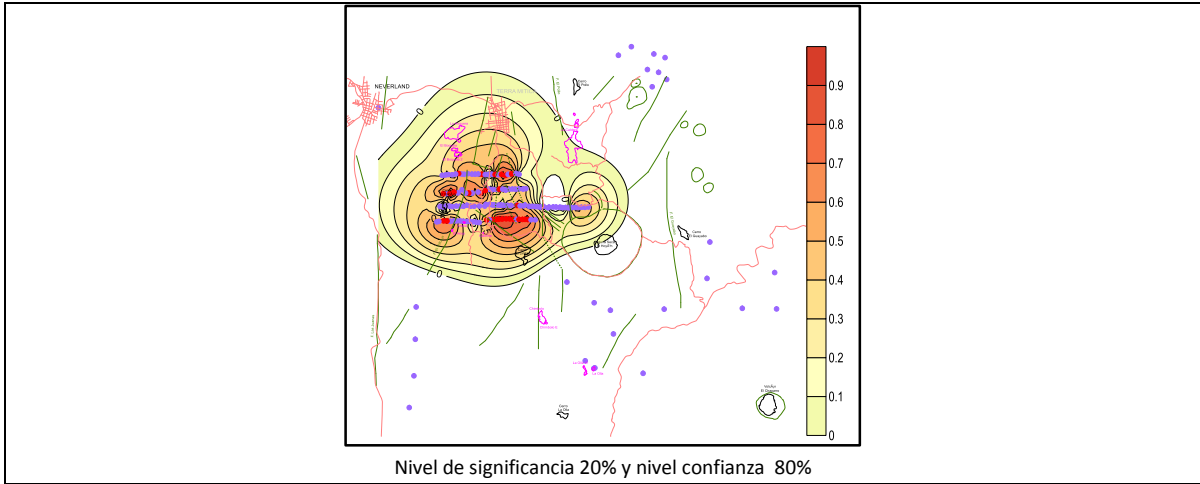


Mercurio (mg/m³)

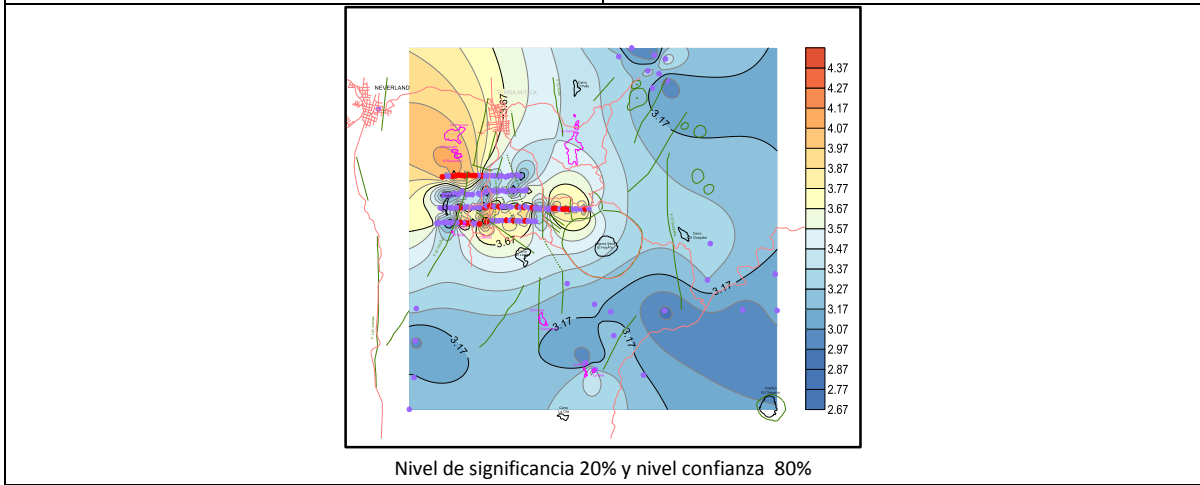
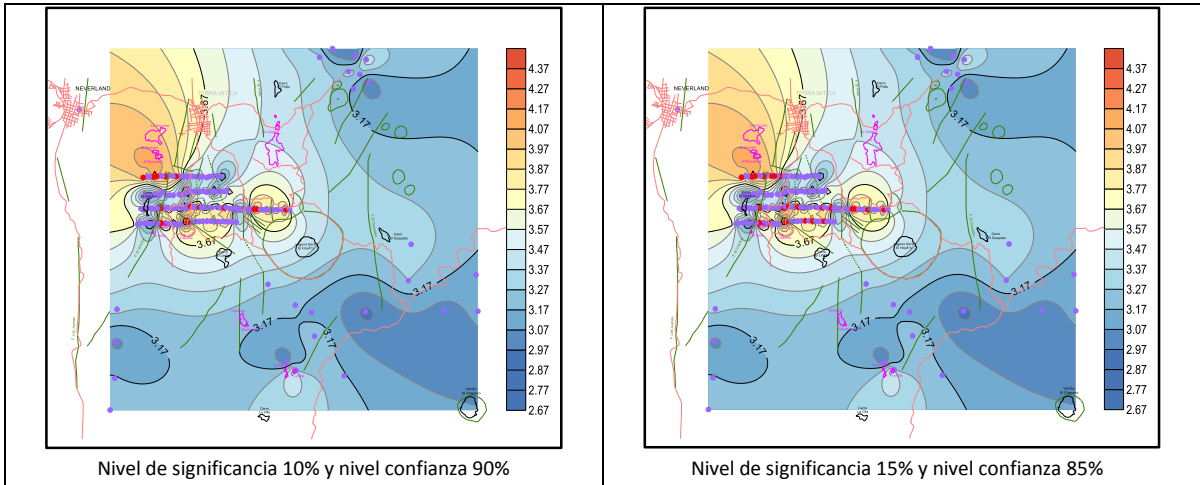


Helio (ppm)



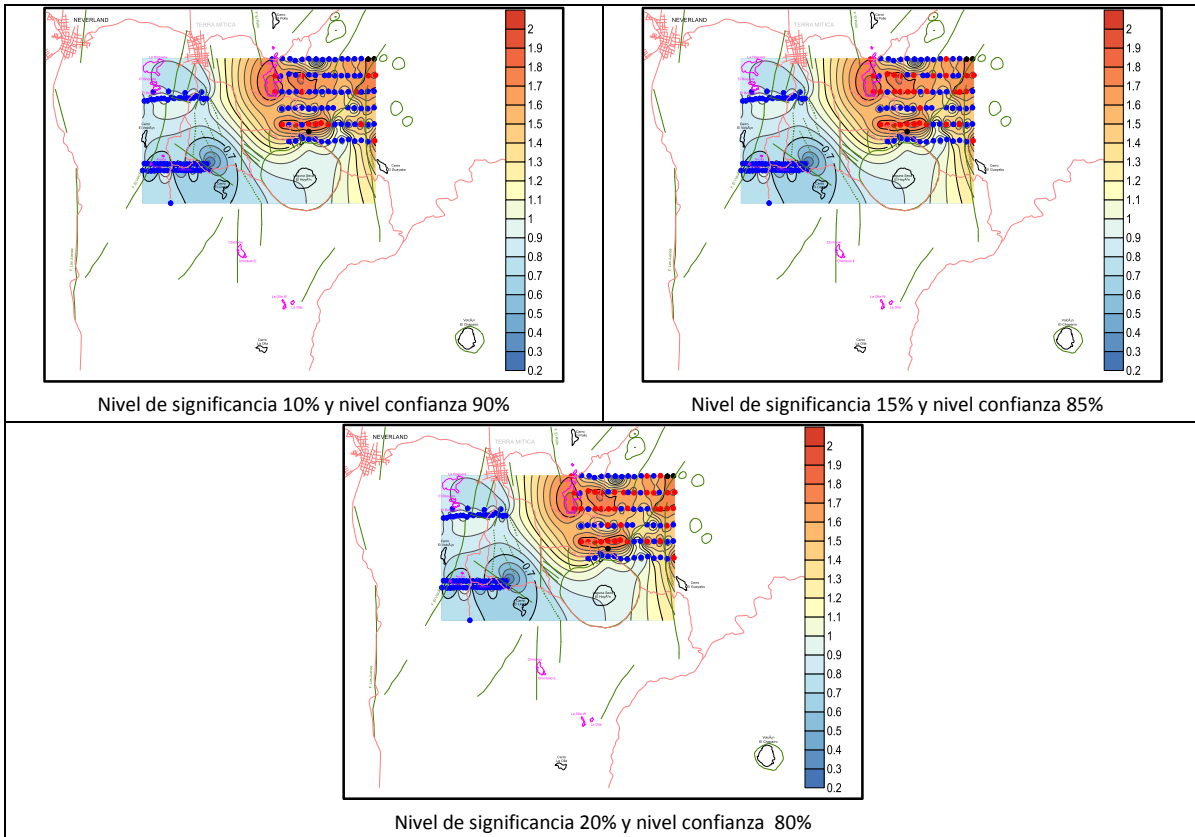


Log [CO₂] (ppm)

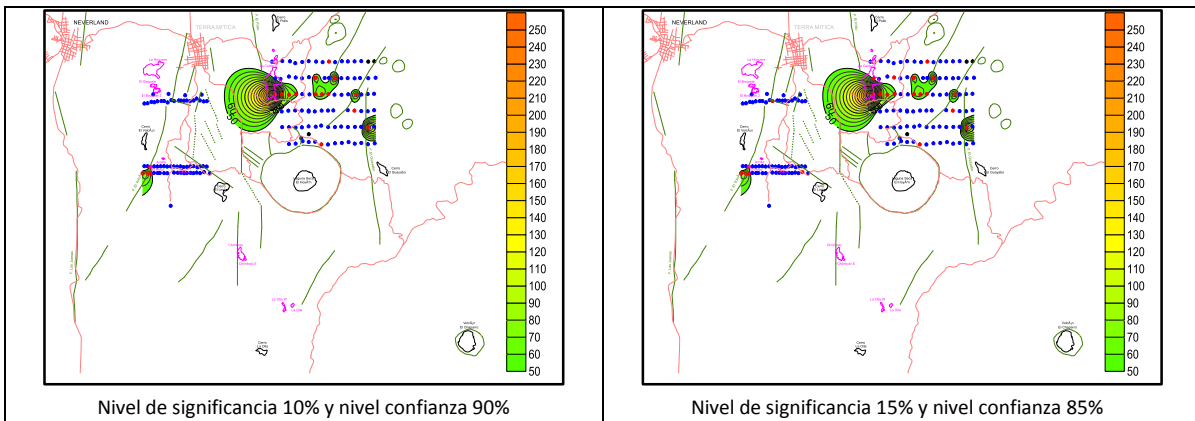


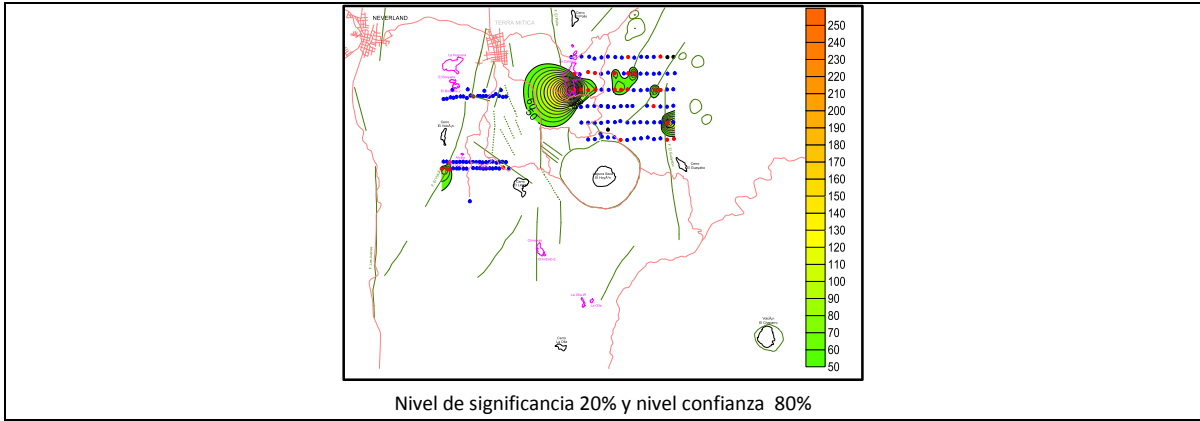
AÑO 2007

Helio (ppm)

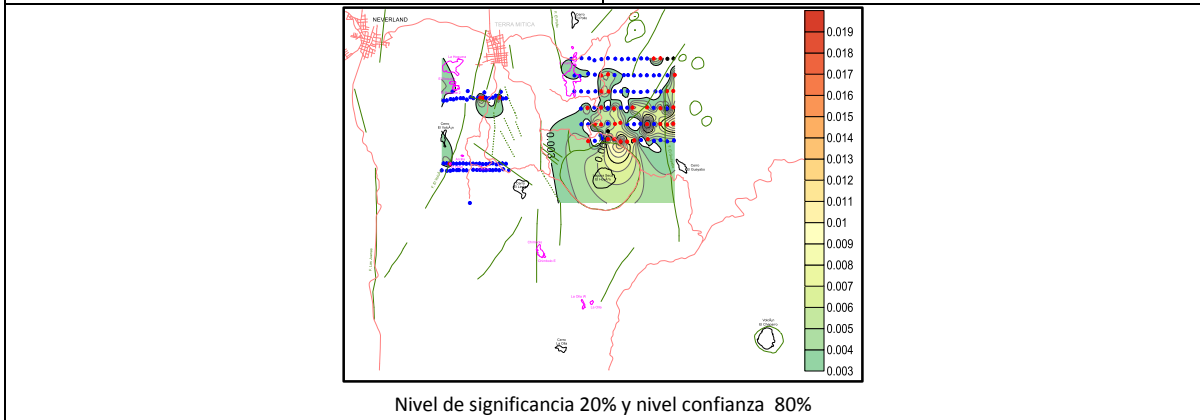
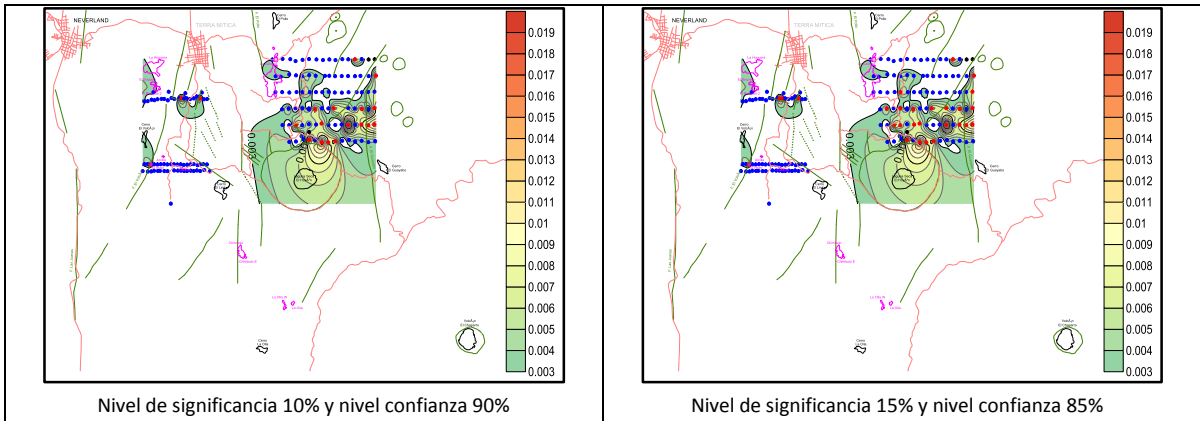


Radón (pCi/L)

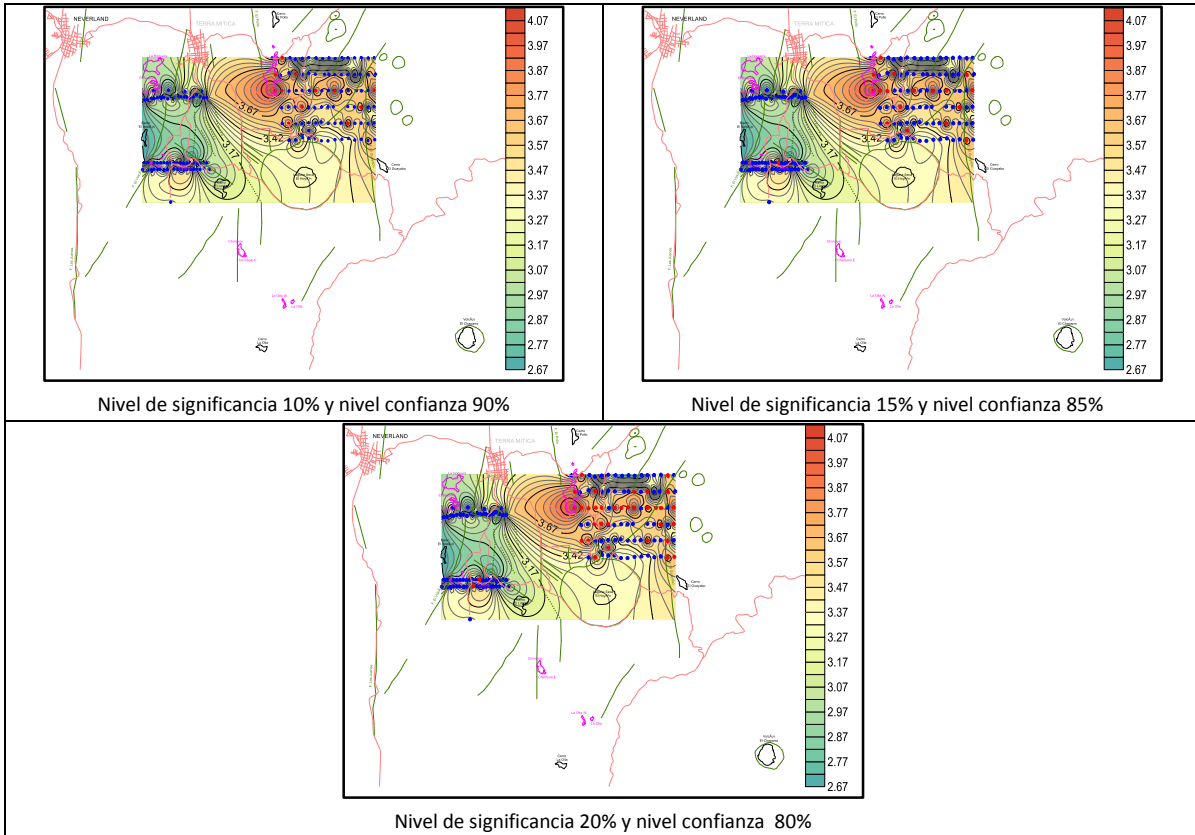




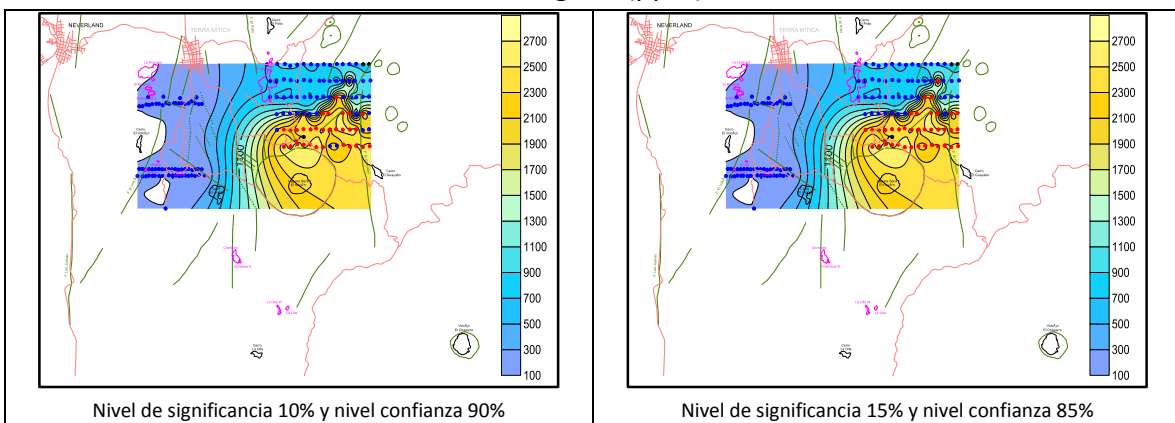
Mercurio (mg/m^3)

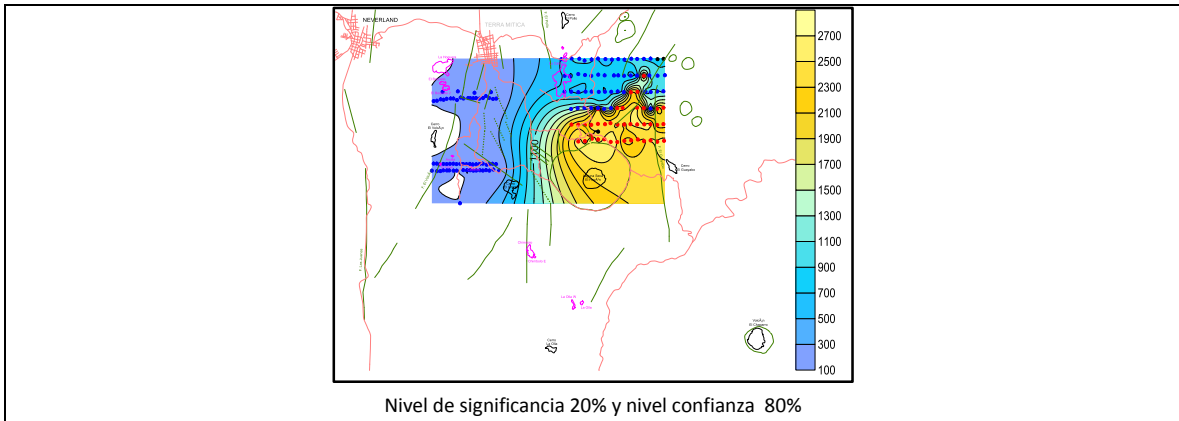


Log [CO₂] (ppm)



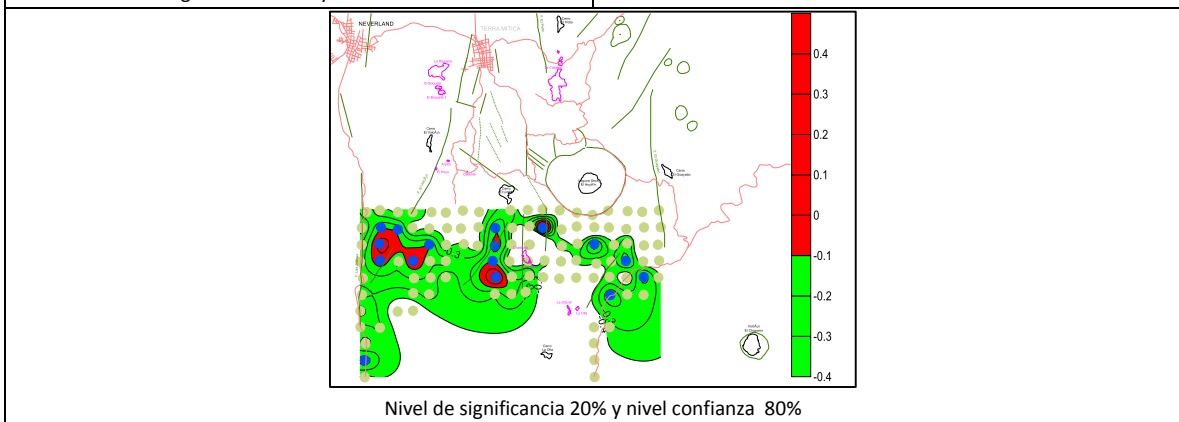
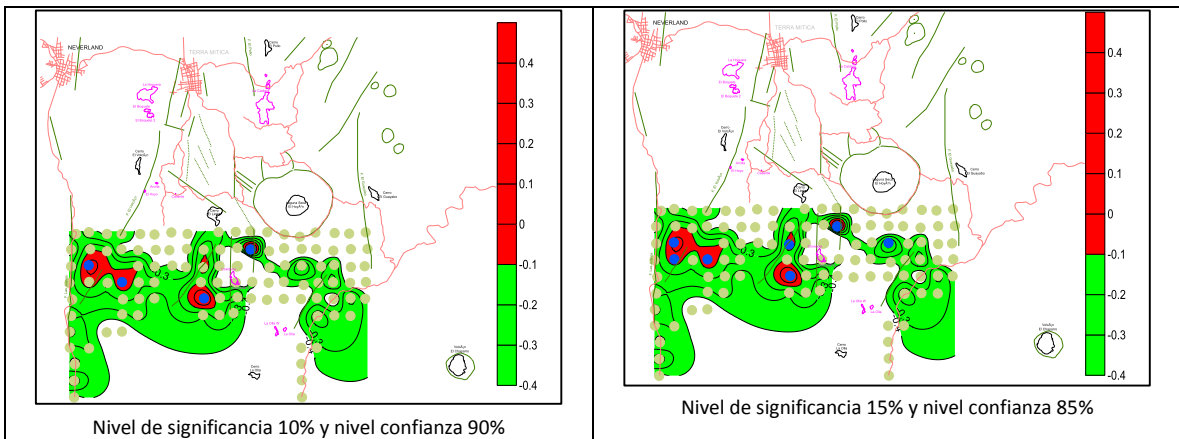
Hidrógeno (ppm)



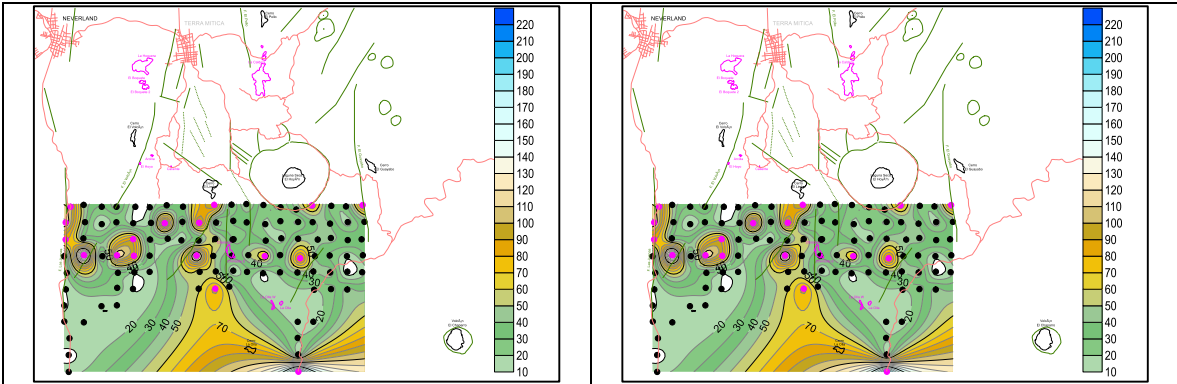


AÑO 2013

Helio (ppm)

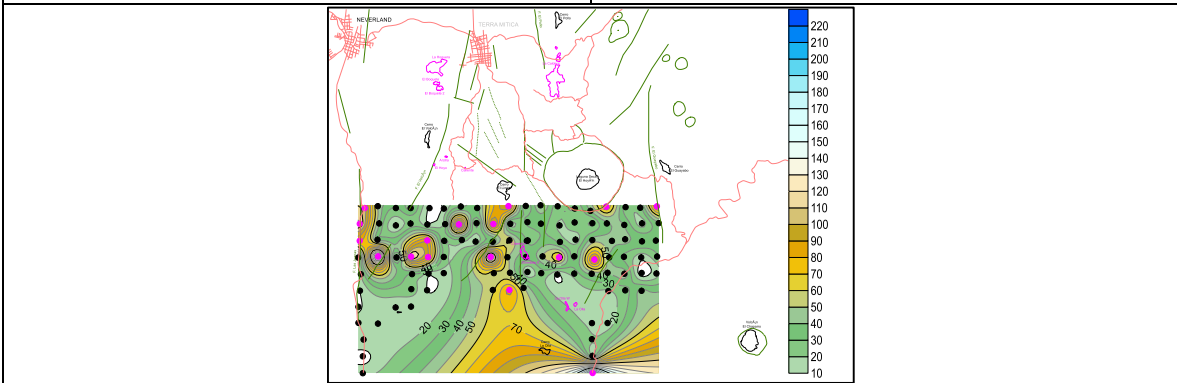


Flujo CO₂ (ppm)



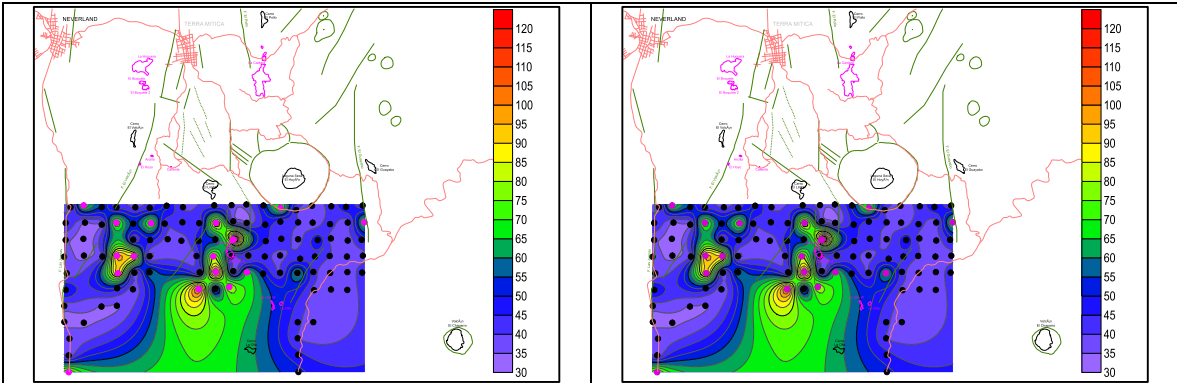
Nivel de significancia 10% y nivel confianza 90%

Nivel de significancia 15% y nivel confianza 85%



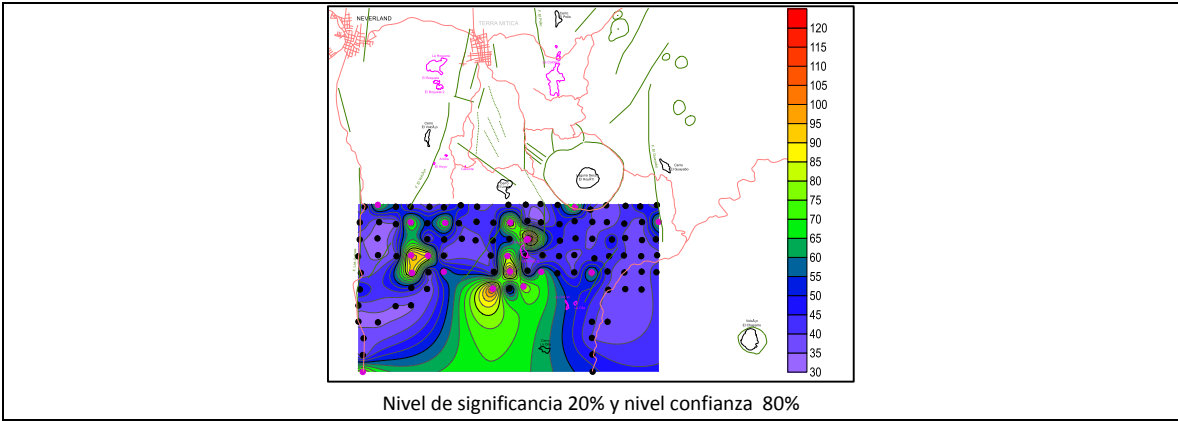
Nivel de significancia 20% y nivel confianza 80%

Hidrógeno (ppm)

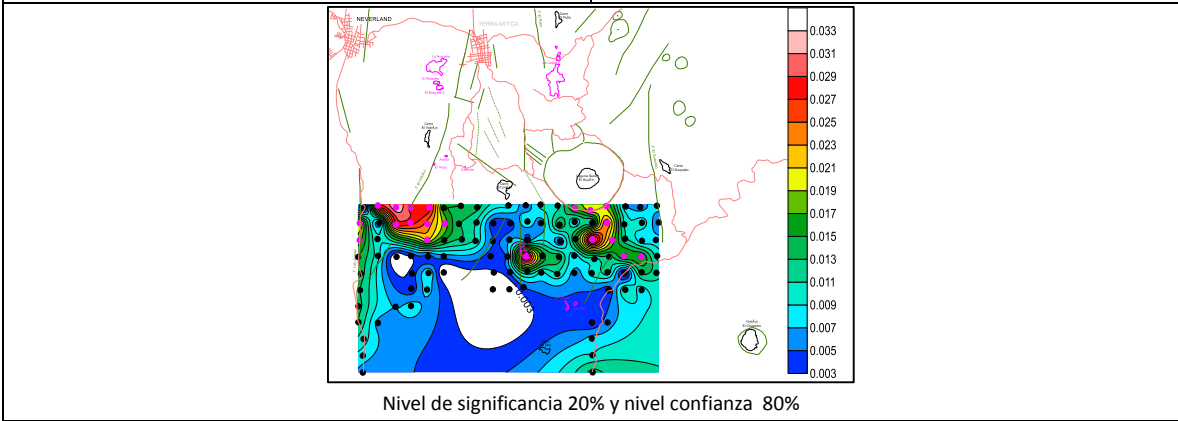
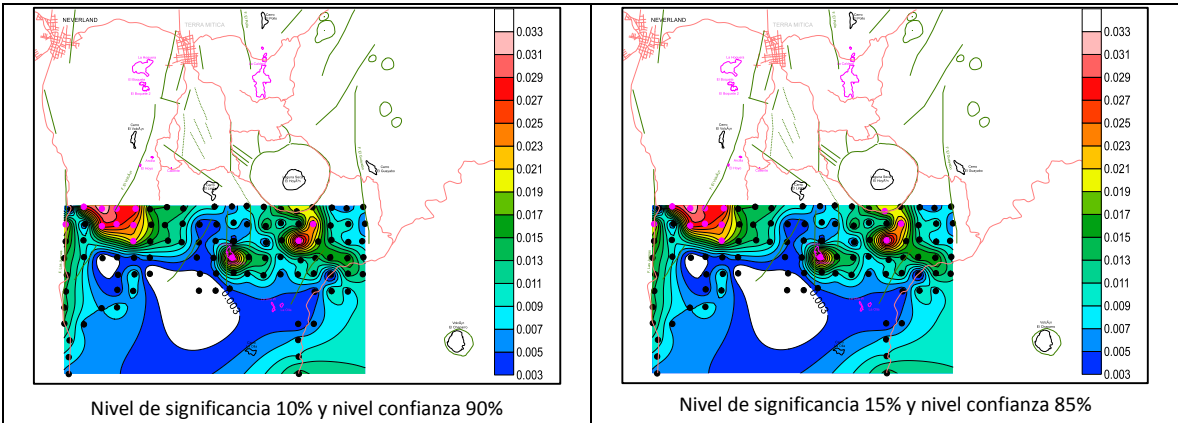


Nivel de significancia 10% y nivel confianza 90%

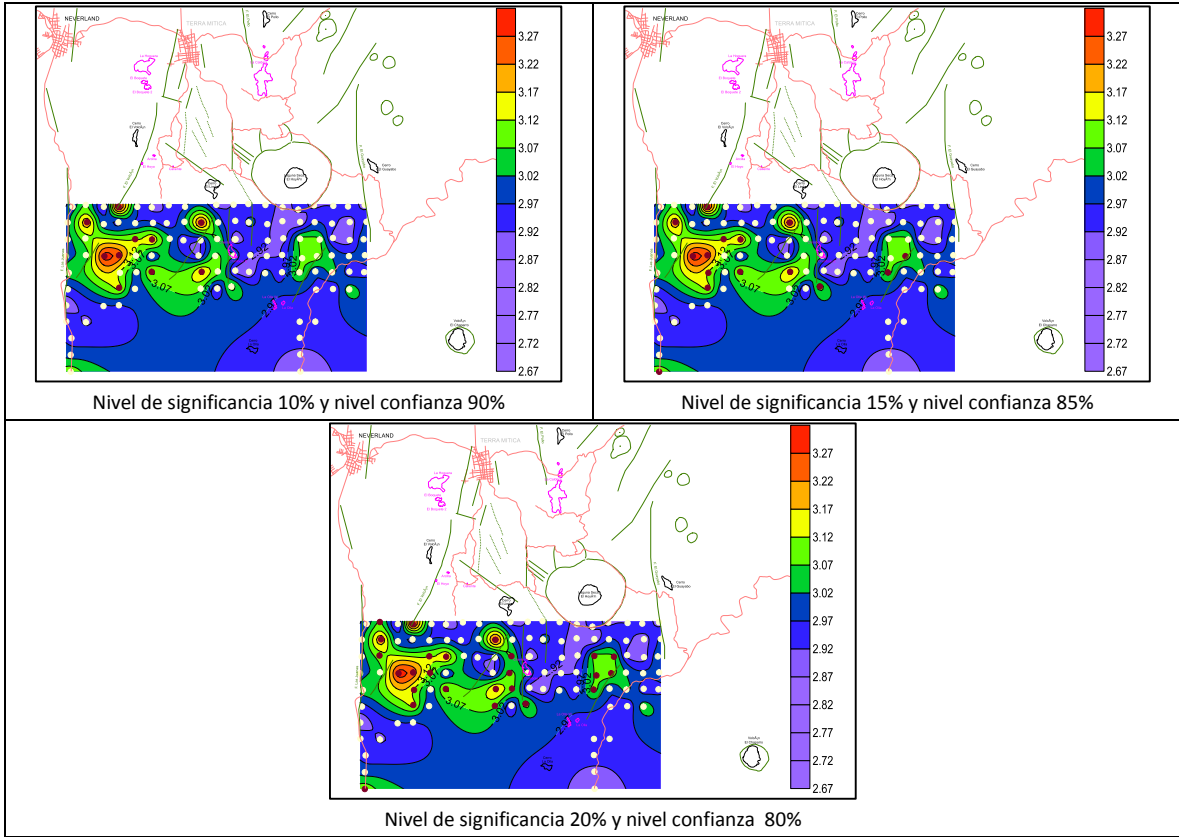
Nivel de significancia 15% y nivel confianza 85%



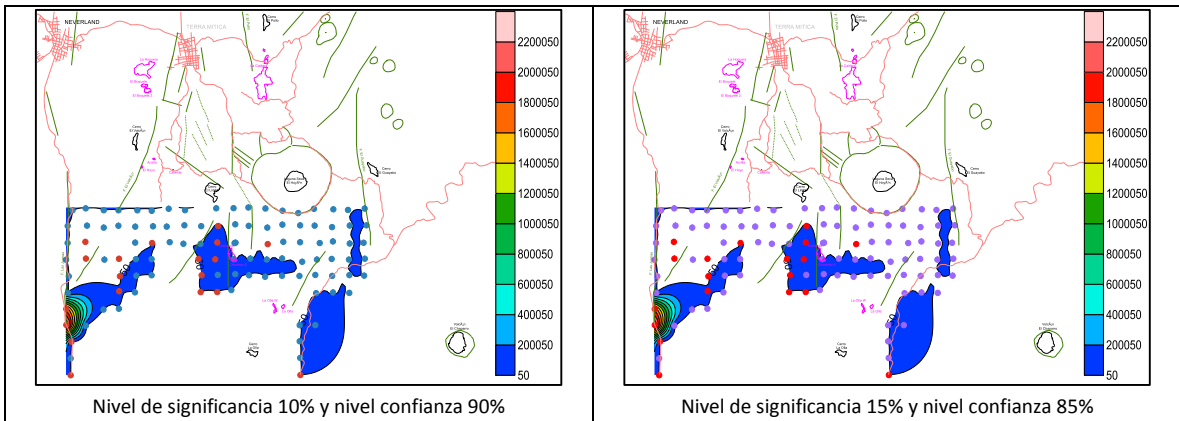
Mercurio (mg/m³)

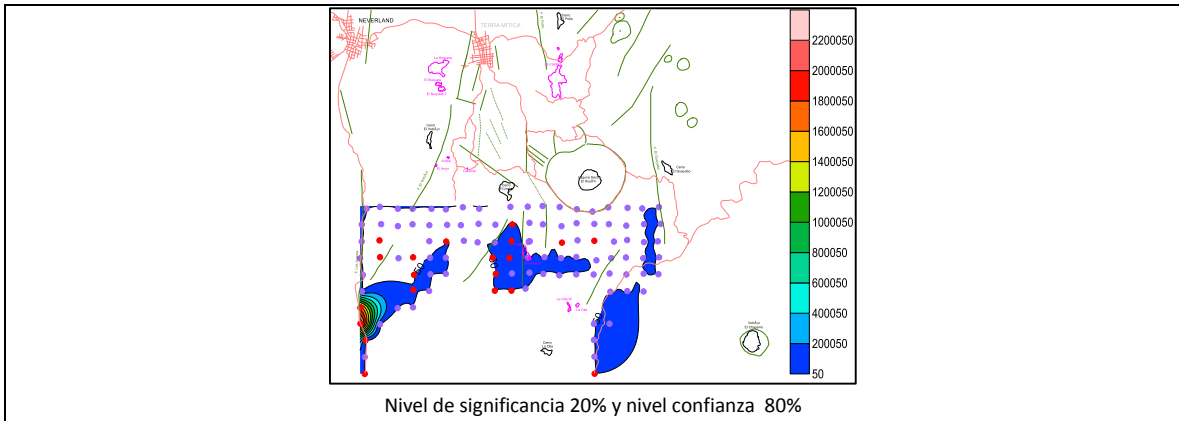


Log [CO₂] (ppm)



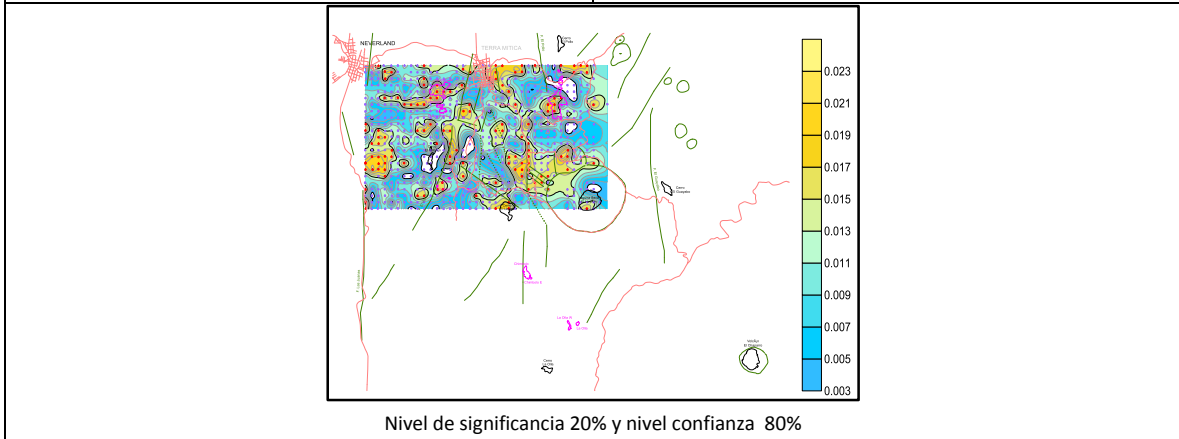
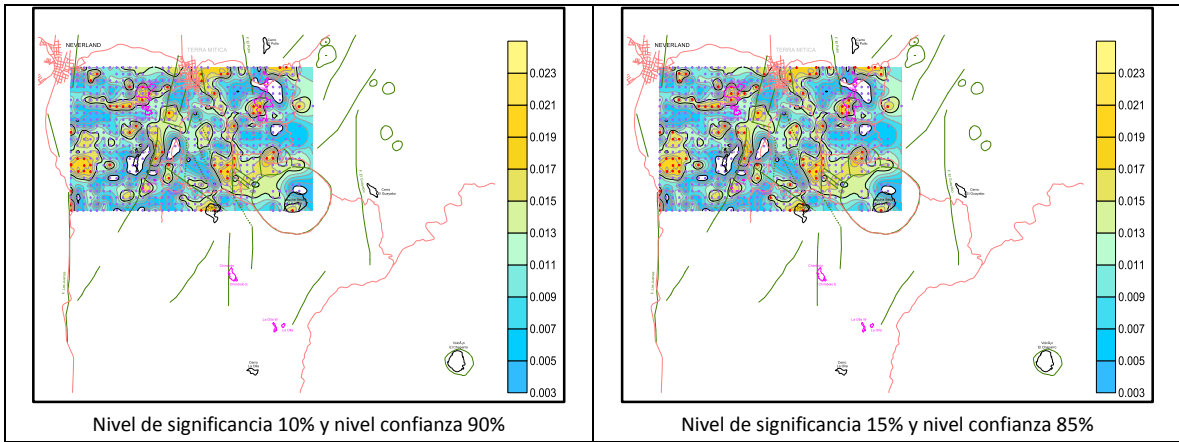
Radón (pCi/L)



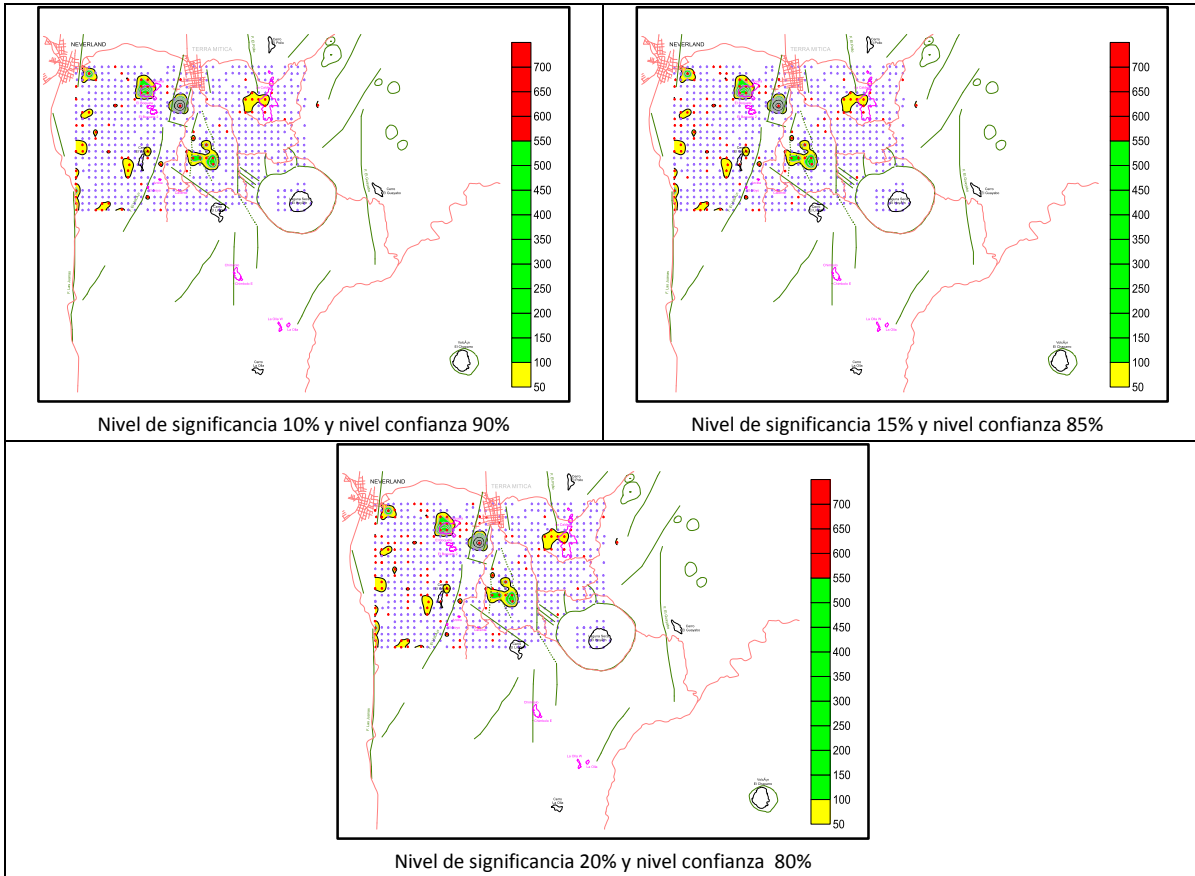


AÑO 2015

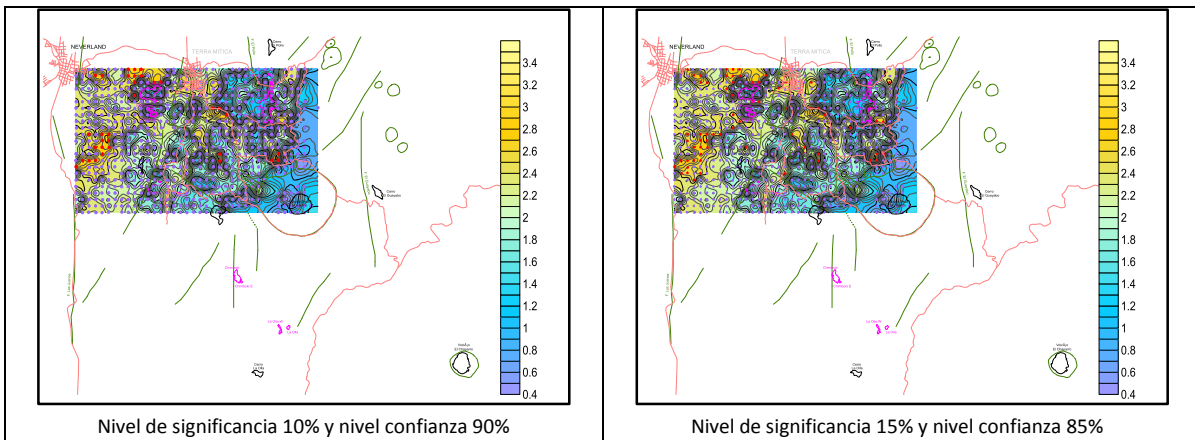
Mercurio (mg/m^3)

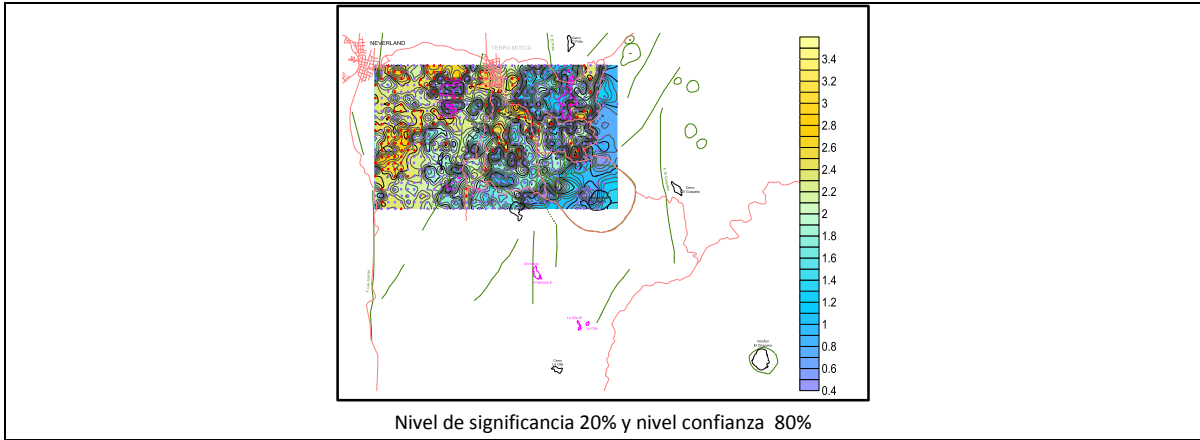


Radón (pCi/L)



Helio (ppm)





ANEXO 2. TRABAJO GRUPAL



ANEXO 3. ASESORÍAS



ANEXO 4. MONITOREO DE GASES REALIZADO EN LA GIRA DE CAMPO.

- Monitoreo realizado en Fumarola # 1 y comunidades aledañas.



- Monitoreo realizado en Fumarola # 2 y comunidades aledañas.



