



Universidad Veracruzana

Facultad de Estadística e Informática
Región Xalapa

Especialización en Métodos Estadísticos

Cálculo de flujo total y distribución espacial de CO_2 en suelos volcánicos

Reporte de aplicación para obtener el grado de
Especialista en Métodos Estadísticos

Presenta:

Emma Daira Baizabal Gómez

Director:

Dr. Angel Fernando Argüello Ortiz

Codirector:

Dr. Juan Andrés Sánchez García

Asesora externa:

Dra. Mariana Patricia Jácome Paz

29 de enero de 2025

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”



Universidad Veracruzana

Dr. Martín Gerardo Aguilar Sánchez
Cargo de Rectoría

Dr. Juan Ortiz Escamilla
Cargo de Secretaría Académica

Dr. Edgar Javier González Gaudiano
Director General de Estudios de Posgrado

Facultad de Estadística e Informática Región Xalapa Especialización en Métodos Estadísticos

Dr. Luis Gerardo Montané Jinérez
Director de la Facultad de Estadística e Informática

Dra. Cecilia Cruz López
Coordinadora de la Especialización en Métodos Estadísticos

Presenta:
Emma Daira Baizabal Gómez

Dr. Angel Fernando Argüello Ortiz
Director / Presidente de Jurado

Dr. Juan Andrés Sánchez García
Codirector / Secretario de Jurado

Dr. José Juan Muñoz León
Vocal de Jurado

Dra. Mariana Patricia Jácome Paz
Asesora

Datos de contacto

Av. Xalapa, S/N
Facultad de Estadística e Informática
Col. Obrero Campesina, C.P. 91020
Xalapa-Enríquez, Veracruz, México.

Tel. 01 (228) 842 17 00
Ext. 14196
ceccruz@uv.mx

www.uv.mx

UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Facultad de Estadística e Informática

El Comité Académico de la Especialización en Métodos Estadísticos y el director de este trabajo recepcional intitulado: **Cálculo de flujo total y distribución espacial de CO_2 en suelos volcánicos**, autorizan la impresión y la constitución del jurado para la defensa.

COMITÉ ACADÉMICO



Dra. Cecilia Cruz López

Coordinadora

Especialización en Métodos Estadísticos



Dr. Luis Gerardo Montañé Jiménez

Director

Facultad de Estadística e Informática



Dr. Juan Andrés Sánchez García

Vocal



Dr. José Juan Muñoz León

Vocal



Dr. Angel Fernando Argüello Ortiz

Director del Trabajo Recepcional

GENERACIÓN: 2023-2024

SEDE: Xalapa

TÍTULO: Cálculo de flujo total y distribución espacial de CO₂ en suelos volcánicos

AUTOR: Emma Daira Baizabal Gómez

DIRECTOR Y CO-DIRECTOR: Dr. Angel Fernando Argüello Ortiz; Dr. Juan Andrés Sánchez García

TIPO DE TRABAJO:

Reporte de aplicación ☒ Trabajo Practico-Educativo ☐ Desarrollo estadístico ☐ Monografía ☐

TIPO DE ESTUDIO:

Exploratorio	☐	Retrospectivo	☐
Descriptivo	☐	Prospectivo	☐
Expostfacto o cuasiexperimental	☒	Transversal	☐
Experimental	☐	Longitudinal	☐

METODOLOGÍA ESTADÍSTICA:

A) Diseño:

Muestreo	☐
Experimento	☐
Estudio observacional	☒

B) Análisis

Exploratorio	☒
Descriptivo básico	☒
Inferencia básica	☐
Métodos multivariados	☒
Regresión	☐
ANOVA y ANCOVA	☐
Control de calidad	☐
Métodos no paramétricos	☐
Modelos especiales	☒
Técnicas avanzadas	☐
Series de tiempo	☐

Índice

Índice	4
Agradecimientos	6
Agradecimientos técnicos	7
Resumen.....	8
Introducción	9
I. Capítulo inicial	13
Antecedentes	13
Planteamiento del problema	16
Justificación	17
Objetivos	18
Zonas volcánicas.....	19
Lago cráter.....	20
Volcán activo	22
Campo volcánico monogenético	25
II. Metodología	28
Obtención de datos.....	29
Técnicas de análisis	31
Emisiones totales	32
Agrupación estadística	33
Métodos geoestadísticos	34
III. Resultados	37
Análisis exploratorio.....	37
Flujo total	41
Análisis clúster.....	45
Autocorrelación espacial.....	49
Conclusiones	57
Referencias.....	59

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de número de moles.	30
Ecuación 2. Condición (q) de valores atípicos del límite superior.	31
Ecuación 3. Cálculo de toneladas de CO ₂ a través de la aproximación gráfica estadística (GSA). ...	33
Ecuación 4. Índice de Moran.	36
Ecuación 5. Indicador Local de Asociación Espacial.	36

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización de las áreas de estudio.	20
Figura 2. Mapas de CO ₂ de la superficie del Lago en abril de 2014 y abril de 2015. SP muestra la localización de las fuentes termales de Soap Pool. Fuente: Jácome-Paz et al. (2016).	24
Figura 3. Diagrama metodológico.	28
Figura 4. Histograma de cada zona analizada.	39
Figura 5. Distribución de niveles medidos de CO ₂ . Cráter Parangueo.	40
Figura 6. Distribución de niveles medidos de CO ₂ de Volcán Chichón.	40
Figura 7. Distribución de niveles medidos de CO ₂ de Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.	41
Figura 8. Gráfico de probabilidad acumulada para Lago Cráter Parangueo.	42
Figura 9. Gráfico de probabilidad acumulada para Volcán Chichón.	43
Figura 10. Gráfico de probabilidad acumulada para Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.	44
Figura 11. Análisis clúster. Lago Cráter de Parangueo.	46
Figura 12. Análisis clúster. Volcán Chichón.	47
Figura 13. Análisis clúster. Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.	48
Figura 14. Indicador Local de Asociación espacial LISA para Lago Cráter Parangueo.	50
Figura 15. Clústeres por nivel de autocorrelación CP.	50
Figura 16. Indicador Local de Asociación Espacial LISA para Volcán Chichón.	52
Figura 17. Clústeres por nivel de autocorrelación VC.	53
Figura 18. Indicador local de Asociación Espacial para CVMX.	55
Figura 19. Clústeres por nivel de autocorrelación CVMX.	55

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados medidos de tendencia central y dispersión.	38
Tabla 2. Clasificación de autocorrelación espacial. Fuente: elaboración propia.	56

Agradecimientos

Estoy sumamente agradecida con la Dra. Jácome, por la ayudarme a plantear la idea inicial a partir de la que se desarrolló este trabajo y por el apoyo con los sets de datos que fueron analizados; con el Dr. Angel Argüello, quien es el experto en Estadística, y Geoestadística, por creer desde el inicio en este trabajo, por todas las asesorías y explicaciones durante la especialización y por animarme a concluirla en momentos donde me encontraba en duda, muchas gracias; con el Dr. Andrés, por integrarse a este trabajo y aportar sus conocimientos y por las todas correcciones necesarias para mejorar el documento. También agradezco al Dr. Juan Muñoz, quien es lector de este trabajo, por dedicar un tiempo a la revisión y por cada uno de sus comentarios. Estoy muy agradecida por coincidir con este equipo, son todos maestros muy admirables, extraordinarias personas y excelentes ejemplos a seguir, ha sido muy grato trabajar bajo su dirección.

Agradezco a cada uno de mis maestros de la especialización por el tiempo dedicado a sus clases y por su esfuerzo con la elaboración de los materiales de aprendizaje y diseño de las prácticas. Agradezco coincidir con compañeros tan brillantes a quienes admiro y que se han vuelto además buenos amigos.

Gracias a mi familia. A Li: este trabajo también está dedicado a ti.

Gracias a Dios por exactamente todo.

Agradecimientos técnicos

Esta tesina fue realizada gracias al apoyo del proyecto PAPIIT DGAPA IA102123 “Exploración avanzada de los Baños, Veracruz, para usos directos de la energía geotérmica”, del Instituto de Geofísica de la UNAM, para la obtención de datos del Campo Volcánico de Xalapa.

Agradecimientos por la obtención de los datos del volcán Chichón al programa de monitoreo del volcán Chichón que se realiza por la colaboración del sistema de Protección Civil de Chiapas y el Instituto de Geofísica de la UNAM a cargo de la Dra. Mariana Patricia Jácome Paz. Dichos datos fueron proporcionados meramente por fines educativos.

Agradecimientos por los datos del Maar de Parangueo a los autores de la publicación citada como Jácome-Paz *et al*, 2020 (<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106558>).

Resumen

La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha incrementado en las últimas décadas a niveles superiores a 400 ppm; del mismo modo ha crecido la preocupación a nivel global sobre sus efectos como su relación con problemas de salud y presencia de fenómenos atmosféricos atípicos.

Dada la relación entre el aumento de CO₂ y el aumento de la temperatura global, así como su impacto en diferentes rubros resulta importante la caracterización de fuentes tanto naturales como antrópicas de esta sustancia. Las emisiones naturales son el conjunto de sustancias en forma de gas que se han acumulado en el subsuelo por procesos dinámicos del planeta Tierra y se liberan a través de zonas de permeabilidad las cuales permiten su ascenso a la superficie e incorporación a la atmósfera. En geociencias, estas emanaciones de gas que provienen del subsuelo son conocidas como emisiones difusas y se pueden producir por vulcanismo o sistemas tectónicamente activos, principalmente.

La medición de emisiones difusas se utiliza para conocer cambios en la actividad volcánica cuando existe variación en la desgasificación, por lo cual es parte del monitoreo geoquímico de volcanes. Para medir la desgasificación total de un suelo volcánico se hace uso de técnicas estadísticas, que tienen asociado cierto grado de incertidumbre.

Este trabajo muestra la aplicación de técnicas estadísticas sobre tres diferentes sets de datos de distintas áreas de estudio como lo son: un lago cráter, un campo volcánico activo, y un campo volcánico monogenético. Los resultados obtenidos son los análisis exploratorios, los flujos totales en cada área y el análisis clúster y de autocorrelación espacial de CO₂.

Palabras clave: estudio de emisiones difusas, autocorrelación espacial, CO₂. zonas volcánicas

Introducción

El dióxido de carbono es una sustancia encontrada en su naturaleza en forma de gas. En las primeras etapas de formación de la tierra, como producto de extensos periodos geológicos de actividad volcánica, esta sustancia se acumuló en gran cantidad en una atmósfera primitiva. Esta abundancia de CO₂, se incorporó a las células de los primeros organismos vivos, los cuales lo degradaron con energía solar para producir alimento en forma de glucosa y liberar oxígeno. Con el tiempo la alta concentración de CO₂ evolucionó en una relación inversamente proporcional con el oxígeno como resultado de la interacción entre las esferas terrestres (Valverde, 2020), para finalmente llegar a su concentración en la era geológica actual ~300 ppm (Canadell *et al.*, 2021).

Los dos ciclos naturales del carbono, el ciclo biológico y el ciclo geológico han sido caracterizados y continúa sumándose información sobre el comportamiento del CO₂ que contribuye a explicar su dinámica: su almacenamiento temporal en rocas, océanos, seres vivos y suelo, y su emisión hacia la atmósfera como resultado de procesos que liberan esta sustancia (Sundquist, E., Broecker, W., (eds.) 1985; Schimel, D., 1995; Key, *et al*, 2004; Isson, *et al.*, 2020; Canadell *et al.*, 2021). Para una idea general de la proporción de CO₂ en la atmósfera, su composición actual de acuerdo con Rohli, R. y Vega, A. J. (2018), el dióxido de carbono CO₂, está presente en la atmósfera en un 0.041%, el 78.08% corresponde a nitrógeno molecular N₂, 20.95% a oxígeno O₂ y 0.93% de Argón, y otros gases.

En las últimas décadas la concentración de CO₂ en la atmósfera ha incrementado a niveles superiores a 400 ppm (Fedorov, 2014), desencadenando preocupación sobre sus efectos a nivel global. Aunado a lo anterior, sustancias como CO_x, CH₄, CFC's y NO_x presentes en la atmósfera, luego de ser estudiadas se clasificaron como gases de efecto invernadero (GEI/GEG), es decir, por sus características estructurales absorben la radiación solar e impiden que la radiación infrarroja se reflecte de vuelta al espacio, ocasionando este “efecto invernadero”, cuya consecuencia es el aumento de temperatura terrestre (Benavides Ballesteros y León Aristizábal, 2007). El dióxido de

carbono es el principal gas que contribuye al efecto invernadero, y, de acuerdo con Baines y Worden (2004), presenta el rango de emisión más alto con 62.5% de emisiones globales totales.

Derivado del aumento de la temperatura terrestre se experimentan cambios en las condiciones naturales actuales, mismos que suponen un desafío a nivel global como condiciones climáticas extremas, sequías entre otras (i.e. Naumann *et al.*, 2018; Robinson *et al.*, 2021), además de fenómenos sociales y biológicos en consecuencia como desarrollo de enfermedades, hambruna, migraciones, extinciones (i.e. Kurane, 2010; Cahill, 2013; Mirzabaev *et al.*, 2023; Almulhim *et al.*, 2024; Daoust y Selby, 2024). Una vez señalada la relación entre el aumento de CO₂ y el aumento de la temperatura global, así como sus consecuencias, se clarifica la importancia de caracterizar las fuentes que están aportando CO₂ a la atmósfera, estudiando los niveles de concentración y la forma en cómo se distribuyen espacialmente las emisiones, para contribuir con información para abordar la citada problemática desde diferentes aristas.

En relación con lo anterior, los dos tipos de fuentes que emiten CO₂ son las de origen antrópico y las de origen natural, que sumadas generan un rango total entre 570 y 870 billones de toneladas por año, esto sin considerar la cantidad producida por incendios forestales. La mayor parte de emisiones antropogénicas de CO₂ están relacionadas con actividades propias de la era industrial en las últimas décadas, como son la quema de combustibles fósiles en un 80%, agricultura en un 9%, producción de cemento y concreto en un 6%, y deforestación en un 5% (Yurak y Fedorov, 2024) Como parte de la preocupación a nivel internacional sobre esta problemática se han generado sinergias para reducir estas emisiones antropogénicas, que tienen como base acuerdos internacionales i.e. Protocolo de Montreal, 1987; Protocolo de Kyoto de 1998, los Objetivos de Desarrollo Sostenible derivados del Acuerdo de París, 2015.

Por otra parte, las fuentes naturales de CO₂ son procesos que ocurren en el océano en un 43%, la respiración de organismos vivos en un 28.5%, respiración del suelo en un 28.3%, vulcanismo en un 0.1% y la formación de minerales en 0.1% de acuerdo con

Yurak y Fedorov, (2024) y el rango total de emisiones varía en un aproximado entre 550 y 850 billones de toneladas por año, en promedio entre 720 y 770 billones de toneladas anuales de acuerdo con literatura en el periodo de 1990 a 2022, esto es entre el 95 y 97% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera se generan por fuentes naturales. Es importante señalar que la respiración de organismos vivos y los procesos que ocurren en el océano son dos procesos naturales que además de emitir también absorben CO₂. La respiración de organismos vivos absorbe, a causa del proceso de fotosíntesis, aproximadamente el doble de la cantidad de CO₂ que emite, mientras que los procesos dados en el océano absorben entre el 95% y 99% de la cantidad que emiten. La respiración de suelos, el vulcanismo y la formación de minerales sólo emiten CO₂ a la atmósfera.

De las anteriores fuentes naturales de emisión de CO₂ mencionadas, se considera dentro de vulcanismo la desgasificación de CO₂ que proviene desde el interior de la Tierra. Este flujo en superficie muestra evidencia de la configuración tectónica y ambientes geológicos particulares en cada región (Tamburello *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019; Chiodini *et al.*, 2020) por ello, no solo el vulcanismo contribuye a la desgasificación del suelo por procesos que ocurren al interior de la tierra, sino que también los fenómenos de hidrotermalismo, y sismicidad emiten CO₂ a la superficie. El mecanismo de desgasificación ocurre a través de fallas y fracturas activas pues facilitan el ascenso de gases geotérmicos o magmáticos que se encuentran a profundidad, así se propaga desde la corteza terrestre, donde están contenidos, hasta la superficie de la Tierra. Es así como el vulcanismo local y regional, regiones que presentan hidrotermalismo y regiones sísmicas activas son suelos donde se estudia la desgasificación de CO₂.

El término utilizado en geociencias para referirse a la desgasificación del suelo es emisiones difusas (Baubron, *et al.*, 1990), y se refiere a los flujos de CO₂ y otros gases (i.e. He, Ra, CH₄, HS) que se han acumulado en capas internas de la Tierra y a través de zonas de permeabilidad ascienden hasta alcanzar la superficie e incorporarse a la atmósfera. El fundamento del estudio de emisiones difusas de CO₂ es cuantificar la

desgasificación del suelo y asociarla con las dinámicas al interior de la Tierra que han tenido lugar en un área.

Según el área de estudio, el análisis de emisiones difusas puede aportar datos para conocer cambios en la actividad volcánica ya que la emanación de gases es un indicador precursor de erupciones, y resulta muy apropiado en volcanes de baja actividad o dormidos revelando un aumento de la permeabilidad del suelo o microfracturación de las rocas subyacentes de acuerdo con Baubron *et al.*, (1991), y se realiza a través de mediciones de la variación de la desgasificación en suelo como monitoreo geoquímico volcánico. También se utiliza para conocer la estructura espacial de sistemas geotérmicos o delimitar estructuras geológicas que presentan un aumento de fluidos a través de contrastes de permeabilidad (Jácome-Paz et al., 2022a; Jácome-Paz y Delgado-Granados, 2022). En materia de protección civil, esta información contribuye a la planeación y elaboración de programas de prevención de riesgos geológicos.

El estudio de emisiones difusas se basa en las mediciones directas de flujos de CO₂ en el suelo siguiendo el método de la cámara de acumulación, como parte de trabajo de campo del área a caracterizar y se registran las observaciones. Posteriormente, los datos pasan por una limpieza para conseguir un set que se puede analizar. En la siguiente fase, para estimar la desgasificación total de suelos volcánicos en un área se emplean métodos que tienen una base estadística (Graphical Statistical Approach-GSA, Sequential Gaussian Simulation-SGSim), usualmente de esta forma se reporta el flujo total del área estudiada, con los resultados de ambas técnicas junto con el promedio y valores máximos y mínimos obtenidos.

Por otra parte, el enfoque estadístico gráfico permite una definición de un intervalo de confianza para la estimación, pero no toma en cuenta la correlación espacial de los datos, por lo que se sobreestima la incertidumbre (IAVCE, s.a.).

I. Capítulo inicial

Antecedentes

En las ciencias del suelo, naturalmente, surgió el interés por estudiar la desgasificación superficial de CO₂. En una primera etapa conocer el flujo de CO₂ fue importante como parte de estudios aplicados de Agronomía, Ecología o Botánica y se desarrollaron técnicas de medición y métodos de análisis para encontrar relación entre la desgasificación de dióxido de carbono y variables como crecimiento de cultivos (Lundegardh, 1927), restauración de suelos (Mina, 1962), evolución de CO₂ en el suelo (Minderman, G., Vulto, J., 1973; Schwartzkopf, S., 1978) la respiración de suelos en ecosistemas (Reiners W. A. 1968; Kucera, C., Kirkham, D., 1971; Singh, J., Gupta, S., 1977; Gupta, S., Singh, J., 1977), o en relación con comunidades de plantas (Lieth, H., Ouelletle, R., 1962).

En Geoquímica, el interés y estudio de la desgasificación de CO₂ en zonas volcánicas ha sido desarrollado a partir de su importancia en el monitoreo geoquímico de fluidos volcánicos. El análisis de la cuantificación y composición de gases para monitoreo volcánico aparece en el trabajo de Noguchi, K., y Kamiya, H., (1963) del departamento de química, de la Universidad Metropolitana de Tokio, como una aproximación al estudio de niveles de flujos de gases volcánicos como precursores de una erupción, refiriéndose a la emanación de gases durante actividad volcánica a través de los conductos de salida principales; posiblemente surge debido al ambiente de vulcanismo y actividad sísmica frecuente en la región de estudio.

En el reporte de Sato y McGee (1980) se demostró que, además de la expulsión de gases a través de los conductos principales observados como el cráter o fumarolas, existía una desgasificación de H₂ en suelos volcánicos en zonas donde no se observaron salidas evidentes de vapor y gases volcánicos. A través del monitoreo continuo de H₂ en el flanco sur del Monte Santa Helena, en este estudio se pudo probar que el H₂ fue emitido desde el sistema volcánico a través del respiradero central del volcán Santa Helena y a través del flanco estudiado, agregando que la emisión de H₂

a través del suelo en la zona de monitoreo se produjo de forma retardada respecto a la emisión del respiradero central, con una diferencia de varias decenas de horas y que la cantidad incrementó un poco unos días antes de la erupción; además, agrega que las emisiones de H_2 no periódicas correlacionadas con actividades magmáticas manifestadas por erupciones, alta desgasificación y/o temblor volcánico sugieren un origen magmático del H_2 en lugar de un origen por interacción entre agua meteórica y rocas como solía pensarse.

Luego de estos hallazgos en H_2 fue implementado el estudio de emanaciones de CO_2 en suelos de volcanes en actividad, mostrando que grandes cantidades de CO_2 , He, Ra escapan de manera difusa, o como los autores definen de inicio “dispersa”, desde los flancos del Monte Etna en Sicilia, sumadas a las desgasificaciones de alta temperatura que emana de manera localizada en la cumbre del cráter (Carbonell, Zettwoog, 1982; Carbonell *et al.*, 1985, ambos en Baubron *et al.*, 1991). A raíz de esta nueva propuesta para pronosticar actividad volcánica se generaron más investigaciones que demostraban el origen magmático de esas emanaciones laterales o no fumarólicas y su potencial utilidad como indicador de anomalías termales subsuperficiales y/o fallas activas. Se realizaron mediciones en volcanes en etapa de descanso como el Vesubio, Vulcano o Solfatara en Italia, y otros en Pequeñas Antillas e Indonesia reuniendo evidencias en todas las zonas estudiadas para coincidir en que la emisión difusa de gases es un fenómeno que afectó a estos volcanes y fue posible relacionar este fenómeno con su nivel de actividad (Baubron *et al.*, 1991).

En cuanto a la relación entre el flujo de CO_2 y la actividad sísmica y zonas de debilidad estructural, través de estudios de isótopos estables se logra la identificación de fuentes de CO_2 especialmente donde no se encuentra evidencia superficial. El análisis es abordado por Barnes *et al.*, (1978) al estudiar en conjunto la distribución global de descargas de CO_2 y las zonas de mayor sismicidad. Como antecedente mencionan la relación entre las descargas de CO_2 y las fallas mayores en California mostradas por Barnes *et al.* (1975) en un mapa local, es en este trabajo donde también concluyen que un movimiento de arrastre asísmico a lo largo de ciertos segmentos de la falla de San

Andrés se relacionó probablemente con agua con alto contenido de CO₂ presente en una desviación estructural. Esta relación condujo a realizar una compilación global de la relación entre descargas de CO₂ y sismicidad, encontrando que: las diferentes etapas de metamorfismo regional, que son procesos donde ocurre la formación de minerales, se encuentran asociadas a las fuentes que originan CO₂, como los cinturones orogénicos de Europa y Asia Menor, así como también las cordilleras costeras de California.

El estudio de la desgasificación del suelo en áreas de vulcanismo tomando en consideración las fallas y fracturas activas dentro de la zona fue realizado por Cardellini *et al.*, (1998), donde se realiza el cálculo del flujo total según la metodología del enfoque estadístico gráfico GSA, por Sinclair (1974) se crean un gráfico de probabilidad acumulada de los flujos de CO₂ en escala logarítmica y se dividen las observaciones de acuerdo con los valores obtenidos en dos, tres o cuatro grupos. Una vez clasificados los valores los autores realizan un mapa colocando la simbología según el grupo de valores y de esta forma se visualiza con facilidad los puntos de mediciones con mayor desgasificación y se demuestra que fallas y fracturas activas actúan como canales ascendentes de gases geotérmicos o magmáticos que se encuentran a profundidad y que tienen alto contenido de CO₂.

Actualmente, en el contexto de calentamiento global el dióxido de carbono se considera un gas de efecto invernadero, y se cuantifican emisiones de CO₂ por vulcanismo para mayor comprensión de la proporción de emisiones según la fuente. Una evaluación global reciente de flujos de dióxido de carbono por vulcanismo subaéreo fue realizado por Fisher (2019), incorporando tecnología de rastreo satelital de dióxido de azufre, el seguimiento de redes terrestres de detección de dióxido de carbono y dióxido de azufre. Asimismo, plantea un nuevo enfoque de estimación de parámetros clave de gases volcánicos basados en la composición del magma de cada zona en particular, realizado a través de un cálculo estadístico que permitió realizar una aproximación para conocer la cantidad por año (Tg/yr) que emite específicamente el vulcanismo de tipo subaéreo, considerando en total 898 volcanes superficiales entre

los años 2005-2015, y obteniendo un total de 51.3 ± 5.7 teragramos de CO_2 por año, más 1.8 ± 0.9 teragramos de CO_2 por año de desgasificación no eruptiva, aproximadamente 53 millones de toneladas por año.

Un ejemplo de estudio de monitoreo de volcanes reciente es el reporte de los flujos totales de dióxido de carbono, así como también la distribución espacial alrededor de áreas determinadas del volcán Stromboli en Italia (en Inguaggiato, 2013), en el cual se utilizaron técnicas estadísticas como Graphical Statitital Approach o GSA y la técnica estadística de simulación gaussiana (SGS), para reportar el flujo total del área a través de estimaciones. Para el cálculo de la distribución espacial de emisiones difusas en el citado estudio se modeló un variograma con los datos y se generó una interpolación para diferenciar las zonas de desgasificación más significativas.

Planteamiento del problema

Los fenómenos de vulcanismo y sismicidad son resultados superficiales de la dinámica terrestre que tiene lugar en las capas interiores de la tierra. Los citados fenómenos naturales, según su intensidad, han sido históricamente asociados a eventos catastróficos debido al impacto que tuvieron sobre los centros de población más próximos a la zona de ocurrencia y con ello la pérdida de vidas humanas (i.e. Monte Tambora, Indonesia, 1851 con 71 mil pérdidas humanas; isla volcánica Krakatoa, 1883, con más de 30 mil pérdidas humanas; Nevado del Ruiz, Colombia, 1985, más de 20 mil pérdidas humanas). Una de las aplicaciones más importantes de la generación de conocimientos sobre vulcanismo y sismicidad es la búsqueda de métodos de monitoreo e indicadores que anticipen un estado de peligro para la población más cercana a zonas de ocurrencia, esto significa que los conocimientos en el área de vulcanismo y sismicidad tienen un papel importante en estudios de peligro geológico y en la prevención de riesgos geológicos al ser aplicados a la protección civil.

La estimación del nivel de desgasificación difusa requiere metodologías estadísticas, sin embargo, al emplearlas cada técnica supone un grado de incertidumbre asociado,

dicha incertidumbre no es bien entendida y esto conduce a que los resultados de cada procedimiento se lean con variación importante, considerando no solo un resultado definitivo, sino solo uno aproximado. Actualmente, el esfuerzo por cuantificar emisiones difusas de CO₂ de origen natural, se destaca en el marco de una necesidad por obtener datos que permitan conducir a planes de mitigación de efectos del calentamiento global y en general del cambio climático, por ello es importante considerar la mayor precisión posible al cuantificar emisiones de origen natural y contrastarlas con registros históricos o emisiones antropogénicas según propuestas de abordaje de estudios a futuro.

Por otra parte, el geoprocesamiento de los datos para visualizar su distribución y predecir patrones de comportamiento, y/o estructuras de desgasificación difusa tiene áreas de oportunidad en las proyecciones de las emisiones difusas en suelos volcánicos utilizando herramientas de análisis geoestadístico que aún no han sido utilizadas o exploradas para su implementación en la representación espacial de este tipo de estudio.

Preguntas de investigación

¿Varía el nivel de desgasificación según el tipo de suelo volcánico?

¿Existe autocorrelación espacial entre la ubicación de los puntos muestreados y el valor de los registros medidos?

Justificación

Las fuentes naturales que emiten CO₂ a la atmósfera se consideran en cinco grupos, de los cuales dos realizan un proceso de reciclaje del CO₂ al emitir, pero también absorber este gas y que son los procesos que ocurren en el océano y la respiración de organismos vivos. Por otra parte, la respiración del suelo, el vulcanismo y la formación de minerales, que son los otros tres grupos de estas fuentes naturales,

constituyen procesos que sólo emiten esta sustancia a la atmósfera. Estos procesos, en conjunto con las actividades antropogénicas son las fuentes más importantes que se necesitan cuantificar con mayor precisión por ser las que, a causa de su emisión a la atmósfera, estarían contribuyendo de manera principal a un aumento de la concentración del CO₂.

En este trabajo se aplican los métodos utilizados al reportar niveles de desgasificación difusa de CO₂ en tres diferentes áreas volcánicas para comprar el nivel de desgasificación, asimismo se busca estudiar y hacer uso de los métodos de análisis geoestadístico para conocer su distribución espacial y concluir así sobre las bondades de las técnicas utilizadas en la caracterización de tres áreas de estudio que serán descritas en breve en las secciones siguientes. Al implementar estas pruebas, se busca contribuir al estudio de emisiones difusas aportando información que puede utilizarse en estudios locales de interés y con el uso de métodos geoestadísticos se busca facilitar la identificación de estructuras de desgasificación difusa. Asimismo, la interpretación de los resultados hace posible la caracterización de los puntos estudiados según la fecha de la toma de datos.

Objetivos

General

- Estimar el nivel de asociación espacial de la desgasificación en suelos volcánicos con datos de emisiones difusas de CO₂ por tipo de suelo volcánico.

Particulares

- Estimar el nivel de desgasificación de los registros de flujo de CO₂ por zona volcánica.

- Identificar el nivel de autocorrelación espacial en los registros de flujo de CO₂ por zona volcánica.
- Comparar la autocorrelación espacial de los flujos de CO₂ por zona volcánica mediante el índice de Morán Local.

Zonas volcánicas

Esta sección se estableció con la finalidad de caracterizar las áreas de estudio según los tipos de suelos volcánicos sobre los que se han medido los flujos de CO₂ y que se consideran en este trabajo. De este modo, en seguida se describen las características generales de los tres tipos de áreas geológicas donde se midió la desgasificación difusa del suelo, y que corresponden a un lago cráter, un volcán activo y un campo volcánico monogenético. Así como también se describe cada una de las áreas de estudio en particular, donde se exponen con brevedad los rasgos geológicos que presentan para conocer el contexto en que cada uno se encuentra. En la figura 1 se agrega un mapa de ubicación para visualizar las tres zonas dentro del territorio mexicano. El área CP se refiere al Lago Cráter de Parangueo. El área VC, corresponde al Volcán Chichón, y el área CVMX es el Campo Volcánico Monogenético de Xalapa. Estas áreas serán descritas a detalle enseguida.

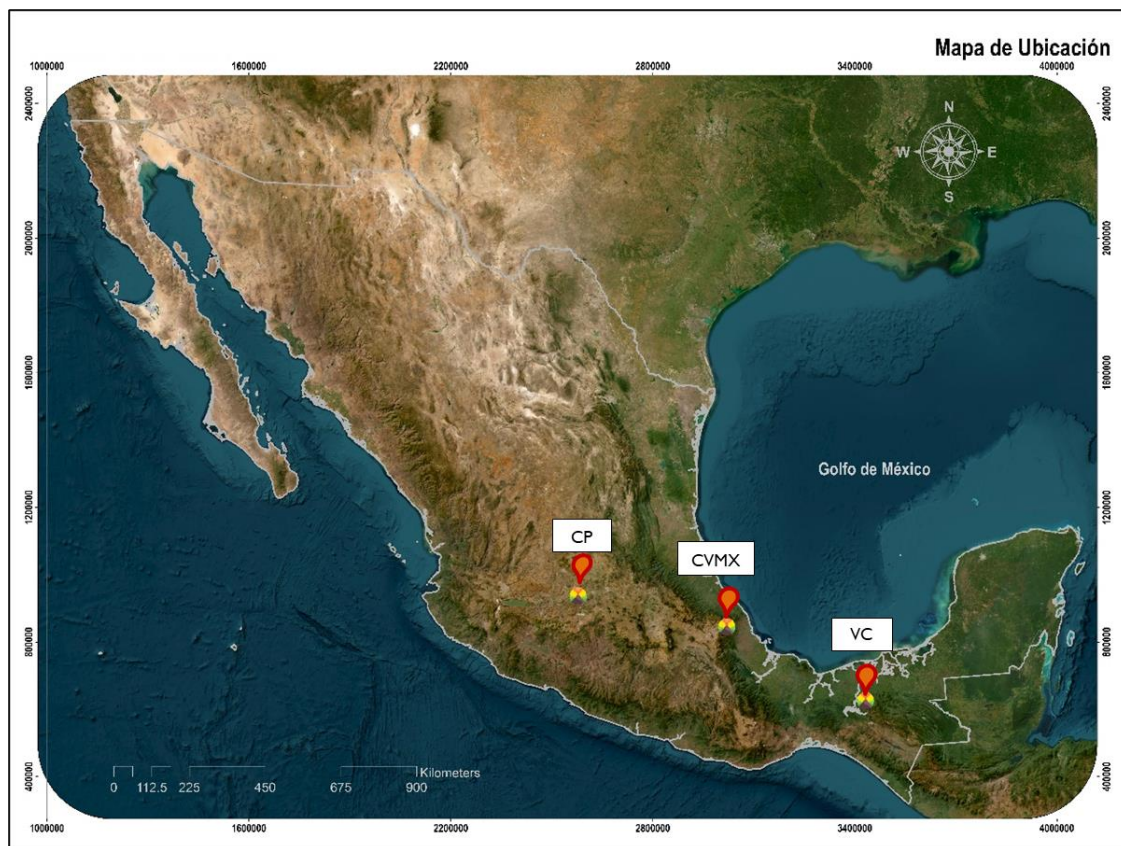


Figura 1. Mapa de localización de las áreas de estudio. CP corresponde al Lago Cráter de Parangueo; CVMX al Campo Volcánico Monogenético de Xalapa y VC al Volcán activo Chichón. Fuente: elaboración propia.

Lago cráter

Parangueo Maar

Un cráter es una formación que surge por la acumulación de fragmentos de material volcánico. Luego de la salida del magma a la superficie, los residuos volcánicos solidificados con el paso del tiempo forman una cresta anular alrededor de la chimenea, quedando las paredes inclinadas a modo de una depresión, es decir es una estructura de hundimiento resultado de la pérdida de soporte de la estructura del cono.

Esta estructura en forma de cuenco, tal como sugiere el significado etimológico de “cráter”, en latín *copa*, permite que se acumule el agua de lluvia y forma un lago, que se conoce como lago cráter.

Un *maar*, cráter de explosión, o cráter freatomagmático tiene como origen una violenta erupción freatomagmática que ocurre al encontrarse magma con depósitos de

agua superficial o subterránea. En estos sistemas la composición química del agua depende de las lavas y los vapores post eruptivos que pueden continuar liberándose dentro del cráter y es complejo entender la dinámica del CO₂. En México los *axalapazcos*, término que proviene del náhuatl y significa vasija de arena con agua, describen lagos cratéricos en los conos de explosión freatomagmática en la zona oriental de la faja volcánica transmexicana (Lugo-Hubp, 2011).

En Aranda-Gómez *et al.* (2013) se describe Rincón de Parangueo como un Maar, encontrado en la porción central oriental de la faja volcánica transmexicana, en el norte del campo volcánico monogenético de Michoacán-Guanajuato, centro de México. El volcán está datado en menos de 0.137 mda., del periodo actual conocido como cuaternario. Es parte de un complejo volcánico localizado sobre una planicie cubierta por aluviones que posiblemente representan el fondo de un extenso paleo-lago conocido como Yuriria a 15 km al sur del Valle de Santiago. La composición de la plataforma y el talud del cráter es de rocas alcalinas biogénicas, los magmas alcalinos de la región son resultado de la mezcla de magmas intraplaca de la faja volcánica transmexicana y de la provincia extensional del norte de México. En cuanto a su configuración tectónica, al noroeste se encuentra la falla El Bajío con dirección noroeste-sureste y al oeste el graben de Penjamillo e inmediatamente al oeste de este último se encuentra el rift de Chapala. Paralelo a la costra antigua del lago hay un escarpe de 12 m de altura generado por fallas de forma anular dirigidas abajo y hacia el interior del cráter, a lo largo de este escarpe hay evidencia de que ocurre movimiento en masa activo de los sedimentos, procesos de remoción masa actúan derivados de la disolución de la sal y su posterior infiltración hacia el acuífero.

El lago del cráter de Parangueo ha presentado un proceso de disminución de su volumen durante los últimos 40 años, hasta reducirse a 15% de la superficie que alcanzó en el pasado. Se ha reportado una disposición del sistema de fallas normales dentro del cráter de forma anular, infiriendo en el análisis de Jácome-Paz *et al.* (2020) que las fallas normales del anillo pueden actuar como las principales estructuras de desgasificación difusa en el área, en este mismo estudio, el flujo total de CO₂

reportado es de 13.6 toneladas por día en una superficie de 1.0434 km². Además, en el análisis de la composición química e isotópica de los gases del estudio antes mencionado, se encontró que la relación de concentración CH₄/ CO₂ es superior que el valor característico que proviene de una fuente magmática, lo cual indica que el CO₂ está asociado a una fuente superficial que además se sugiere, por la concentración isotópica encontrada de CH₄, la desgasificación puede ser biogénica.

Volcán activo

Volcán Chichón

Un volcán se considera activo cuando ha registrado eventos recientes los cuales han sido fechados, mientras que son considerados potencialmente activos aquellos que han presentado actividad en los últimos 10 000 años y son identificados a través de métodos de datación (Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005). Del mismo modo, un campo volcánico activo es una zona donde se encuentran edificios volcánicos cuyas características geológicas permiten relacionarlos entre sí, y donde se ha presentado actividad que ha quedado registrada en los últimos años o su actividad ha sido datado en un periodo geológico reciente.

El volcán Chichón se encuentra en el sureste de México, específicamente en el norte del estado de Chiapas, en el municipio de Pichucalco y es el único volcán activo en el arco volcánico chipaneco. En 1928 fue observado por primera vez y la exploración fue llevada a cabo en 1930, por Federico K. G. Müllerried (en Müllerried, 1933), describiéndolo como “un volcán en actividad actualmente en estado solfatárico”, al presentar numerosas manifestaciones hidrotermales de este tipo, con vapores compuestos de azufre que salen a través de grietas en las paredes del edificio volcánico o del suelo; además en esta primera exploración encuentra y describe manantiales termales. La actividad registrada en 1930 y que fue el motivo de la primera exploración de este volcán ocasionó temblores y estruendos en el cráter.

La última erupción del volcán Chichón ocurrió en 1982. El reporte de Global Volcanism Program (2007) indica que las laderas del edificio presentaban pendientes inestables y dentro del cráter se produjeron avalanchas posteriores a eventos de precipitación importantes, pero también la actividad al interior de este a menudo ocasionó pequeñas avalanchas dentro del cráter, el cual contiene un lago que había visto disminuido su volumen desde 2001. Las mediciones indicaron que las concentraciones hidrotermales y del lago habían disminuido con el tiempo, con lo cual se infirió que no existen nuevos aportes magmáticos desde 1982, es decir, hasta 2007 el sistema magmático del volcán se mantenía en estado estable. En el citado reporte se encontró una emisión media de $1,500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ de CO_2 en la superficie del lago en el mes de marzo de acuerdo con Global Volcanism Program (2007), y se observó una buena correlación entre el flujo de gas y la temperatura del suelo en imágenes de cámaras infrarrojas, un método nuevo y potencial para cuantificar la emisión térmica en estudios futuros.

Para el monitoreo del volcán entre 2010 y 2011 se analizaron datos de parámetros físicos como temperatura, profundidad, precipitación, velocidad del viento, radiación solar del lago obtenidos de manera continua por tres meses en meses diferentes entre 2010 y 2011. Entre mayo y agosto la precipitación acumulada aumenta mientras que el nivel del lago desciende y no existe correspondencia entre las variables observadas. Al comparar resultados de las observaciones se obtuvo una variación del 5% concluyendo que no es significativa la diferencia entre las condiciones dentro del cráter de las condiciones meteorológicas exteriores. Una aportación importante es una propuesta de estimación de flujos de calor y masa basada en un modelo de balance de calor y masa inyectados en el lago por fumarolas bajo el lago y manantiales, con el objetivo de entender la dinámica del lago y hacer de esta una manera eficiente de monitorear la actividad del volcán., obteniendo un flujo de calor del sistema hidrotermal entre 17 y 22 Mega watts y de masa entre 10 y 12 kg/s (con error de $\pm 15\%$), la tasa de infiltración puede variar considerablemente entre 12 a 42 kg/s dependiendo de la superficie del lago (Peiffer, L., Taran, Y., 2013).

Finalmente, entre los años 2013 y 2015 se realizaron nuevas campañas de campo que proporcionaron información de los cambios ocurriendo en el sistema hidrotermal del volcán en el citado periodo (2013-2015). Se recogieron datos de los flujos de CO₂ de la superficie del lago, así como también del suelo del cráter, de acuerdo con Jácome-Paz *et al.* (2016), el resultado del valor medio del flujo de CO₂ en el lago en el mes de abril de 2014 fue de $3225 \pm 330 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ y en el mes de abril del año 2015 de $2694 \pm 270 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Este estudio concluye que el aumento de flujos de CO₂ en el cráter del volcán Chichón respecto al reporte de 2007-2008 había sido causado probablemente por algún tipo de actividad del sistema magmático a profundidad, dado que el flujo de gas se asocia a flujos de calor provenientes del interior del volcán. En la citada referencia se encontró una estructura de desgasificación que es nombrada como Soap Pool (SP) y se localiza en la zona Noreste NE del lago cráter del Volcán Chichón, se muestra en la figura 2. Con anterioridad, en Mazot y Taran (2009), se esboza el estado del lago en 2007, y se registran tres campos volcánicos fumarólicos uno en la región centro este, un segundo en la región noreste y un último en la zona oeste del lago.

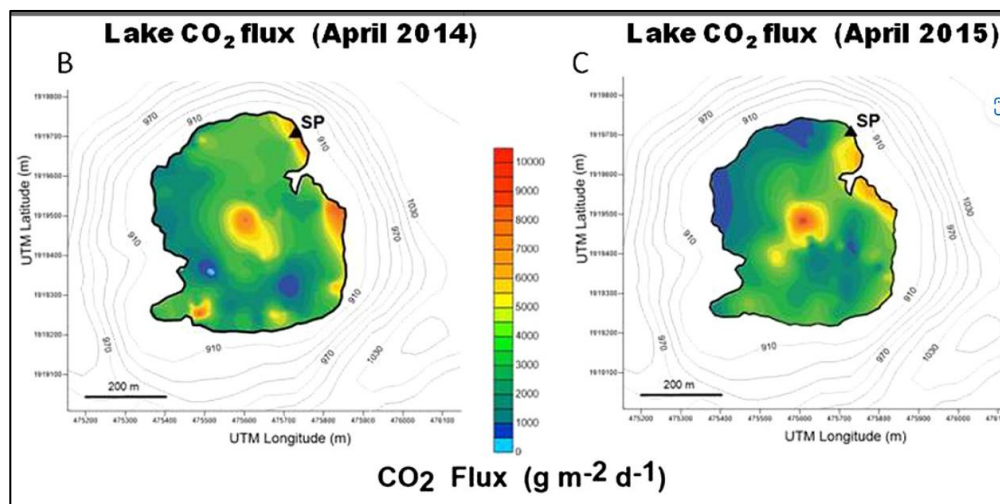


Figura 2. Mapas de CO₂ de la superficie del Lago en abril de 2014 y abril de 2015. SP muestra la localización de las fuentes termales de Soap Pool. Fuente: Jácome-Paz *et al.* (2016).

El 08 de septiembre del 2017 se registró un sismo de magnitud 8.2 en la escala de magnitud de momento (M_w), en Tehuantepec, Chiapas, con una distancia del

epicentro de 271 km y de una profundidad aproximadamente menor a los 2 km. Este evento activó las alarmas sobre una posible reactivación de la cámara magmática del volcán, de tal manera que se realizaron los monitoreos pertinentes, encontrando que en dos meses posteriores a la fecha del sismo la tasa de sismos en la zona presentó un ligero aumento; sin embargo, pasando este tiempo la sismicidad volvió a un estado recurrente. La explicación de la sismicidad en la zona tiene que ver con el gran sistema hidrotermal activo que presenta el volcán Chichón y no con la cámara magmática, información que se confirmó con estudios geoquímicos y aeromagnéticos independientes (Legrand *et al.*, 2024).

Campo volcánico monogenético

Campo Volcánico Monogenético de Xalapa

Un campo volcánico monogenético es un grupo de estructuras volcánicas que tienen en conjunto una historia eruptiva más extensa y compleja al compararlo con un volcán individual, por ello la actividad de un campo volcánico puede extenderse a millones de años; por otra parte, el volumen de material volcánico que genera este, se compara con el volumen total que produce un volcán compuesto. Un volcán monogenético suele producir pequeños volúmenes de magma y su actividad se caracteriza por su relativa corta duración y erupciones aisladas, y las geoformas típicas encontradas son: conos, anillos, montículos de tefra, maars o cráteres de explosión. El origen del vulcanismo (monogenético o poligenético) se ha explicado por la influencia directa de su régimen tectónico, pero no ha sido del todo resuelto y se requiere estudios para conocer detalles como: la naturaleza homogénea o heterogénea del magma, la tasa de fusión en la formación de volcanes o la migración de canales de magma a través de redes complejas. Así, un volcán monogenético ha sido definido como un edificio con un volumen acumulado menor a 1 km^3 , construido por una o varias erupciones aisladas alimentado por una o más porciones de magma y su erupción ha durado menos de 100 años (Németh, 2010; Németh y Kereszturi, 2015).

El campo volcánico monogenético de Xalapa se encuentra en el sector más oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), este sector es descrito por Ferrari, *et*

al (2012), señalando que este campo es uno de los más prominentes en este sector de la faja volcánica. Además, en Carrasco-Núñez *et al.* (2021) se caracteriza con mayor detalle la geología volcánica de la zona más oriental de la FVTM.

En 2005 este campo volcánico fue objeto de estudio de una tesis de posgrado en Ciencias de la Tierra, donde se examinó un área de 905 Km² y se analizaron 20 volcanes monogenéticos dentro de esta superficie (González-Mercado, 2005). Posteriormente, Rodríguez y colaboradores determinan las características de los conos de escoria, su distribución y morfología, la superficie cubierta por sus flujos de lava y una secuencia relativa de la actividad volcánica, encontrando que los centros volcánicos se concentran en un radio de unos 20 km alrededor de la ciudad de Xalapa, con un total de 59 respiraderos volcánicos de los cuales 54 son conos de escoria, dos pequeños volcanes escudo, dos anillos de toba y un cono de toba en un área de aproximadamente 2,400 km² (Rodríguez *et al.*, 2010).

Previos estudios refieren a la citada zona volcánica como Naolinco-Jalapa, Cofre de Perote-Naolinco o campo volcánico Chiconquiaco-Palma Sola. Es decir, existen diferentes puntos de vista al definir los límites de este campo volcánico entre los diferentes autores, por tanto, existe una variación en cuanto a la superficie que abarca.

En Sieron *et al.* (2017), se estudió esta área en cuanto a morfología, datación de productos volcánicos y análisis de su distribución espacial, utilizando modelos topográficos Lidar e imágenes satelitales, visitas de campo, y métodos estadísticos para determinar cantidad de conos por Km² e identificar la distribución espacial de volcanes. La delimitación del área de estudio es un polígono construido con base en análisis de los edificios que pertenecen a este campo, la revisión bibliográfica y la revisión uno a uno en campo. La densidad de edificios se encuentra entre 0-3 volcanes por cada 5 Km², siendo un valor entre promedio a bajo contrastado con otros campos volcánicos. El resultado de la distribución de los edificios muestra la zona de mayor concentración en el norte, noroeste y sureste del campo, es decir Naolinco, La Joya, Coatepec y Ayahualulco-Perote. Asimismo, las áreas especialmente Naolinco y Ayahualulco albergan conos de escoria jóvenes, una zona potencialmente activa.

En la revisión por Jácome-Paz y colaboradores. En los resultados de este estudio se reportan 72 volcanes monogenéticos, 6 de los cuales se identificaron y documentaron por primera vez. Una muestra de carbón tomada de depósitos de flujos de lava de Naolinco indica una edad radiométrica de alrededor de 780 años AP, siendo el flujo de lava más reciente encontrado a la fecha (Jácome-Paz *et al*, 2022b).

II. Metodología

El proceso para alcanzar los objetivos de este proyecto se dividió en cuatro etapas: i) investigación documental, ii) obtención de datos, iii) análisis de datos, y por último iv) resultados e interpretación, y se detalla en el diagrama de la figura 3. En la primera etapa de investigación documental se revisó y seleccionó información acerca de emisiones de CO₂ en suelos volcánicos, las técnicas de procesamiento de datos, y referencias de las áreas de estudio, con lo cual fue construido el primer capítulo. Las siguientes dos etapas de obtención de datos y técnicas de análisis, se explican en este segundo capítulo que corresponde a Metodología.

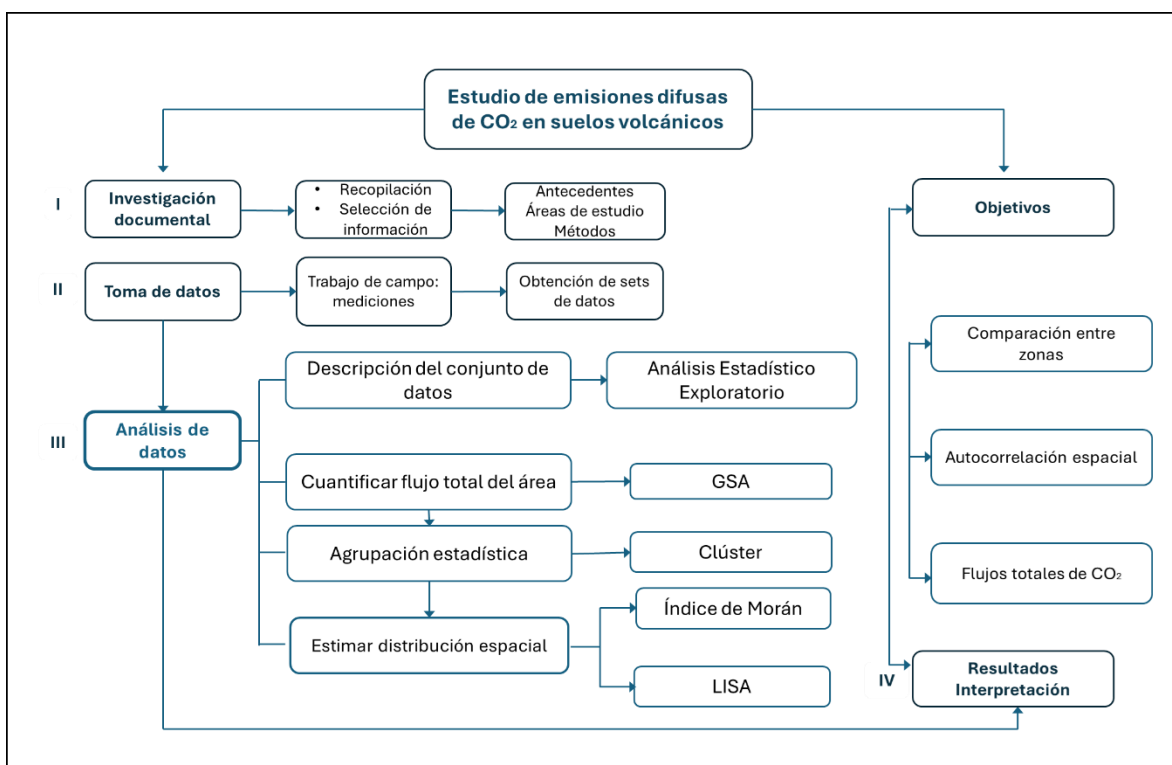


Figura 3. Diagrama metodológico.

Fuente: elaboración propia.

Considerando los objetivos por alcanzar y de acuerdo con la naturaleza de los datos se utilizaron métodos cuantitativos. La población bajo estudio son los suelos volcánicos, de los cuales la variable principal a estudiar es el flujo de CO₂ además se considera la ubicación de cada punto de medición. El tipo de estudio es exploratorio,

luego descriptivo y finalmente explicativo puesto que se plantea una hipótesis sujeta a comprobación a través de la interpretación de resultados (Arias, 2012).

Obtención de datos

Previo a la descripción del proceso de obtención de datos cabe señalar que al ser inviable abarcar por completo la superficie del suelo por la cantidad de mediciones necesarias a llevar a cabo y sumado a las condiciones del terreno se realizaron mediciones distribuidas sobre el área, con lo cual se trata de un muestreo no probabilístico condicionado por el estado del terreno y a criterio del equipo de trabajo en campo. De acuerdo con lo mencionado, los puntos discretos de mediciones sobre el área de estudio corresponden en sentido estricto a una muestra; sin embargo, para analizar los datos se toma el set completo obtenido como el total de elementos bajo estudio, es decir, la población total (N).

Ahora bien, en la etapa de recolección de datos la primera fase es la planeación de trabajo de campo donde se consideraron los días de salida, esto es importante dado que los cambios estacionales de las condiciones ambientales como presión, temperatura, precipitación influyen al medir las concentraciones de CO₂ (Hinkle, M., 1994) optando por medir en días con menor probabilidad de precipitación; aunado a lo anterior se planearon las rutas de llegada, considerando que para evitar alteraciones en las mediciones el equipo se debe colocar sobre suelos bien formados sin alteración por actividades antropogénicas o en estado rocoso (Jácome-Paz y Delgado-Granados, 2022); además, los permisos que se requieren para hacer uso del equipo de medición en campo fueron gestionados.

La segunda fase corresponde a la operación del equipo y el registro de los flujos de CO₂. Para tomar los datos se utilizó el flujómetro LI820 based Carbon dioxide fluxmeter® portátil de West System ©, este equipo utiliza la técnica de espectrometría infrarroja para la medición de flujos de CO₂ (West Systems S.r.l., 2016), se utilizan dos cámaras de acumulación según la cantidad de flujo que necesite medirse, y varían en sus niveles de precisión: la cámara A para medir flujos entre 0 y 0.5 mol · m⁻² ·

día⁻¹ tiene un porcentaje de precisión de 25%, y entre 0.5 y 1 mol · m⁻² · día⁻¹ un 15%; la cámara B tiene un porcentaje de precisión del 10% entre 1 y 300 moles m⁻² día⁻¹ y un 20% entre 300 a 600 moles m⁻² día⁻¹ (West Systems, 2009). Adicionalmente, el equipo tomó los parámetros de temperatura de suelo y presión barométrica, utilizados para calcular el flujo en cada medición y se registraron en la base de datos. El software flux manager desarrollado por West System se descargó previamente en un dispositivo móvil que se vinculó con el flujómetro y sirvió como interfaz digital. Las concentraciones se registraron con unidades de medida de mol · m⁻² · día⁻¹.

Una vez tomados los datos se almacenaron en una base que generó el software y se abrieron mediante el programa Flux Revision también desarrollado por West Systems. Una vez instalado, se abrió la base de datos y se verificó que las pendientes hayan tenido una relación proporcional con el flujo del suelo, puesto que para obtener valores reales de flujo de suelo es necesario encontrar pendientes positivas, de este modo se obtuvo una base de datos con la cual fue posible trabajar. El programa Flux Revision reporta las mediciones de CO₂ en unidades de medida de mol · m⁻² · día⁻¹, sin embargo, para realizar el cálculo son convertidas en una hoja de cálculo a unidades de g·m⁻²·día⁻¹ con ayuda de la fórmula:

$$n = \frac{m}{M}$$

Ecuación 1. Cálculo de número de moles.

Donde n es el número de moles, m es la masa en gramos y M es la masa molecular. La masa molecular del CO₂ es de 44.09 g/mol (que resulta de la sumatoria de la masa molar de C = 12.011 g/mol y del peso molecular de O₂ = 2 × 15.999 g/mol), esta cantidad se multiplica por todos los registros de CO₂ de la base de datos y se obtienen las unidades en gramos (g·m²·día⁻¹).

El set de datos está conformado por una columna que contiene la variable de flujo de CO₂ y también se registra la ubicación de cada punto medido organizada en una columna para latitud y otra para longitud. En este trabajo los sets de datos utilizados

para la aplicación de los análisis fueron provistos por la Dra. Mariana Patricia Jácome Paz, investigadora del departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica UNAM, como parte de un proyecto de colaboración académica entre el Instituto de Geofísica UNAM y la Especialización en Métodos Estadísticos de la Universidad Veracruzana. Los datos analizados del lago cráter Rincón de Parangueo corresponden al año 2016; los datos del volcán Chichón, al año 2021 y los datos del campo volcánico monogenético de Xalapa son del año 2023.

Técnicas de análisis

En esta segunda etapa que es parte de la Metodología se describen las técnicas que se utilizaron en el procesamiento de datos para estudiar las emisiones difusas de CO₂, para este fin, las técnicas de análisis se han dividido en cuatro secciones. La primera sección corresponde al análisis estadístico exploratorio de los datos que permite obtener una descripción general de la información, a partir de un resumen de las características principales del conjunto de datos analizados, tales como las medidas de tendencia central: media y mediana; las medidas de dispersión: el rango, varianza y desviación estándar.

También se calcularon los valores atípicos del límite superior, considerando que la distribución de este tipo de datos es lognormal y se caracteriza por una mayor cantidad de valores bajos y presencia más aislada de valores altos, se optó por calcular únicamente los valores atípicos del límite superior; para calcular el rango intercuartil (IQR) se restó al valor del tercer cuartil (donde se encuentra el valor superior al 75% de los datos) el valor del primer cuartil (valor superior al 25% de los datos), luego el resultado se multiplicó por 1.5 y el valor obtenido se sumó al valor del tercer cuartil, este cálculo se realizó a través del programa R, que al resolver la instrucción presenta los valores que se excluyen.

$$q > Q_3 + 1.5 * IQR$$

Ecuación 2. Condición (q) de valores atípicos del límite superior.

A través del análisis gráfico como parte del análisis exploratorio, es posible observar el tipo de distribución que la información presenta y también proporciona, en términos gráficos, una visualización general del comportamiento del conjunto de datos. El análisis estadístico exploratorio y los gráficos fueron obtenidos a través del entorno de desarrollo integrado R studio, (R Core Team, 2023). y el software R. Al ser análisis de uso general no se destinó un apartado para describir el procedimiento, pero se encuentran en una propia sección en los resultados.

Como parte de un análisis exploratorio de datos espaciales, se realizaron tres cartogramas con la distribución de los flujos de CO₂ medidos en cada zona, esto a través una clasificación en cinco grupos por cuantiles, por conteo igual, y de esta clasificación se decidió que el límite superior del grupo cinco se considerara como el valor máximo del conjunto de datos que resultó al excluir valores atípicos, para agregar un último grupo (grupo 6), en que se muestran sólo los valores atípicos, teniendo como límite inferior el valor máximo de los datos al excluir valores atípicos y como límite superior el valor máximo del total del conjunto de datos analizados.

A continuación, se describen las técnicas para calcular las emisiones totales, la agrupación estadística, y los métodos para estudiar la distribución espacial de los flujos, que son las secciones aún por abordar.

Emisiones totales

Una forma de obtener las emisiones totales de un área de estudio, sin tomar en cuenta la superficie y con base en los registros obtenidos en campo, el cálculo del flujo total se basa en las medidas de tendencia central: media y mediana que son parte del análisis exploratorio de los datos. Sin embargo, para calcular el flujo total en unidades de toneladas por día considerando la superficie que abarca el conjunto de mediciones, se utilizó la técnica de aproximación gráfica estadística (GSA, por Sinclair, 1974). (i.e sistema geotermal de Agua Caliente-Tzitzio en Jácome-Paz, *et al.*, 2020a; Lago Cráter

de Parangueo en Jácome-Paz, *et al.*,2020b; campo volcánico monogenético Michoacán-Guanajuato en Jácome-Paz, *et al.*, 2022a)

Esta técnica consiste en generar el gráfico de probabilidad acumulada con la totalidad de registros medidos. En este gráfico los datos se clasifican en dos grupos de valores grupo de altos y grupo de bajos. De cada uno de los grupos se requiere obtener el promedio ($\bar{x}_i$), como segundo paso se seleccionan los valores límites con los que se reconoce la proporción o porcentaje de los grupos, el número de registros por grupo es dividido entre el total de registros (f_i), con ello quedan definidos los rangos de valores de cada grupo de datos. Posteriormente, el resultado de cada grupo se multiplica por la superficie de estudio en unidades de km² (A) y la sumatoria del resultado por grupos es el flujo total para el área de estudio en unidades de toneladas por día (ton · d⁻¹). La fórmula para calcular el flujo total de emisiones difusas a través de la aproximación gráfica estadística es la siguiente:

$$T\phi CO_{2(GSA)} = \sum_i A \bar{x}_i f_i$$

Ecuación 3. Cálculo de toneladas de CO₂ a través de la aproximación gráfica estadística (GSA).

Agrupación estadística

Se aplicó la técnica de análisis clúster para identificar agrupaciones en los valores medidos y asociaciones con pares de coordenadas. Se buscó medir la distancia estadística, ya que se trabaja con una variable de escala continua, entre dos registros de CO₂ y entre dos agrupaciones de estos mismos registros; además de medir estadísticamente la distancia entre dos ubicaciones, (considerando ubicación como una variable compuesta por dos variables independientes: latitud y longitud) y la distancia entre dos grupos de datos de ubicación. Para la estimación de estas distancias, primero se aplicó estandarización a los datos para luego calcular la distancia euclidiana; posteriormente, se clasificaron los registros en tres grupos (clústeres) y al reconocer la cantidad significativa de agrupaciones que pueden

formarse en relación con la varianza que resulta de la distribución de los datos; luego se generó el gráfico de clúster. Para visualizar la distribución espacial de estas agrupaciones estadísticas se realizó un cartograma agregando una columna con el número de clúster en cada punto y procesándolo a través de SIG.

Métodos geoestadísticos

Para conocer la distribución espacial de los flujos de CO₂ se utilizaron métodos geoestadísticos, por lo cual se consideró importante comenzar por explicar en qué consiste la geoestadística de manera breve para luego abordar los métodos utilizados de forma más detallada.

En Giraldo, R. *et al.*, (2001, p. 510-511) se presenta una recopilación de la definición y características de esta disciplina, y describe la geoestadística como sigue: una rama de la estadística que estudia los fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978), su interés es estimar, predecir y simular tales fenómenos (Myers, 1987). Además, provee una forma de describir la continuidad espacial, la cual es una configuración distintiva esencial de muchos fenómenos naturales, y aprovecha dicha continuidad adaptando técnicas clásicas de regresión (Isaaks y Srivastava, 1987); usa la teoría de probabilidad en la predicción estadística de variables regionalizadas (Petitgas, 1996), cuyos resultados pueden emplearse para diseño de redes de muestreo entre otros (Cressie, 1989). Un estudio geoestadístico necesita examinar la estructura espacial de la variable a través del análisis de la semivarianza; una vez identificado y descrito con precisión por un modelo adecuado, se puede aplicar el método kriging para una interpolación óptima de la variable en sitios no muestreados (Rossi *et al.*, 1995), este método provee una estimación de la predicción de la varianza en cada punto de predicción y mide la predicción del error que no así los métodos determinísticos (Cressie, 1991).

El método de estimación kriging es uno de los procedimientos utilizados como último paso de análisis en geoestadística para la interpolación espacial de variables; sin

embargo este método presenta diferentes variantes a utilizar según los objetivos a alcanzar en cada estudio; otro método es la simulación donde si conocer la heterogeneidad de la variable es el interés principal puede resultar un análisis más representativo, pues genera una cantidad indefinida de realizaciones (N) de la variable que pueden ajustarse según datos observados (Garnier, 2021).

Autocorrelación espacial. Otra forma de análisis estadístico espacial que se realiza con la finalidad de conocer la asociación entre los registros medidos de la variable de estudio con la distancia es la autocorrelación espacial. A través de la aplicación del análisis geoestadístico de autocorrelación espacial se obtuvo:

- El **I de Moran** que es un índice utilizado para encontrar si existe un patrón entre los valores medidos de CO₂ y la ubicación de los registros, y si este es agrupado, disperso o aleatorio.

Al aplicarse esta técnica el SIG calculó un valor Z y un valor P que permitieron evaluar su nivel de significancia; con el valor P se puede rechazar o no rechazar la hipótesis en caso de encontrar o no patrones de asociación espacial entre los registros de CO₂.

En términos estadísticos, para determinar si existe autocorrelación espacial entre los flujos de CO₂, se estableció el juego de hipótesis como sigue:

H₀: No existe autocorrelación espacial entre los flujos de CO₂ medidos

$$H_0: p > \alpha$$

H₁: Existe autocorrelación espacial entre los flujos de CO₂ medidos

$$H_1: p < \alpha$$

Considerando un α de 0.05, se buscó rechazar la hipótesis nula en los tres casos de análisis, al encontrar P valores mayores a 0.05. Esto para el índice general, así como también para el índice local (LISA).

Este índice se calculó con la ecuación:

$$I = \frac{n}{s} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2}$$

Ecuación 4. Índice de Moran.

Donde: n es el número de observaciones; w_{ij} es una matriz de pesos espaciales calculada en función a la distancia; s es la suma de todos los elementos de la matriz w ; z_i y z_j son valores estandarizados de la variable analizada en i y j . (tomado de Da Silva, *et al.*, 2013).

- El **indicador local de asociación espacial (LISA)**, también conocido como índice de Morán local.

La distribución espacial de los valores se mostró a través del índice de Morán Local, que funciona reconociendo valores altos rodeados de valores altos, valores bajos rodeados de valores bajos, valores altos rodeados de bajos y valores bajos rodeados de altos, así como aquellos que no son significativos en la autocorrelación y los expresa visualmente a través de un mapa clúster, con lo cual fue posible identificar áreas de agrupación según la desgasificación de CO₂ medida, en un contexto espacial.

El indicador local de asociación espacial se calculó a través de la ecuación:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j$$

Ecuación 5. Indicador Local de Asociación Espacial.

Donde: I_i es el índice de Moran en la observación i ; w_{ij} es una matriz de pesos espaciales (calculada en función a la distancia); z_i y z_j son valores estandarizados de la variable analizada en las localizaciones i y j (tomado de Da Silva *et al.*, 2013).

Ambos análisis se realizaron a través del software ArcGis.

III. Resultados

Los análisis fueron aplicados a las bases de datos de las tres zonas con las que se trabajó. En este capítulo las secciones se dividen entre los diferentes análisis y en cada análisis se muestran los resultados obtenidos por cada zona volcánica.

Análisis exploratorio

Iniciando por describir la base de datos, que están conformadas por la ubicación de cada punto de muestreo (una columna para latitud y otra para longitud), y una columna con los valores registrados de CO₂. La variable CO₂ corresponde a datos cuantitativos continuos y su escala de medición es de razón; los datos de latitud y longitud corresponden en conjunto a una variable compuesta que es ubicación e individualmente son variables de tipo cuantitativas continuas y de escala de medición de razón. El análisis exploratorio se aplicó a la variable de CO₂. Los valores negativos y ceros medidos fueron excluidos al analizar los datos bajo el supuesto de que la degasificación del suelo es fenómeno constante por lo cual las mediciones solo pueden ser positivas y mayores que cero. En la tabla 1 se muestran los resultados.

Lago Cráter Parangueo

Para la base de datos de CP hay un total de 276 registros, de los cuales, al excluir valores negativos y ceros, el análisis es aplicado a 267 observaciones. Después de calcular y excluir valores atípicos para aplicar nuevamente el análisis exploratorio de datos, el número total de observaciones fue de 252.

Volcán Activo Chichón

Para la base de datos de VC hay un total de 207 registros, de los cuales, al excluir valores negativos y ceros, el análisis es aplicado a 202 observaciones. Después de calcular y excluir valores atípicos para aplicar nuevamente el análisis exploratorio de datos, el número total de observaciones fue de 185.

Campo Volcánico Monogenético de Xalapa

Para la base de datos de CVMX hay un total de 329 registros, de los cuales, como la base de datos no contiene valores negativos ni ceros el análisis es aplicado a todas las observaciones. Después de calcular y excluir valores atípicos para aplicar nuevamente el análisis exploratorio de datos, el número total de observaciones fue de 316.

Parámetros	CP		VC		CMVX	
Valor mínimo	0.0013	0.0013	5.14	5.14	0.2579	0.2579
Valor máximo	347.116	32.26520	91626.7	1847.938	275.1945	59.7656
Media	14.3029	8.89736	1633.28	590.902	25.7503	23.0011
Mediana	8.1664	7.64500	522.17	472.657	21.9742	21.4417
Desv. Med. Absoluta	12.80759	6.090252	1916.856	337.1538	13.24224	10.49993
Varianza	938.8976	57.88958	51266688	185012.6	462.2669	170.7499
Desviación estánd.	30.64144	7.60852	7160.076	430.1309	21.50039	13.06713
Total observaciones	267	252	201	185	329	316

Tabla 1. Resultados medidos de tendencia central y dispersión con valores atípicos y después de excluir valores atípicos en cada zona volcánica.

Para observar los resultados de las medidas de tendencia central y de dispersión se graficaron las todas observaciones analizadas en un histograma, en la figura 4 se presentan los gráficos de cada zona estudiada. Como puede observarse en los tres casos hay concentración de las mediciones cercanas a cero, esto indica que los datos están sesgados y el tipo de distribución es asimétrica y se asimila a una distribución lognormal. Al ser una distribución asimétrica, la media o promedio de los datos no es la medida de tendencia central que mejor representa el conjunto de datos, sino que es la mediana o el valor intermedio el que se toma como más representativo ya que el conjunto de datos presenta valores atípicos y la media es sensible a estos valores mientras que la mediana se mantiene en el lugar intermedio, esto se puede observar al comparar los resultados de la tabla 1 al analizar los datos antes y después de excluir

valores atípicos, observando como la mediana es similar, mientras que los valores de la media se asemejan a la mediana al excluir outliers.

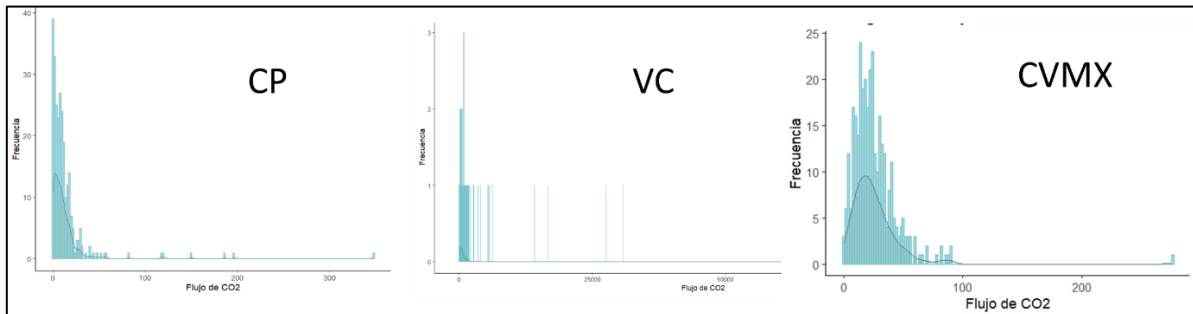


Figura 4. Histograma de cada zona analizada.

Distribución espacial de CO₂ según valores medidos.

Como parte del estudio exploratorio se realizaron los cartogramas que muestran cómo se distribuyen los valores obtenidos de las mediciones de flujos de CO₂.

Lago Cráter Parangueo

Como se puede observar en la figura 5 existe una dispersión en los niveles de flujo de CO₂ muestreados, los valores altos se distribuyen de manera dispersa en la superficie muestreada; sin embargo, son notables tres puntos altos en el centro de la figura, así como tres puntos en la región superior (norte) que están cercanos entre sí. Alrededor del área de estudio se localizan en su mayoría puntos de valores intermedios entre 6.2 y 32.23 g · m⁻² · d⁻¹.

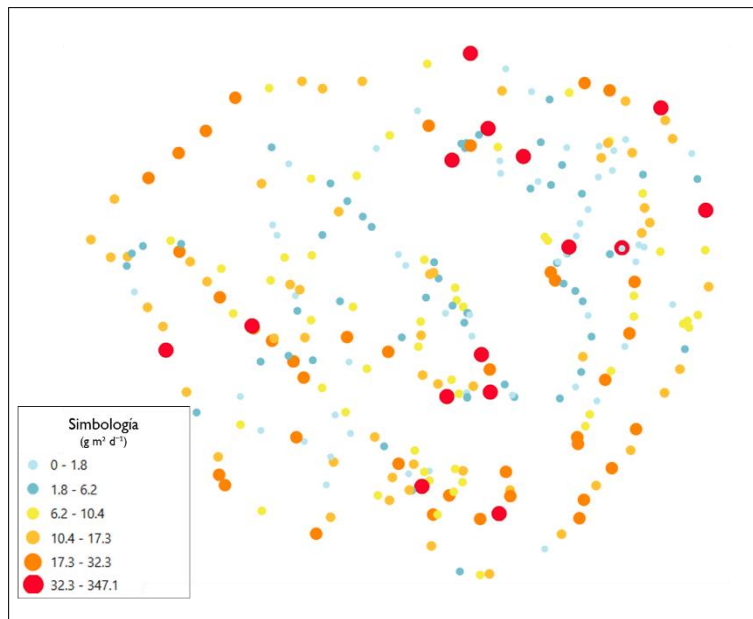


Figura 5. Distribución de niveles medidos de CO_2 Cráter Parangueo.

Fuente: elaboración propia.

Volcán Chichón

En la figura 6 se observa que los puntos de valores más altos se reúnen más en la región superior derecha, que representaría el noreste del cráter. En la sección inferior que correspondería al sur del cráter, se localizan en su mayoría valores inferiores a $628 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ y en el centro del cráter predominan valores intermedios.

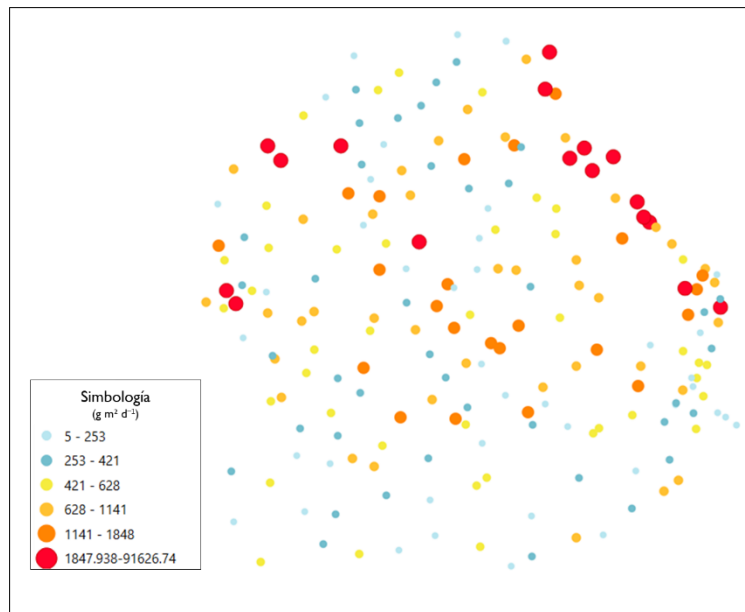


Figura 6. Distribución de niveles medidos de CO_2 de Volcán Chichón.

Fuente: elaboración propia.

Campo Volcánico Monogenético de Xalapa

En la figura 7 se observa que los niveles de CO₂ muestreados en el campo volcánico se distribuyen de manera dispersa, sin encontrarse regiones que presenten una reunión predominante de un nivel en específico, sino que hay valores altos y bajos distribuidos en toda la superficie muestreada.

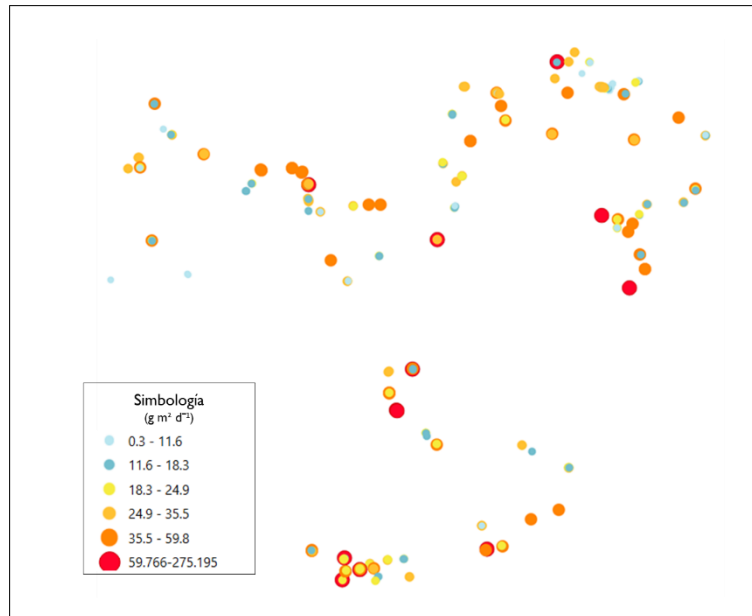


Figura 7. Distribución de niveles medidos de CO₂ de Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.

Fuente: elaboración propia.

Flujo total

En el cálculo del flujo total para las tres áreas de estudio, se presentan resultados de la aplicación de la técnica GSA. En cada set los gráficos se dividieron en dos grupos de valores de datos, en las figuras 8, 9 y 10 se muestran los gráficos obtenidos y se agrega la descripción con los resultados de cada área.

Lago Cráter Parangueo

Para el lago cráter de Parangueo se calculó utilizando un área de 0.804 km^2 , al obtener la superficie del polígono por medio de mediciones en el sistema de información geográfica donde se procesaron los datos. El gráfico de la figura 8 se dividió en dos grupos el grupo de flujos bajos se ubicó entre 0.00128 y $5.126 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, con una representación de 37% de las observaciones; el grupo de flujos altos se ubicó entre valores superiores a 5.126 y $347.116 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ con el 62% de las observaciones. Con esta división se obtuvo un flujo total de 11.4995 toneladas por día ($\text{ton} \cdot \text{d}^{-1}$).

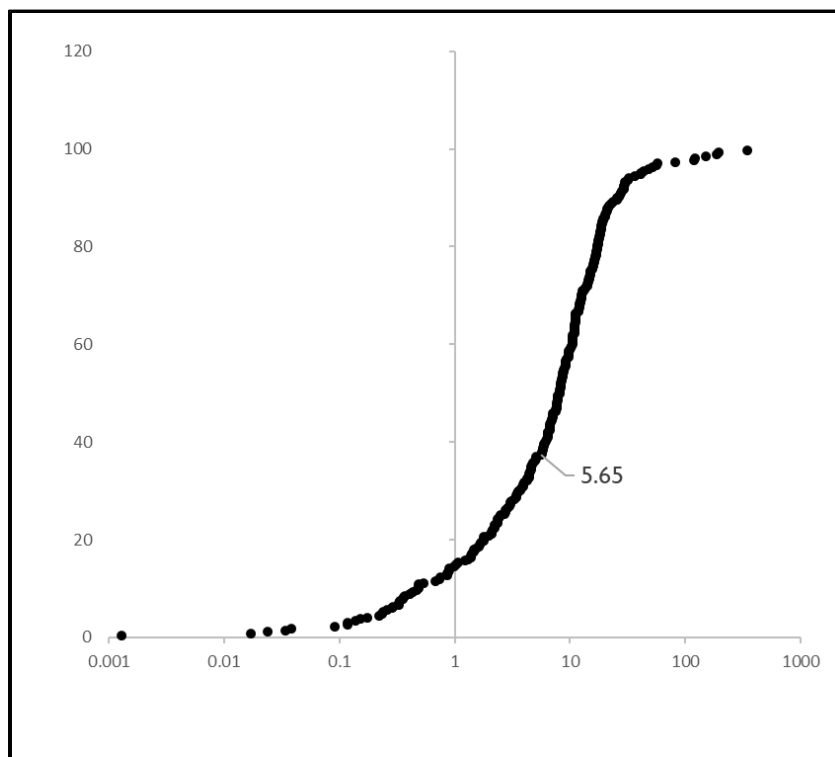


Figura 8. Gráfico de probabilidad acumulada para Lago Cráter Parangueo.

Fuente: elaboración propia.

Volcán Activo Chichón

El área considerada para calcular el flujo total de CO₂, de acuerdo con mediciones realizadas en el sistema de información geográfica fue de 0.287 km². En la figura 9 se muestra que el grupo de valores más bajo oscila entre el mínimo registrado y 30.05 g · m⁻² · d⁻¹, y representa el 30% de los registros; mientras que el grupo de valores altos se encuentra inmediatamente por encima de 30.05 y hasta el valor más alto registrado de 91625.738 g · m⁻² · d⁻¹, y representa el 70% de los registros. El cálculo refleja un total de 468.75 ton · d⁻¹, al multiplicarse por el área de estudio.

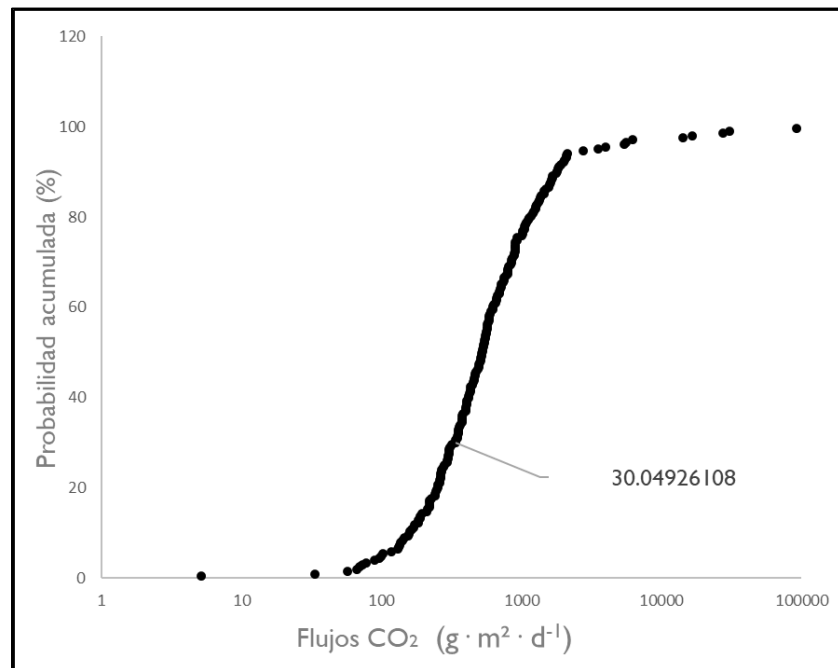


Figura 9. Gráfico de probabilidad acumulada para Volcán Chichón.

Fuente: elaboración propia.

Campo Volcánico Monogenético de Xalapa

Para el gráfico de la figura 10 se realizó la división de los registros en dos grupos, el primero de valores bajos se ubica en un rango entre 0.258 y 10.43 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ este grupo representa el 16% de los registros; por otra parte, el grupo de valores altos se encuentra entre 10.52 y 275.19 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, y representa el 84% de los registros. Considerando un área 1.28 km^2 el flujo total calculado es de 32.96 $\text{ton} \cdot \text{d}^{-1}$).

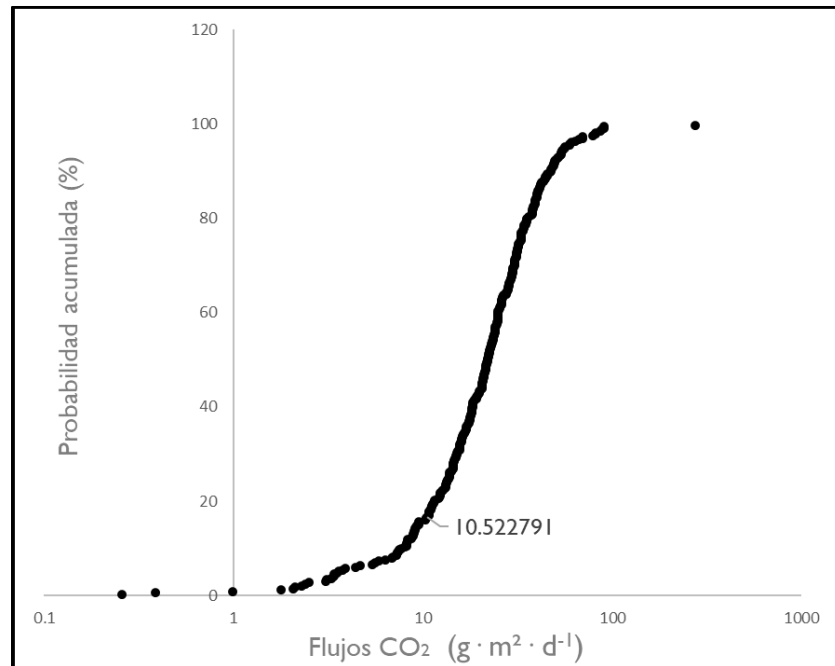


Figura 10. Gráfico de probabilidad acumulada para Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.

Fuente: elaboración propia.

Análisis clúster

En las siguientes figuras 11, 12 y 13 se muestran como la letra a. el gráfico de clúster y como la letra b. un cartograma para una visualización espacial que resultó de la aplicación de esta técnica de agrupación estadística donde se observa la distribución de los clústeres en cada área.

En el análisis de agrupación estadística (clúster) de las tres zonas, en general los gráficos muestran que existe influencia de las variables de latitud y longitud que están generando la agrupación en tres clústeres. Esto se comprueba en los gráficos, así como en el mapa realizado a partir de los clústeres que se generaron, ya que se observa que la distribución de los tres colores de cada grupo está relacionada con la cercanía o proximidad espacial de los puntos de medición que conforman cada clúster.

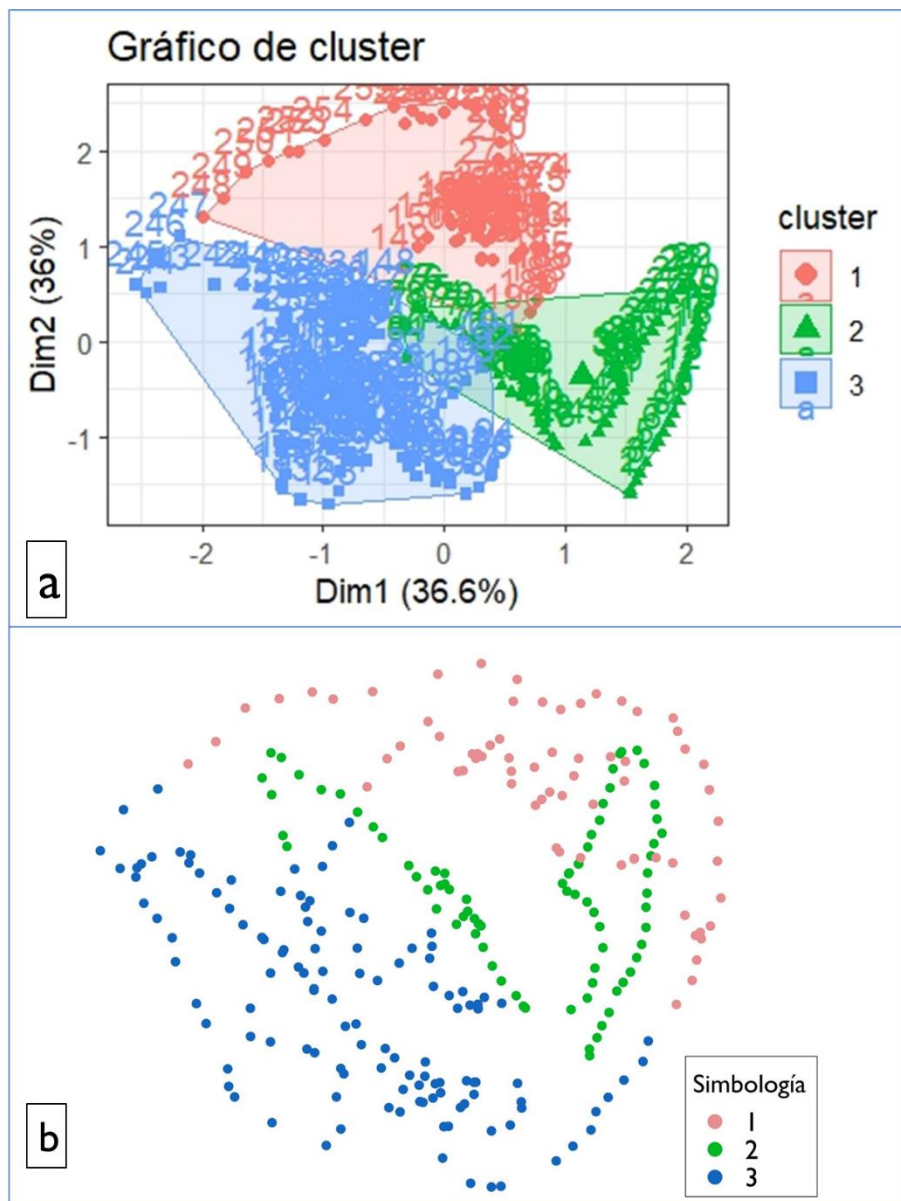


Figura 11. Análisis clúster. Lago Cráter de Parangueo.

Fuente: elaboración propia

En el gráfico de clúster del Lago Cráter de Parangueo se observan tres grupos mezclados en la zona central. Asimismo, en el cartograma que se elaboró para conocer su distribución espacial, el grupo 1 se distingue muy bien del grupo 3, pero en el caso del grupo 2 los puntos de medición de dióxido de carbono se mezclan con el grupo 1 y 2 con una menor agrupación en términos espaciales.

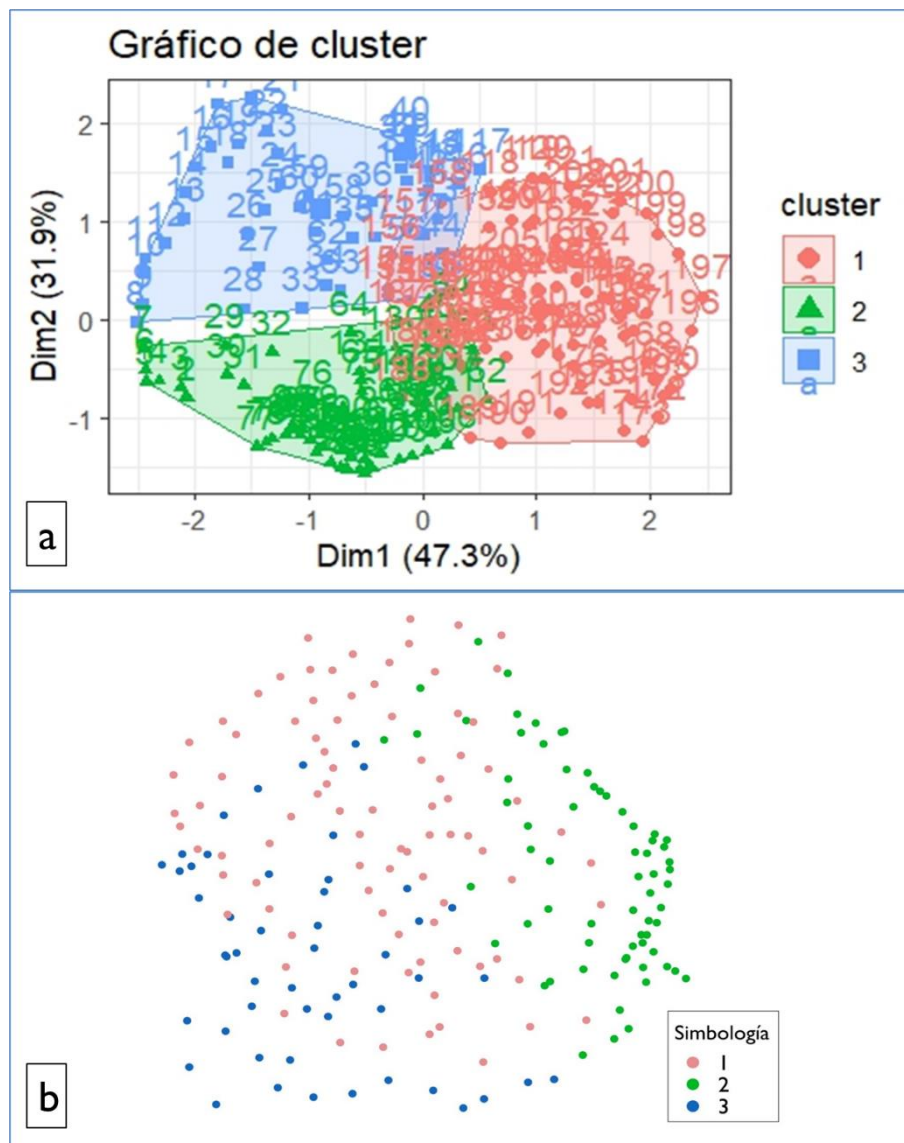


Figura 12. Análisis clúster. Volcán Chichón.

Fuente: elaboración propia.

En el gráfico de clúster del Volcán Chichón la distribución de los grupos en la región central no es clara, se observa una mezcla entre los diferentes grupos, sin embargo, en el cartograma utilizado para conocer la distribución de los clústeres sí se distingue mayor presencia del grupo uno en la sección inferior izquierda y del grupo dos en la zona derecha; asimismo, se observa una mezcla de colores en la zona central, principalmente entre el grupo uno y el grupo tres.

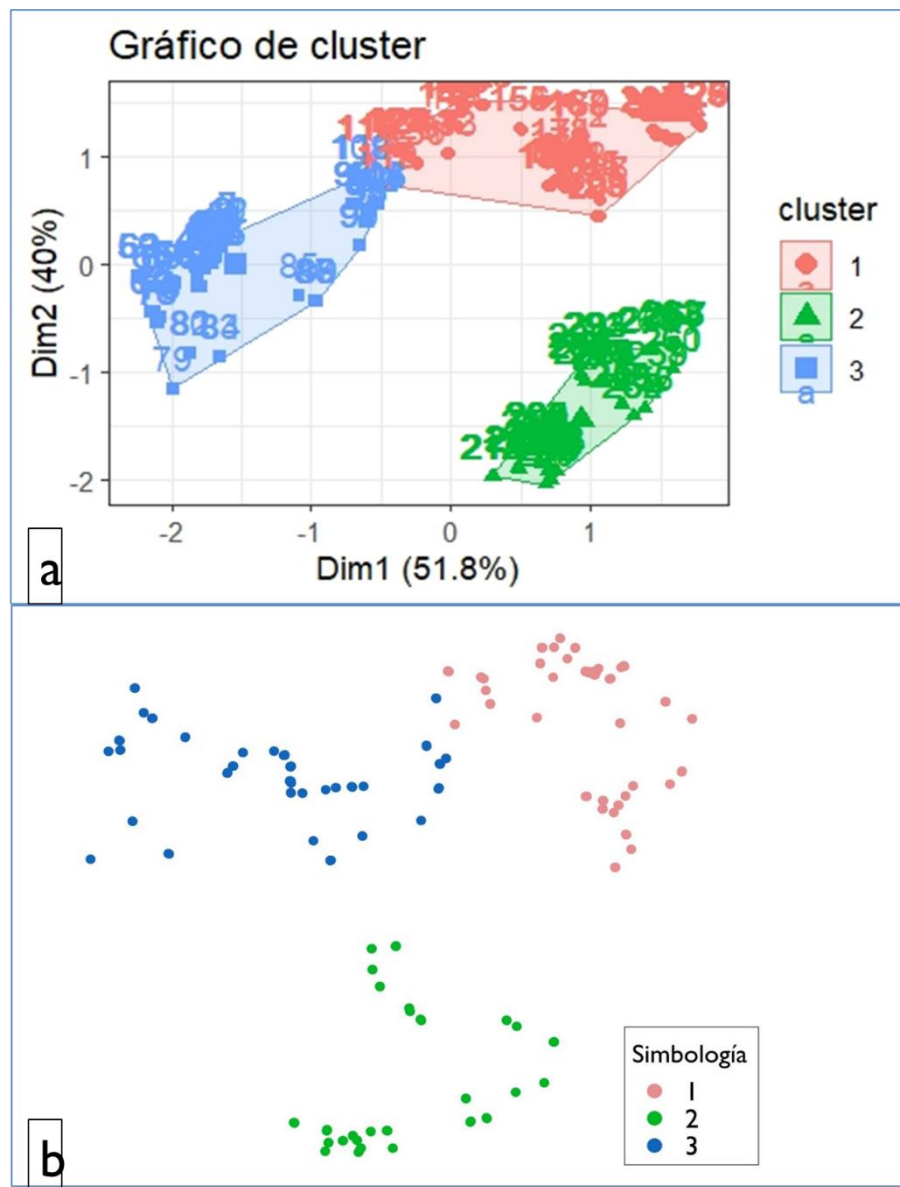


Figura 13. Análisis clúster. Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.

Fuente: elaboración propia.

En el caso del análisis clúster para el campo volcánico en el gráfico de clúster se observan muy marcados los tres grupos que se generaron, y en la distribución espacial de los clústeres es muy claro que en este caso la agrupación sí se basó más en la localización de los puntos de muestreo.

Autocorrelación espacial

Lago Cráter de Parangueo

En el análisis autocorrelación espacial con el I de Moran, el índice obtenido fue de -0.030, estimándose el valor Z y obteniendo -0.38 y un valor P igual a 0.70 para evaluar el nivel de significancia del índice. Como el valor P es mayor a 0.05 entonces indica que no se rechaza la hipótesis nula que se estableció como: No hay autocorrelación entre la ubicación y los registros de CO₂. Por lo tanto, se confirma que la desgasificación de CO₂ en esta zona no tiene autocorrelación espacial, además, por el resultado del índice, el cual es negativo y cercano a cero, se puede concluir que el patrón de agrupación es aleatorio.

El resultado del indicador local de asociación espacial, que calcula el índice de significancia o valor p para cada punto, se observa en el cartograma de la figura 14, donde los puntos en color verde son los sitios donde el p valor es menor a 0.05, en los cuales se puede rechazar la hipótesis nula; sin embargo, los puntos en gris, que están representando al 91.76% de las observaciones no son significativos.

En el cartograma de la figura 15, se observan los puntos con un p valor menor que 0.05 que fueron significativos, ahora agrupados en clústeres según el nivel de CO₂ medido. De acuerdo con el interés de encontrar patrones de desgasificación en la zona muestreada, se consideran más importantes los valores altos rodeados de valores altos que representan solo el 0.37% de los puntos (tabla 2); así como también es de interés conocer los valores bajos rodeados de valores bajos, que representan el 4.11%, en suma, se obtiene un total de 4.48% de las observaciones. Con esto, se puede concluir que, según el nivel de autocorrelación espacial que resulta del análisis de valores de CO₂ en el lago cráter de Parangueo, no se encuentran patrones de desgasificación y la distribución de los valores presenta aleatoriedad.

Según la información consultada sobre la desgasificación del lago cráter de Parangueo esta proviene de fuentes biogénicas, esto indica que su origen es superficial y según los resultados obtenidos de la autocorrelación espacial en esta zona volcánica, tiene sentido que el patrón de desgasificación sea aleatorio y no se encuentren regiones en donde se esté dando una agrupación de valores altos, ya que su origen no es magmático.

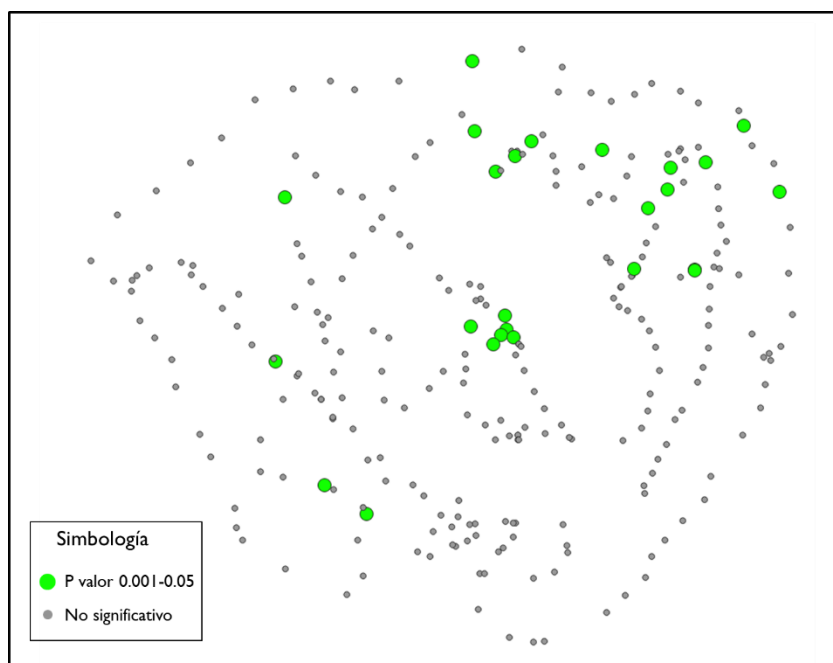


Figura 14. Indicador Local de Asociación espacial LISA para Lago Cráter Parangueo.

Fuente: elaboración propia.

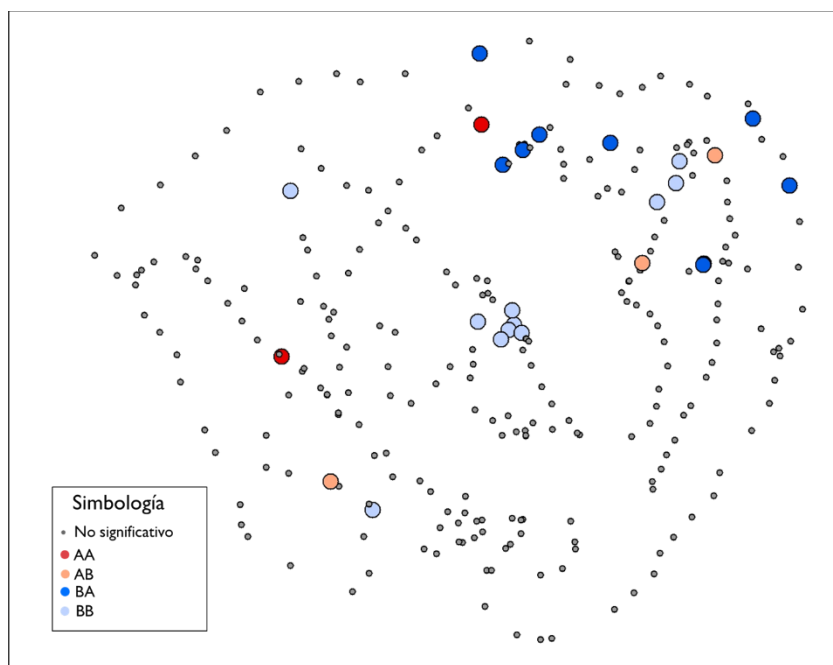


Figura 15. Clústeres por nivel de autocorrelación CP.

Fuente: elaboración propia.

Volcán Chichón

El resultado obtenido con el análisis de autocorrelación espacial mediante el índice de Moran, fue de 0.17, el valor estimado de Z fue de 4.3 y el valor P de 0.000017 para evaluar el nivel de significancia del índice. Como el valor P es menor que 0.05 entonces se rechaza la hipótesis nula establecida como: No hay autocorrelación entre la ubicación y los registros de CO₂ medidos. Por lo tanto, se confirma que la desgasificación de CO₂ en este análisis sí tiene asociación espacial, sin embargo, esta asociación es dispersa (como puede observarse en el cartograma de la figura 17). Debido al valor del índice, que es cercano a cero se puede concluir que el patrón de correlación no es aleatorio, sin embargo, tampoco presenta un patrón, sino solo agrupaciones aisladas.

El resultado del indicador local de asociación espacial, que calcula el índice de significancia o valor p para cada punto, se observa en el cartograma de la figura 16, donde los puntos en color verde son los sitios donde el p valor es menor a 0.05, en los cuales se puede rechazar la hipótesis nula; sin embargo, los puntos en gris, que están representando al 87.06% de las observaciones no son significativos.

En el cartograma de la figura 17, se observan los puntos con un p valor menor que 0.05 que fueron significativos, ahora agrupados en clústeres según el nivel de CO₂ medido. De acuerdo con el interés de encontrar patrones de desgasificación en la zona muestreada, se consideran más importantes los valores altos rodeados de valores altos representan solo el 1.99% de los puntos (tabla 2), y se localizan en la zona superior derecha de la figura; así como también es de interés conocer los valores bajos rodeados de valores bajos, que representa el 8.45% y se encuentran en la zona inferior derecha de la figura, sumados se obtiene un total de 10.44% de las observaciones que son significativas para el presente estudio. Con estos valores, se puede concluir que, según el nivel de autocorrelación espacial que resulta del análisis de valores de CO₂ en el volcán activo El Chichón, se encuentran patrones de desgasificación, sin embargo, en la mayoría de los puntos, la distribución de los valores es dispersa.

De acuerdo con la información consultada en la descripción de esta zona (figura 2), en el Volcán Chichón se localizan manantiales termales en el Noreste del cráter que se conocen como Soap Pool y que estarían relacionados con los valores altos rodeados de otros valores altos, confirmando que en la autocorrelación espacial fue posible identificar esta estructura

de desgasificación difusa. Según la literatura consultada (Mazot y Taran, 2009) se encuentran tres campos fumarólicos alrededor del volcán; teniendo en cuenta esta información, los clústeres de autocorrelación bajo-bajo que se observan en la figura 17 estarían coincidiendo con el campo fumarólico reportado en el sureste del cráter, asimismo los clústeres de autocorrelación bajo-bajo dado que se observan en la región superior izquierda estarían correspondiendo con el campo fumarólico al oeste del cráter.

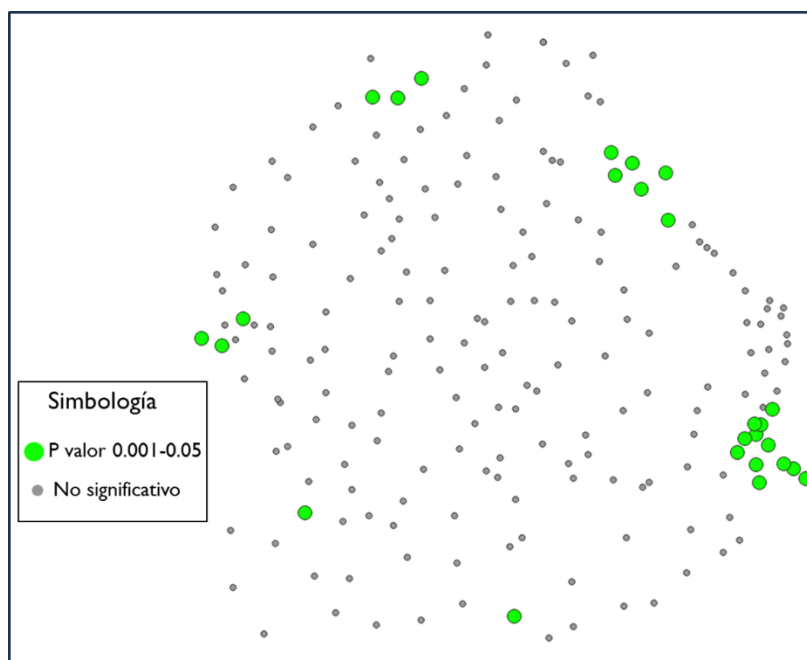


Figura 16. Indicador Local de Asociación Espacial LISA para Volcán Chichón.

Fuente: elaboración propia.

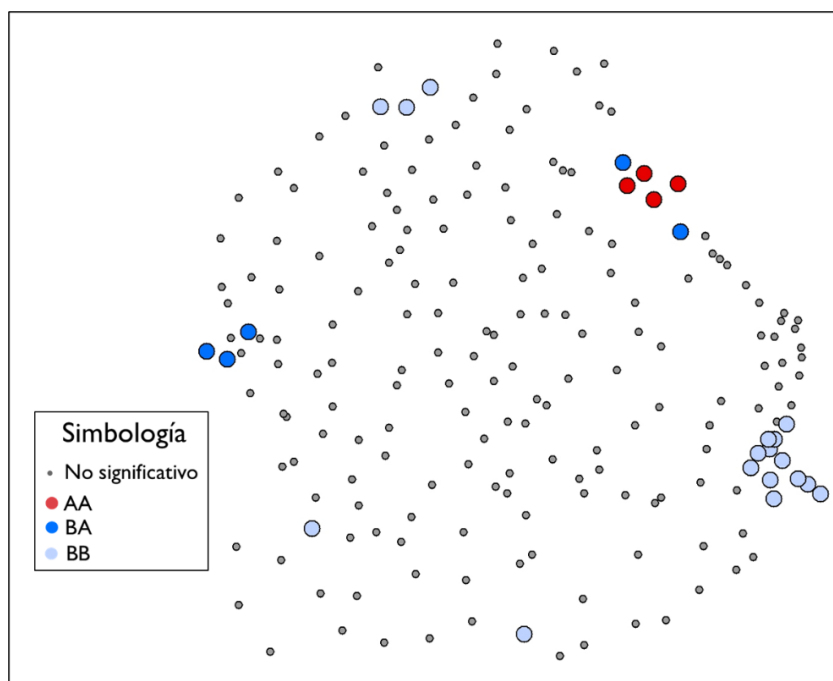


Figura 17. Clústeres por nivel de autocorrelación VC.

Fuente: elaboración propia.

Campo Volcánico Monogenético de Xalapa

El resultado obtenido mediante el cálculo del índice de Moran fue de 0.149, el valor Z estimado fue de 2.007 y el P valor de 0.04, menor que 0.05, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula establecida como: No hay autocorrelación entre la ubicación y las observaciones de CO₂ medidas, esto confirma que los flujos de CO₂ en suelos volcánicos en este análisis sí tienen asociación espacial, sin embargo con el valor resultante del índice, que es positivo pero cercano a cero, se puede concluir que el patrón de correlación en esta área se clasifica como aleatorio. Y que la zona presenta diferentes niveles de desgasificación en puntos cercanos.

El resultado del indicador local de asociación espacial, que calcula el índice de significancia o valor p para cada punto, se observa en el cartograma de la figura 18, donde los puntos en color verde son los sitios donde el p valor es menor a 0.05, en los cuales se puede rechazar la hipótesis nula; sin embargo, los puntos en gris, que están representando al 79.63% de las observaciones no son significativos.

En el cartograma de la figura 19, se observan los puntos con un p valor menor que 0.05 que fueron significativos, ahora agrupados en clústeres según el nivel de CO₂ medido. De acuerdo con el interés de encontrar patrones de desgasificación en la zona muestreada, se consideran

más importantes los valores altos rodeados de valores altos representan solo el 2.43% de los puntos (tabla 2), sin embargo, no es posible observar agrupación en la superficie muestreada; así como también es de interés conocer los valores bajos rodeados de valores bajos, que representa el 11.85% y se encuentran dispersos en el área de estudio, sumados se obtiene un total de 14.28% de las observaciones que son significativas para el presente estudio. Con estos valores, se puede concluir que, según el nivel de autocorrelación espacial que resulta del análisis de valores de CO₂ en el Campo Volcánico Monogenético de Xalapa, se encuentran patrones de desgasificación, sin embargo, en la mayoría de los puntos, la distribución de los valores es dispersa.

Aunado a lo anterior, por la extensión del área medida al tratarse de un campo volcánico y el tipo de zona volcánica que no ha estado presentando actividad, estas características estarían indicando que la desgasificación del suelo no es magmática sino superficial y que está siendo influida por el tipo de uso del suelo que se tiene en el área., es decir de fuentes biogénicas. En este campo volcánico contar con una medición representativa del área a estudiar sería indispensable para realizar nuevamente el estudio de autocorrelación espacial que represente con mayor sustento geológico una asociación espacial y esta autocorrelación no se reduzca a un hallazgo teórico que no es posible sustentar con trabajo de campo.

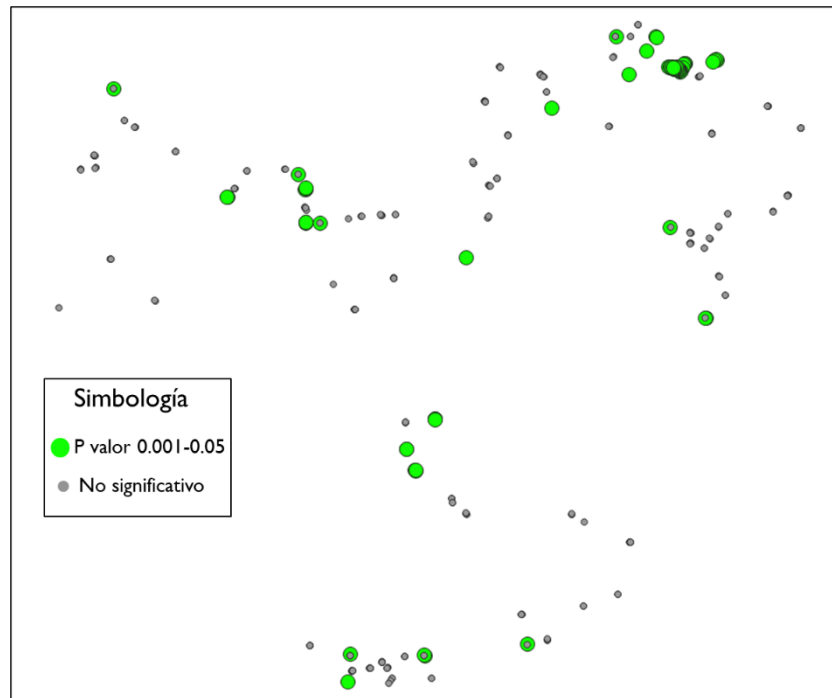


Figura 18. Indicador local de Asociación Espacial para Campo Volcánico Monogenético de Xalapa.

Fuente elaboración propia.

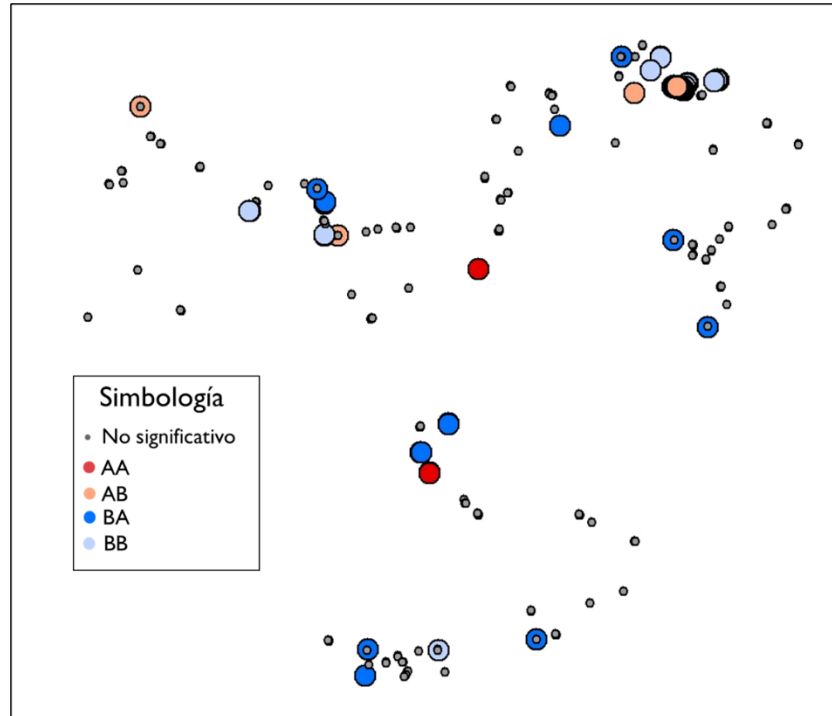


Figura 19. Clústeres por nivel de autocorrelación CVMX.

Fuente: elaboración propia.

Para organizar los resultados obtenidos del análisis clúster de este índice se generó una tabla de doble entrada (tabla 2) clasificando los valores altos-altos, altos-bajos, bajos-altos, bajos-bajos y no significativos, con el número y porcentaje de cada nivel de autocorrelación que se encontró en cada zona, a modo de resumen. Se resaltan en color azul las agrupaciones de interés AA valores altos rodeados de valores altos, y BB valores bajos rodeados de valores bajos. En particular, los valores altos rodeados de valores altos AA estarían indicando una región de interés para tener en cuenta al medir los flujos de CO₂ en una siguiente campaña de campo y así se facilitaría la identificación de estructuras de desgasificación difusa.

	CP		VC		CVMX	
AA	I	0.37%	4	1.99%	8	2.43%
AB	4	1.49%	0	0%	6	1.82%
BA	6	2.24%	5	2.48%	14	4.25%
BB	11	4.11%	17	8.45%	39	11.85%
NS	245	91.76%	175	87.06%	262	79.63%

Tabla 2. Clasificación de autocorrelación espacial. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

De acuerdo con los análisis exploratorios la distribución que presentan los datos es de tipo lognormal, que coincide con el tipo de distribución que de manera frecuente es encontrado en conjuntos de datos geoquímicos.

Con el análisis de aproximación estadística gráfica (Graphical Statistical Approach GSA) se pudo obtener el cálculo del flujo total para cada área de estudio, concluyendo que el nivel de desgasificación varía entre cada tipo de suelo volcánico muestreado: el mayor nivel de desgasificación encontrado es el correspondiente al volcán Chichón, que se encuentra activo; seguido por el Campo Volcánico Monogenético de Xalapa y finalmente el menor nivel es el que corresponde al Lago Cráter de Parangueo.

Las técnicas multivariadas fueron empleadas aprovechando la naturaleza del estudio a realizar y las características de las técnicas, se decidió aplicar un análisis de agrupación clúster para identificar si estuviesen formándose grupos de valores de CO₂ en relación con la ubicación de los puntos muestreados. Se tomó en consideración que la técnica de análisis clúster genera agrupaciones matemáticamente en función de la distancia de manera aleatoria (k means), pero ningún algoritmo revela la variable responsable de la agrupación, las razones de esas agrupaciones suelen ser diversas y resulta interesante conocer la característica que incide más en la generación de tales grupos, de inicio al observar los cartogramas elaborados para conocer la distribución de los clústeres, se puede identificar que las variables de latitud y longitud están influyendo en gran medida en esta distribución, para las tres zonas estudiadas, sin embargo en el caso del campo volcánico monogenético esta agrupación en función de la ubicación es más clara.

En el análisis de autocorrelación que sirvió para encontrar patrones de agrupación en la variable de estudio, según los índices de Morán obtenidos en las tres áreas los cuales son cercanos a cero, se concluye que la distribución de los registros medidos de CO₂ en las tres zonas de estudio es aleatorio, y que aunque en dos de los tres casos estudiados el p valor indica que no se rechaza la hipótesis nula, establecida como “No

hay autocorrelación entre la ubicación y los valores medidos de CO₂, tal agrupación no es observable en los cartogramas de significancia, ni en los cartogramas de clúster, donde se representan los niveles de autocorrelación obtenidos a través del cálculo del índice de Morán local.

Referencias

- Almulhim, A.I., Alverio, G.N., Sharifi, A. et al. Climate-induced migration in the Global South: an in depth analysis. *npj Clim. Action* 3, 47 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00133-1>
- Aranda-Gómez, J.J., Levresse, G., Pacheco-Martínez, J., Ramos-Leal, J. A., Carrasco-Núñez, G., Chacón-Baca, E., González-Naranjo, G., Chávez-Cabello, G., Vega-González, M., Origel, G., Noyola-Medrano, C. (2013). Active sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca and Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65 (1), 169-188.
- Baines, S. J. y Worden, R. H. (2004). Geological storage of carbon dioxide. Geological Society, London, Special Publications. 233, 1-6
- Benavides Ballesteros, H. O. y León Aristizabal, G. E. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Barnes, Ivan, Irwin, W. P., and Gibson, H. A., 1975, Geologic map showing springs rich in carbon dioxide or chloride in California: U.S. Geol. Survey Water Resources Inv.open-file map.
- Barnes, Ivan, Irwin, W. P., and White, D. E., 1978, Global distribution of carbon dioxide discharges, and major zones of seismicity: U.S. Geological Survey Water Resources Investigation 78-79, Open-File Report, 12 p.
- Baubron, J., Allard P., Toutain, J. 1990. Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano island (Italy). *Nature*, 344, 51-53.
- Baubron, J., Allard, P., Sabroux, J., Tedesco, D., Toutain, J. (1991). Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *Journal of The Geological Society - J Geol Soc.* 148. 571-576. [10.1144/gsjgs.148.3.0571](https://doi.org/10.1144/gsjgs.148.3.0571).
- Cahill AE, Aiello-Lammens ME, Fisher-Reid MC, Hua X, Karanewsky CJ, Yeong Ryu H, Sbeglia GC, Spagnolo F, Waldron JB, Warsi O, Wiens JJ. 2013 How does climate change cause extinction? *Proc R Soc B* 280:20121890. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2012.1890>.
- Canadell, J. G. et al. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks in Climate Change 2021: The Physical Science Basis (eds Masson-Delmotte, V. et al.) Ch. 5. An IPCC assessment of the global carbon cycle, identifying priority research areas. Cambridge Univ. Press United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 673–816, doi: 10.1017/9781009157896.007
- Carbonnelle, J., Zettwoog, P. 1982. Local and scattered emissions from active volcanoes: methodology and latest results on Etna and Stromboli. *Bulletin PIRPSEV-CNRS*, 55, Paris.
- Carbonnelle, J., Dajlevic, D., Le Bronec, J., Morel, P., Obert, J., Zettwoog, P. 1985. Emu: composantes sommitales et pariitab des imissions de gaz carbonique. *Bulletin PIRPSEV-CNRS*, 108.
- Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., Cavazos-Álvarez, J., Norini, G., Orozco-Esquivel, T., López-Quiroz, P., Jáquez A. & De León-Barragán, L. (2021) Volcanic geology of the easternmost sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico, *Journal of Maps*, 17:2, 474-484, DOI: [10.1080/17445647.2021.1970037](https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1970037).
- Chiodini G., Cioni R., Guidi M., Raco B. and Marini L. (1998) Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geochem.*, 13, 543-552.
- Chiodini, G., Cardellini, C., Di Luccio, F., Selva, J., Frondini, F., Caliro, S., Rosiello, A., Beddini, G., Ventura, G. (2020). Correlation between tectonic CO₂ Earth degassing and seismicity is revealed by a 10-year record in the Apennines, Italy. *Sci. Adv.* 6, eabc 2938. DOI: [10.1126/sciadv.abc2938](https://doi.org/10.1126/sciadv.abc2938)
- Daoust, G., & Selby, J. (2024). Climate change and migration: A review and new framework for analysis. *WIREs Climate Change*, 15(4), e886. <https://doi.org/10.1002/wcc.886>

- Da Silva, C., Cardozo, O., Odriozola, J., Bondar, C., (2013). Uso del suelo: análisis y clasificación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*. 5, 5 (2013) 142-152. ISSN: 1852-8031.
- Fedorov BG (2014) Carbon dioxide emissions: Russia's carbon balance. *Probl Forecasting* 1(142):63–78
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2011). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 122-149.
- Fisher, T., Arellano, S., Carm, S., Aiuppa, A., Galle, B., Allard, P., Lopez, T., Shinohara, H., Kelly, P., Werner, C., Cardellini, C., Chiodino, G., (2019). The emission of CO₂ and other volatiles from the world's subaerial volcanoes, *Scientific Reports*, 9:18716. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54682-1>.
- Garnier, M. (2022). Introducción al análisis geoestadístico de datos en geociencias: teoría y aplicación. *Revista Geológica de América Central*, 67, 1-22, 2022, doi:10.15517/rgac.v67i0.51474. ISSN: 0256.7024. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n67/0256-7024-rgac-67-29.pdf>.
- Giraldo, R., Méndez, N., Ospina, D. (2001). Design of a sampling network for an estuary in the Colombian Caribbean. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 25(97): 507-518, 2001. ISSN 0370-3908.
- Global Volcanism Program, (2007). Report on El Chichon (Mexico) (Wunderman, R., ed.). Bulletin of the Global Volcanism Network, 32:12. Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN200712-341120>
- González -Mercado, D.E. (2005). El vulcanismo monogenético de la región de Xalapa, Veracruz. Geomorfología, petrología y génesis. Tesis de maestría. Instituto de Geología. UNAM.
- Gupta, S. R., & J. S. Singh, 1977. Effect of alkali concentration, volume, and absorption area on measurement of soil respiration in a tropical sward. *Pedobiologia* 17, 233-239.
- Hinkle M. E. (1994) Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases. *Appl. Geochem.* 9, 53-63.
- Inguaggiato, S., Jácome-Paz, M.P., Mazot, A., Delgado-Granados, H, Inguaggiato, C. Vita, F. (2013). CO₂ output discharged from Stromboli Island (Italy). *Chemical Geology*. 339 (2013), 52-60.
- Isson, T. T., Planavsky, N. J., Coogan, L. A., Stewart, E. M., Ague, J. J., Bolton, E. W., et al. (2020). Evolution of the global carbon cycle and climate regulation on earth. *Global Biogeochemical Cycles*, 34, e2018GB006061. <https://doi.org/10.1029/2018GB006061>
- IAVCEI, (s.a.) Diffuse degassing group, International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior. <https://ccvg.iavceivolcano.org/workgroups/diffuse-degassing-group/>.
- Jácome Paz, M.P. & Delgado Granados, H. (2022). Uso del flujómetro de West System y elaboración de mapas con Wingslib. Universidad Nacional Autónoma de México, serie: Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico. Instituto de Geofísica. Unidad de Apoyo Editorial. IGEF_serie_infraestructura_1_flujometro_2022_1ed.pdf
- Jácome Paz, M. P., Delgado Granados, H., Pérez-Campos, X., Espinasa-Pereña, R. y Campion R. (2022a). Diffuse degassing baseline in Parícutin volcano and Michoacán-Guanajuato monogenetic volcanic field, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 425 (2022) 107534.
- Jácome-Paz, M. P., González-Romo, I. A., Prol-Ledesma, R. M., Torres-Vera, M. A., Pérez-Zárate, D., Rodríguez-Díaz, A. A., Estrada-Murillo, A. M. (2020a). Multivariate análisis of CO₂, H₂S, and CH₄ diffuse degassing and correlation with fault systems in Agua Caliente-Tzitzio, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 394 (2020) 106808. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106808>.
- Jácome-Paz, M.P. Inguaggiato, C., Levresse, G., Robidoux, P., Delgado-Granados, H., Tassi, F. (2020b). Total CO₂ output and carbon origin discharged from Rincón de Parangueo Maar (Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*, 215 (2020) 106558. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106558>

- Jácome-Paz, M. P., Taran, Y., Inguaggiato, S., & Collard, N. (2016). CO₂ flux and chemistry of El Chichón crater lake (México) in the period 2013–2015: Evidence for the enhanced volcano activity. *Geophysical Research Letters*, 43, 127–134. <https://doi.org/10.1002/2015gl066354>
- Jácome-Paz, M.P., Torres-Orozco, R., Espinasa- Pereña, R., De la Fuente-Rivera, J.R., Ruiz- Sánchez, J.O., Delgado-Granados, H. (2022b). Review of geology and geomorphology of the Xalapa Monogenetic Volcanic Field, eastern Trans- Mexican Volcanic Belt. *J. of Volcanology and Geothermal Research*, 432 (2022) 107689. <https://doi.org/10.1016/j.volgeores.2022.107689>.
- Key, R. M., A. Kozyr, C. L. Sabine, K. Lee, R. Wanninkhof, J. L. Bullister, R. A. Feely, F. J. Millero, C. Mordy, and T.-H. Peng (2004), A global ocean carbon climatology: Results from Global Data Analysis Project (GLODAP), *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB4031, doi:10.1029/2004GB002247.
- Kucera C. L. and Kirkham D. R. (1971) Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri. *Ecology* 52, 912-915.
- Kurane I. (2010). The effect of global warming on infectious diseases. *Osong Public Health Res Perspect.* 1(1):4-9. doi: 10.1016/j.phrp.2010.12.004.
- Legrand, D., Pertion, M., López-Landa, V. et al. El Chichón volcanic activity before and after the Mw8.2, 2017, Chiapas earthquake, México. Is El Chichón ready to erupt? *Bull. Volcanol.* 86, 72 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00445-024-01758-0>
- Lieth H. and Ouellette R. (1962) Studies on the vegetation of the Gaspe Peninsula. II. The soil respiration of some plant communities. *Can. J. Bot.* 40, 127-140.
- Lugo-Hubb, J. (2011). *Diccionario geomorfológico. Geografía para el siglo XXI Serie Textos universitarios.* México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lundegard, H. (1927). Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil science*, 23 (417-453).
- Mazot, A., and Y. Taran (2009), CO₂ flux from volcanic lake of El Chichón (Mexico), *Geofis. Int.*, 48(1), 73–83.
- Müllerried, F. (1933). El Chichón: único volcán en actividad en el sureste de México: *Revista de la Universidad de México*, V (27-28) pp. 156-170. Consultado en: <https://www.revistadelauniversidad.mx/download/9b36d008-30e7-4c6d-a30b-b75bd9b340af?filename=el-chichon-unico-volcan-en-actividad-en-el-sureste-de-mexico>.
- Mirzabaev, A., Bezner, R., Hasegawa, T., Pradhan., Wreford, A., Tirado, M., Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*. 39 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473>
- Mina, V. N., 1962. Comparison of methods for determining the intensity of soil restoration. *Soviet Soil Science* 10, 1188-1192.
- Minderman, G., Vulto, J., 1973. Comparison of techniques for the measurement of carbon dioxide evolution from soil. *Pedobiologia* 13, 73-80.
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., et al. (2018). Global changes in drought conditions under different levels of warming. *Geophysical Research Letters*, 45, 3285–3296. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>
- Németh, K. (2010). Monogenetic volcanic fields: Origins, sedimentary record and relationship with polygenetic volcanism, in Cañón Tapia, E. and Szakacs, A., eds., *What is a volcano?: Geological Society of America Special Paper* 470, p.43-66, doi:10.1130/2010.2470(04).
- Németh, K., Kereszturi, G. (2015) Monogenetic volcanism: personal views and discussion. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* 104, 2131–2146. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1243-6>
- Noguchi, K., Kamiya, H., 1963, Prediction of volcanic eruption by measuring the chemical composition and amounts of gases: *Bulletin Volcanologique*, v. 26, p. 367-378.

- Rodríguez, S. R., Morales-Barrera, W., Layer, P., González-Mercado, E. (2010). A quaternary monogenetic volcanic field in the Xalapa region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Geology, distribution and morphology of the volcanic vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 197 (1-4), 149-166. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.08.003>
- Peiffer, L., Taran, Y. (2013). Heat and mass fluxes monitoring of El Chichón crater lake, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 30 (500-511).
- Raich J. W., Bowden R. D. and Steudler P. A. (1990) Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soils. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 54, 1754-1757.
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistican computing. *R Foundation for Statistical Computing*. <https://www.R-project.org/>.
- Reiners W. A. (1968) Carbon dioxide evolution from the soils of three Minnesota forests. *Ecology* 49, 471-483.
- Robinson, A., Lehmann, J., Barriopedro, D. et al. Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate. *npj Clim Atmos Sci* 4, 45 (2021).
- Rohli, R. & Vega, A.J. (2018). *Climatology* (4th ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Schimel, D., (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*. 1 (77-91). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00008.x>
- Sieron, K., Carreto, F., McLeod, O., Guilbaud, M.N., Córdoba, F., Cervantes, J. (2017). El Campo Volcánico Xalapa: una revisión y análisis. *Observatorio Sismológico y Vulcanológico*. UV serva No. 4.
- Sinclair, A. J. (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(1974) 129-149.
- Singh J., Gupta, S., 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review* 43, 449-528.
- Sundquist, E., Broecker, W. (eds.). (1985). *The Carbon Cycle and Atmospheric CO₂: Natural Variations Archean to Present*. Geophysical Monograph Series from American Geophysical Union. 32 (627 pp.). DOI:10.1029/GM032
- Schwartzkopf, S.H., 1978. An open chamber technique for the measurement of carbon dioxide evolution from soils. *Ecology* 59, 1062- 1068.
- Tamburello, G., Pondrelli, S., Chiodini, G. et al. Global-scale control of extensional tectonics on CO₂ earth degassing. *Nat Commun* 9, 4608 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07087-z>
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra* 8va ed.). Madrid: Pearson. 683 pp.
- Valverde, F. (11 de noviembre de 2020). Historia resumida de la Vida en este Planeta [Sesión de charla] Ciclo de conferencias Evolución en Pandemia, organizada por Comunicación UNCo Bariloche, Argentina. <https://www.youtube.com/watch?v=hx7q1BcZpkl>.
- West Systems. (2009). portable soil fluxmeter for Carbon dioxide, Methane and Hydrogen sulfide fluxes [brochure]
- West Systems S.r.l. (2016). Diffuse flux-meter portátil: West Systems. Obtenido de: West Systems S.r.l. Website: <https://www.westsystems.eu/es/instrumentaci%C3%B3n/emisiones-fugitivas/diffuse-flux-meter-port%C3%A1til.html>
- Yang, D., Li, Q. and Zhang, L. (2019). Characteristics of Carbon Dioxide Emissions from a Seismically Active Fault. *Aerosol Air Qual. Res.* 19: 1911-1919. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.06.0282>
- Yurak, V.V., Fedorov, S.A. (2024). Review of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide into the earth's atmosphere. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org.ezproxy.uv.mx/10.1007/s13762-024-05896-y>

“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”

www.uv.mx

