

Primer reporte de una combustión lenta residual en el volcán Quinceo, Morelia, Michoacán, México

Ruth Esther Villanueva-Estrada^{1,*}, Isabel Pérez-Martínez², Isabel Israde-Alcántara³, Norma Susana Pano-Farías¹, Teodoro Carlón-Allende⁴ y Edgar Zamudio-Alejandre⁵

¹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Michoacán, Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, Residencial San José de la Huerta, 58341, Morelia, Mich., México.

²CONAHCYT- Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, 04510, Ciudad de México, México.

³Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

⁴CONAHCYT-Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

⁵Análisis y Evaluación de Riesgos de Protección Civil Municipal de Morelia, área operativa de Protección Civil Estatal de Michoacán, Morelia, Mich. México.

* ruth@igeofisica.unam.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se documenta la presencia de un fenómeno de combustión latente residual (CLR) reportado el 30 de abril del 2022 en el volcán Quinceo, Morelia. Para identificar los gases difusos emanados, el 14 de mayo se realizaron mediciones de los flujos y concentraciones de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) en 25 sitios con la cámara de acumulación de gases. Adicionalmente se determinó la concentración de monóxido de carbono (CO) amoníaco (NH₃) y oxígeno (O₂) en esos mismos sitios con un detector de gases múltiples ALTAIR 5X y se midió la temperatura del subsuelo (15 cm de profundidad) mediante un termopar. Los resultados mostraron que las temperaturas más altas registradas en el subsuelo fueron de hasta 341 °C, donde no fue posible determinar los flujos por la inestabilidad del equipo debido a la temperatura elevada. El cálculo del coeficiente de correlación mostró una relación positiva entre la temperatura y la concentración de H₂S, CH₄ y NH₃. El bajo flujo de metano y el límite inferior de explosividad (LIE) no detectado en la mayoría de los sitios medidos, indican bajo riesgo de explosividad. Sin embargo, hay una zona donde confluyen condiciones tales como las altas temperaturas en el subsuelo, altos flujos de gases, elevadas concentraciones de CH₄ y O₂ y un LIE entre 7 a 10 %, que indican un riesgo de explosividad muy focalizado. La evaluación del riesgo de una explosión en la zona por la falla en el ducto de la tubería de gas natural localizado a unos metros de la zona de CLR, estimó que podría causar daño hasta una distancia de 250 m. Adicionalmente, los altos niveles de metano en esta zona, representan una fuente importante de producción de gases de efecto invernadero. Es posible que este fenómeno (CLR) haya sido provocado por un incendio forestal reportado el 30 de abril, cuyas condiciones de desertificación del lugar como el tipo de suelo (Feozem, rico en materia orgánica) y

condiciones ambientales (temperaturas máximas para el mes de mayo de 31 °C), aumentan los riesgos de una explosión del gasoducto.

Palabras clave: turbera; combustión latente; dióxido de carbono; gases difusos; ceniza.

ABSTRACT

The present study documents the presence of a residual latent combustion (RLC) phenomenon reported on April 30, 2022, at the Quinceo volcano, Morelia. To identify the diffuse gases emanated, on May 14, measurements of the flows and concentrations of methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂), and hydrogen sulfide (H₂S) were made at 25 sites with the gas accumulation chamber. Additionally, the carbon monoxide (CO), ammonia (NH₃), and oxygen (O₂) concentrations were determined in those same sites with an ALTAIR 5X multigas detector, and the subsoil temperature (15 cm deep) was measured using a thermocouple. The results showed that the highest temperatures recorded in the subsoil were up to 341 °C, where it was not possible to determine the flows due to the instability of the equipment due to the high temperature. The correlation coefficient calculation showed a positive relationship between the temperature and the concentration of H₂S, CH₄, and NH₃. The low flow of methane and the lower explosive limit (LEL) not detected in most of the measured sites indicate a low risk of explosion. However, there is an area where conditions such as high temperatures in the subsoil, high gas flows, high concentrations of CH₄ and O₂, and an LEL between 7 to 10 % converge, which indicates a highly focused risk of explosion. The evaluation of the risk of an explosion in the area due to the failure of the natural gas pipeline located a few meters from the RLC area estimated that it could cause damage up to a distance of 250 m. Additionally, the

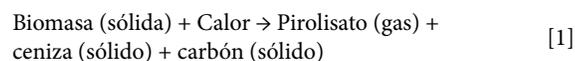
high levels of methane in this area represent an important source of greenhouse gas production. It is possible that this phenomenon (RLC) was caused by a forest fire reported on April 30, whose desertification conditions of the place such as the type of soil (Feozem, rich in organic matter) and environmental conditions (maximum temperatures for the month of May, 31 °C), the risks of a pipeline explosion increase.

Key words: peat; smouldering; carbon dioxide; diffuse gases; ash.

INTRODUCCIÓN

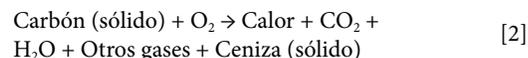
En diferentes partes del mundo se registran grandes incendios forestales (p. ej., Australia, Indonesia, Canadá, Rusia USA, UK) y son de gran importancia dado el impacto que generan como el riesgo a la población, cambios en el ecosistema y liberación de gases a la atmósfera (Hadden *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2015; Page *et al.*, 2002; Stockwell *et al.*, 2016; Van der Werf *et al.*, 2008). Otro fenómeno menos estudiado, es la presencia de fuegos latentes (smouldering, en inglés) (Huang *et al.*, 2016). La principal característica de estos fuegos latentes es que la combustión es lenta, no hay llama con la que se queman los sólidos, las temperaturas del suelo varían de 500 a 700 °C (Rein *et al.*, 2008a, 2008b), la velocidad de propagación (1 a 5 cm/h) y el calor liberado neto (8 kW/m²) es bajo (Drysdale, 2011; Rein, 2013) en comparación con un incendio forestal de grandes dimensiones (velocidad de propagación de 100 cm/h, 15 kW/m² de calor liberado y temperaturas de hasta 1500°C) (Drysdale, 2011; Han *et al.*, 2022; Rein, 2013). Este tipo de combustión latente ocurre en depósitos de turba (González-Pérez *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2016; Rein, 2009), y aunque a escala menor, también destruyen grandes cantidades de biomasa, causan daños al suelo (pérdida de nutrientes o acumulación de sustancias hidrofóbicas que afectan la capacidad de infiltración de los suelos; González-Pérez *et al.*, 2011), generan gases de efecto invernadero a la atmósfera (CO₂ y CH₄; Kolker *et al.*, 2009), pueden durar de días a meses y su ubicación exacta es difícil de encontrar. Los incendios forestales subterráneos se producen principalmente en capas de mantillo, humus y turba (Hartford y Frandsen 1992). La turba es un suelo orgánico, formado por la acumulación de vegetación parcialmente descompuesta, poroso y rico en carbón; por lo tanto, es propenso a arder sin llama (Huang *et al.*, 2016; Huang y Rein, 2014). La combustión de turberas puede iniciarse por fuego, relámpagos o brasas. La ignición depende del contenido de humedad, de materia inorgánica (minerales) y otras propiedades fisicoquímicas del suelo (Huang *et al.*, 2016). El suministro de oxígeno y la pérdida de calor son los procesos que controlan la combustión latente (Huang *et al.*, 2016), donde el combustible es el material orgánico y el oxidante es el oxígeno en el aire, ambos reaccionan para producir calor y productos de combustión sólidos y gaseosos (Rein, 2013). De forma resumida, las reacciones que involucran este fenómeno son:

Pirólisis: Es la descomposición de un material sólido orgánico por el calor (temperatura arriba de 200 °C) para producir pirolisato, el cual es una mezcla compleja de especies orgánicas (compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos poliaromáticos y material particulado; Rein, 2013). Es una reacción o serie de reacciones irreversibles y endotérmicas (necesita calor externo para que se lleve a cabo la reacción) que involucra un cambio en la composición química (compuestos de cadena larga a más corta) en donde debido al cambio de fases, puede generar productos sólidos y gaseosos (Rein, 2013). Otros productos de la pirolización son vapor de agua y traza de CO y CO₂, carbón (material poroso rico en carbono) y ceniza (residuo rico en minerales; Hadden *et al.*, 2013). La reacción química involucrada puede ser la siguiente:



El pirolisato y el carbón son susceptibles de una reacción subsiguiente llamada reacción de oxidación.

Oxidación sólida: es la reacción entre un producto de la pirólisis y el oxígeno del ambiente. La reacción es exotérmica, es decir que libera calor, y ocurre en la superficie del sólido, pero también puede ocurrir a una cierta profundidad del suelo, a través del material poroso. En condiciones naturales, la combustión no es completa y generalmente se producen gases como CO₂ o hidrocarburos sin quemar, y más ceniza, de acuerdo a la siguiente reacción:



Hay una tercera reacción que puede ocurrir después de la oxidación sólida y es la oxidación del pirolisato (gas). Los productos de la oxidación del gas son calor, CO₂, H₂O y otros gases, generando una combustión con flama y hollín (Hadden *et al.*, 2013). Este proceso es evidente porque es suficientemente caliente para irradiar su propia luz y observar la flama (Rein, 2013). La combustión lenta y un incendio (oxidación del gas con generación de flama) están relacionados y una puede dar lugar a la otra. Rein (2013) menciona que la combustión lenta de materiales como ramas de árboles o troncos, normalmente se observa durante días después de que ha pasado un incendio, y a este proceso se denomina como combustión lenta residual (CLR). El proceso reverso es poco frecuente porque se requiere condiciones termodinámicas inusuales y fuertes vientos (Rein, 2013). Berstchi *et al.* (2003), mencionan que este fenómeno de CLR es producido por fuertes convecciones inducidas a partir de un fuerte incendio ocurrido varias semanas antes. En su mayoría, los combustibles propensos incluyen troncos caídos, material de desecho y suelos orgánicos (Bertschi *et al.*, 2003) y los gases mayoritarios reportados son (en orden decreciente de abundancia): CO₂, CO, CH₄, etano, eteno, acetileno, propeno, formaldehído, metanol, ácido acético, ácido fórmico, gliceraldehído, fenol, furano, amoniaco y cianuro de hidrógeno (Sun *et al.*, 2022).

El riesgo de los fuegos latentes es que presentan condiciones letales a los sistemas biológicos, ya que producen un incremento de la transferencia de calor hacia lo profundo del suelo por un mayor tiempo (hasta 1 h) y con temperaturas hasta de 500 °C (Torero *et al.*, 2020).

En la cuenca Potosí, en Nuevo León, México, Roy *et al.* (2014) reportaron el fenómeno de incendio sub-superficial en una capa de turba de profundidad de 200 a 280 cm, y con suelos ricos en carbono orgánico, posiblemente causado por procesos de desertificación que a su vez se originaron por el cambio de uso de suelo y sobreexplotación del acuífero. La turba formada en la cuenca Potosí inició su combustión por la quema de biomasa producto de las actividades agrícolas y desde hace 30 años está en combustión incesante (Roy *et al.*, 2014). Asbjornsen *et al.* (2005) presentan un estudio de incendio de baja intensidad en un bosque tropical húmedo de Oaxaca (México), causado por condiciones de sequía extrema. Sin embargo, no hay casos reportados en el país de una combustión latente sin flama como el fenómeno que se presentó en el volcán Quinceo. Este fenómeno de combustión latente se presentó por primera vez en el área de interés en el 2016 (comunicación personal del grupo de Protección Civil Estatal de Michoacán), sin haber un monitoreo de las concentraciones de gases emanados ni tampoco algún reporte científico al respecto.

En este trabajo se propone emplear la técnica de gases difusos en el suelo, la cual ha sido aplicada en México, principalmente para el estudio de geotermia y vulcanología (Bolós *et al.*, 2022; Jácome Paz *et al.*, 2020a, 2020b, 2016; Mazot y Tarán, 2009; Peiffer *et al.*, 2018;

Pérez-Martínez *et al.*, 2021), así como en evaluación de un sitio de relleno sanitario (Villanueva-Estrada *et al.*, 2019). Esta técnica tiene la ventaja de analizar los gases difusos *in situ*, fácil procesamiento de los resultados, y no se requieren muchos insumos costosos para tener el equipo en buen estado. Adicionalmente, el monitoreo de gases difusos que provienen de un fuego latente, donde no se observa la emanación de los gases pero se identifica el sitio por las altas temperatura, es de suma importancia para evaluar el impacto ambiental y el riesgo de estos fenómenos en zonas urbanas.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados preliminares de un monitoreo de gases difusos (metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O₂)) en un área restringida por Protección Civil en el volcán Quinceo, Morelia, donde reportaron temperaturas altas en el suelo el 10 de mayo de 2022. Este fenómeno representa un

riesgo no sólo para las personas que hacen actividad de senderismo en la zona, sino porque a unos metros de la zona de riesgo se ubica un ducto de gas profundo. Es importante mencionar que este trabajo responde a una alerta de Protección Civil Estatal de Michoacán, para descartar cualquier evento relacionado con una erupción volcánica, dada la alta densidad de volcanes, 1894 centros eruptivos según Connor (1987), siendo el último el volcán Parícutín.

ÁREA DE ESTUDIO

El área se ubica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana dentro del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, en la cima del volcán Quinceo, al noroeste de la ciudad de Morelia, estado de Michoacán (Figura 1). Presenta una elevación de 2740 m s.n.m. (INEGI, S/F).

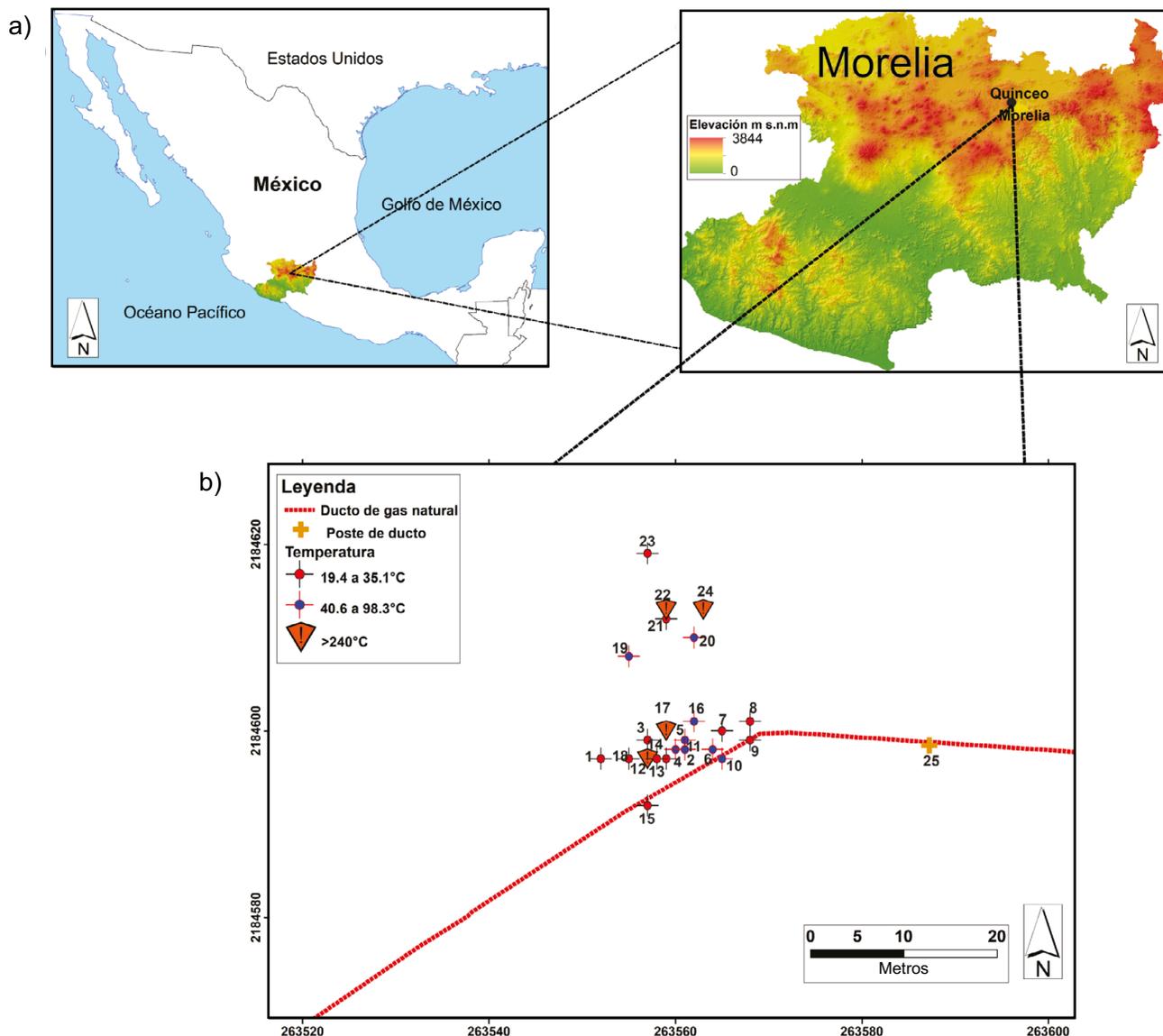


Figura 1. a) Ubicación a escala global, regional y local de los sitios de medición. Se muestra el mapa del estado de Michoacán donde el color rojo indica la mayor altitud (3844 m s.n.m.). b) Mapa de localización de los sitios de medición de los flujos difusos (CO₂-CH₄-H₂S) y de NH₃; el color de los puntos indica la temperatura medida en el subsuelo (15 cm de profundidad) y aquellos sitios donde la temperatura está por arriba de 240 °C. En la Figura se identifica la línea del ducto de gas natural, así como el poste. El símbolo en amarillo es la localización del poste indicativo del gasoducto.

Este edificio volcánico de composición andesítico basáltica se originó durante el Pleistoceno (hace 1.36 Ma) y es inactivo; fue cubierto hacia su sector Oeste por el volcán en escudo de las Tetillas, formado entre 0.56 y 0.36 Ma. Este último recibe el nombre de Las Tetillas por dos edificios volcánicos construidos sobre el volcán Quinceo hace 0.33 Ma correspondientes a un domo y a un cono de escoria (Avellan *et al.*, 2020). El origen de estos aparatos está directamente relacionado con los sistemas de fallas E-O y ENE-OSO del sistema Morelia-Acambay (Menella *et al.*, 2022) y emitieron un volumen de aproximadamente 6 km³ de productos volcánicos.

Morelia se encuentra entre las coordenadas geográficas 19°42'12" latitud N y 101°11'31" longitud O. La temperatura promedio de Morelia es de 18.7 °C, con una precipitación promedio de 759.3 mm al año, siendo los meses de junio a septiembre con valores arriba de 100 mm. Los tipos de suelo dominantes para la zona de las partes del volcán Quinceo son luvisol, vertisol y Feozem (Figura 2; INEGI, 2017). El suelo de tipo Feozem (Phaezom) es poroso, oscuro y rico en materia orgánica; predomina hacia el oriente del volcán Quinceo. Mientras que, hacia el sector occidental, el suelo es asociado a vertisol (INEGI, 2017). Un suelo de tipo vertisol se caracteriza por su textura son arcillosa y colores negros, generalmente se ubican en las partes más bajas de la zona de estudio (INEGI, 2017). Los suelos de tipo luvisol están formados por una variedad de materiales no consolidados.

La zona donde se presentó la combustión tiene una altitud de 2337 m s.n.m. y está ubicada en el camino de terracería que corre paralelo al ducto de 24" de gas, que lleva por nombre Valtierra-Lázaro Cárdenas. El ducto se encuentra a una profundidad de 7m (Figura 1b). Alrededor se observa un paisaje dominado por bosque de encino con escasa vegetación dado lo rocoso de las coladas lávicas de composición basáltica.

En el sitio de estudio se identifica un estrato herbáceo escaso debido a la dominancia de la fronda arbórea de los encinos que depositan un manto de hojarasca. Más del 70 % de cobertura de follaje con capa de cobertura de mantillo de más de 5 cm de espesor es observado en sectores no quemados.

La energía cinética de la escasa lluvia posterior al incendio del 9 de mayo provocó que el material arenoso en suspensión por la lluvia atípica descendiera por las pendientes del volcán a través de cascadas de agua, las cuales drenaron sobre antiguas lavas basálticas que forman escalonamientos. La posterior sedimentación de partículas que conforman una mezcla heterogénea de sedimentos y ceniza (Figuras 2b y 2c), fueron arrastrados con las primeras lluvias desde zonas quemadas limo-arenosas en pequeñas represas, y planicies de relleno aluvial.

El volcán Quinceo proporciona recursos hídricos superficiales y subterráneos importantes para el abastecimiento de agua a gran parte de la población del municipio de Morelia. Sin embargo, hay fenómenos naturales y sociales que aceleran la transformación del paisaje como

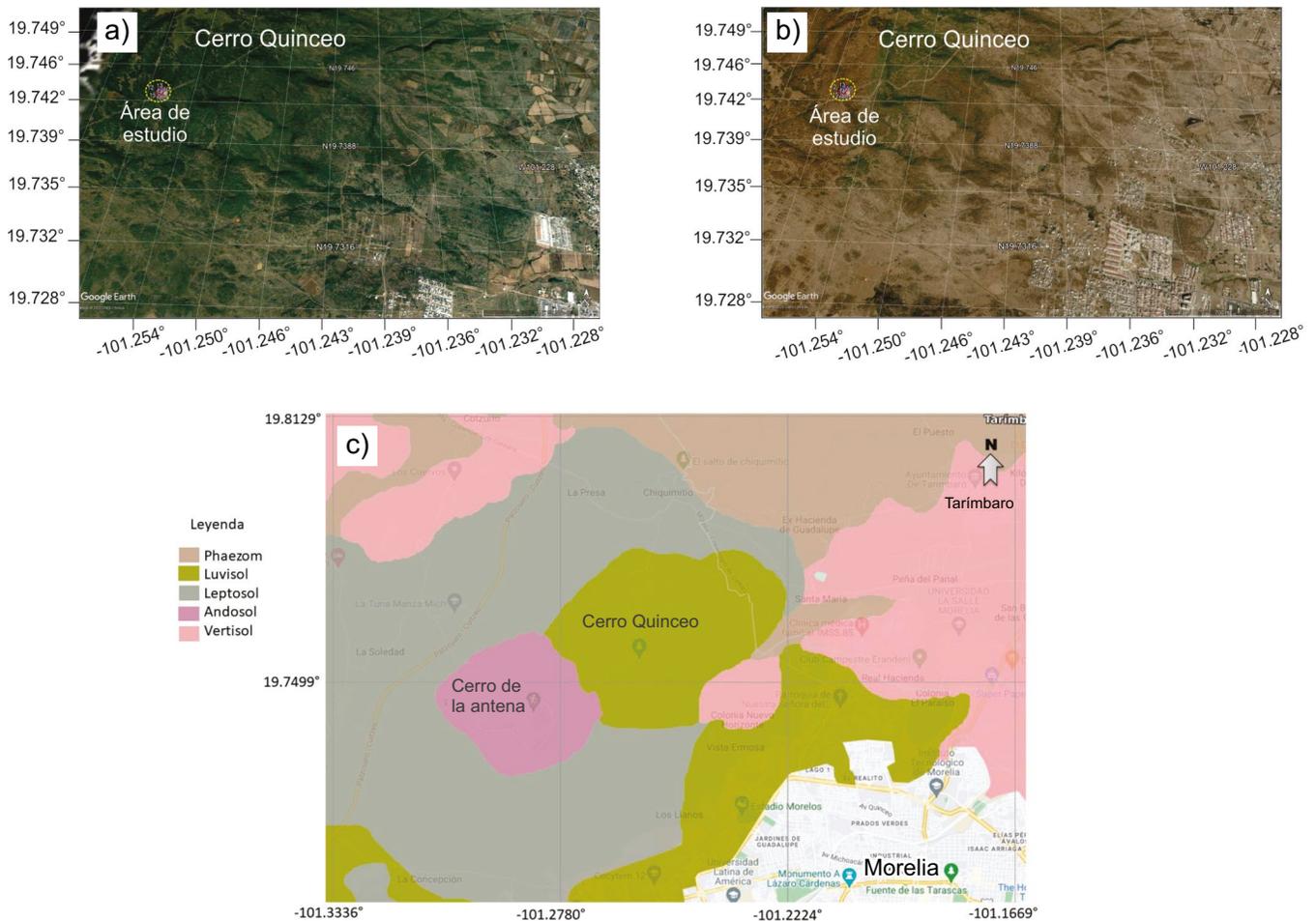


Figura 2. Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth Pro de la zona del Volcán Quinceo para las fechas de: a) diciembre de 2003, b) febrero de 2021, donde se observa el área de bosque afectada. c) Tipo de suelos predominantes para la zona del volcán Quinceo (Tomado del INEGI: https://www.inegi.org.mx/app/area_sgeograficas/?ag=07000016#collapse-Mapas).

incendios forestales, bancos de materiales, asentamientos irregulares, cambio de uso de suelo y deforestación (IMPLAN, S/F). Comparando la deforestación del volcán Quinceo (Figuras 2a y 2b), se puede observar que ha habido un impacto en 18 años, donde en las partes altas del cerro se visualiza bosque primario en mejor estado para el 2003 que para el 2021. Esto trae como consecuencia la erosión del suelo, disminución de la infiltración del agua, alteración del balance hidrológico, aumento de la desertificación, degradación de los suelos, sequía e inundaciones (IMPLAN, S/F). En los periódicos locales de Morelia se reportaron fuertes incendios en el volcán Quinceo del 30 de abril al 4 de mayo del 2022 (Figura 3f), los cuales fueron controlados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Comisión Forestal de Michoacán (COFOM), elementos de Protección Civil y Bomberos de Morelia y de la Policía Ambiental (comunicación personal de autoridades de Protección Civil Estatal de Michoacán).

METODOLOGÍA

Determinación de flujos difusos (CO₂-CH₄-H₂S)

Se llevaron a cabo las mediciones de flujos difusos (CO₂-CH₄-H₂S) el 14 de mayo de 2022, cubriendo un total de 25 sitios en un área aproximadamente 345 m² (área medida con herramientas de Google Earth Pro) en el volcán Quinceo (Figura 1b), principalmente en la zona que se encontraba delimitada por Protección Civil para seguridad de la población. Adicionalmente, se midió el flujo de estos gases en el poste de indicación del gasoducto (Figura 3a) y en zonas fuera del área acordonada. El criterio para decidir los puntos de medición en el lugar fue la presencia de anomalías térmicas del subsuelo con respecto a la temperatura promedio para Morelia. Alrededor de estas anomalías se procuraba que la distancia entre los puntos de medición fuera más cercana (mínimo, un metro de distancia entre puntos); si la temperatura del subsuelo era cercana a la temperatura promedio (19 °C), se consideraba una mayor distancia entre puntos.

Las mediciones de los flujos difusos se realizaron mediante una cámara de acumulación West Systems equipada con un detector de infrarrojo para CO₂ (LICOR LI-820) y CH₄ (WS-CH₄-TLD), y una celda electroquímica (WS-TOX-H₂S) para H₂S (Figura 3d).

Para determinar los flujos difusos, en cada punto de muestreo se registró la variación de la concentración del gas con respecto del tiempo; la duración de las lecturas varió de acuerdo con la concentración detectada. Los datos posteriormente fueron corregidos por la temperatura del suelo medida en cada sitio de muestreo y la presión determinada por el equipo. Se realizó un análisis estadístico de las mediciones obtenidas en campo a través de la prueba estadística de Grubbs, para determinar los valores atípicos altos y presentar en un mapa el comportamiento propio del sistema.

El principio del equipo se rige por la difusión de gases (Ley de Fick) del subsuelo hacia la atmósfera, la cual queda atrapada en una cámara de acumulación y a través de los sensores que contiene el equipo, miden la concentración de los gases (Jácome Paz y Delgado Granados, 2022). Los resultados que arroja el flujómetro portátil (West Systems, 2019) se expresan en un gráfico de la concentración (ppm) del gas *versus* el tiempo, donde el valor de la pendiente indica la relación ppm·seg⁻¹. Con el valor de la pendiente se calcula el factor de proporcionalidad que depende de la relación volumen/superficie de la cámara de acumulación usada por el equipo de medición, de la presión barométrica y de la temperatura del aire (aire y/o gas que ingresa al detector proveniente del suelo) al momento de tomar la medida. La corrección por las condiciones ambientales (presión y temperatura) se realiza a través de la ecuación [3], que es también utilizada para cambiar las unidades del flujo de ppm·seg⁻¹ que muestra el equipo a mol·m⁻²·día⁻¹:

$$F = \frac{\text{Flux} \times 86400 \times P \times V}{10^6 \times R \times T \times A} \quad [3]$$

donde:

- F: flujo de gas (CO₂, CH₄ o H₂S) (mol·m⁻²·día⁻¹),
- flux: valor de la pendiente obtenida de las mediciones en campo (ppm·seg⁻¹),
- P: presión barométrica (mbar),
- V: volumen de la cámara de acumulación (m³),
- R: constante de los gases (0.08314510 bar·L·K⁻¹·mol⁻¹),
- T: Temperatura del suelo (K),
- A: área de la cámara de acumulación (m²).

La repetibilidad de las mediciones de los flujos de CO₂ a través del método de la cámara de acumulación fue experimentalmente evaluada con un valor de ± 10 % en un rango de 0.2 a 10000 g·m⁻²·día⁻¹ (Chiodini *et al.*, 1998); el rango de medición del analizador de CO₂ es de 0 a 20000 ppm. Los límites de detección del sensor del CH₄ son 0.008 – 14400 g·m⁻²·día⁻¹ y la exactitud del flujo: ±25 % para flujos por debajo de 16 g·m⁻²·día⁻¹ y ±10 % para flujos entre 16 y 2400 g·m⁻²·día⁻¹. El detector de H₂S tiene un límite de detección inferior de 0.085 g·m⁻²·día⁻¹ y uno superior de ~20 g·m⁻²·día⁻¹. El sensor de H₂S presenta una exactitud de ±25 % para flujos entre 0.085 y 1.7 g·m⁻²·día⁻¹ (West Systems, 2019). Se midió la temperatura del suelo superficial (profundidad de aproximadamente 15 cm) en cada punto de medición de flujo, empleando un termopar (±0.1 °C) de la marca Extech tipo K/J modelo TM100 (Figura 3d).

Es importante considerar que las mediciones de las concentraciones de H₂S presentan errores de -2.5 a 1.6 ppm porque el sensor tiene interferencias con otros gases presentes en una turbera (p. ej., SO₂, CO, H₂, NH₃, CH₄, entre otros) (West Systems, 2019).

Adicionalmente, el personal de Protección Civil midió la concentración de amoníaco (NH₃) y oxígeno (O₂) y la concentración mínima de gas combustible en el aire (Límite inferior de explosividad, LIE) mediante un detector de gases múltiples ALTAIR 5X. La reproducibilidad reportada por el proveedor para el CO es de ±5 ppm (rango de medición de 0 a 2000 ppm), para el O₂ es de 0.7 % (rango de medición de 0 a 30 %), y para el NH₃ la reproducibilidad es de ± 5 ppm (rango de concentración de 0 a 100 ppm).

Determinación de tamaño de partícula

El análisis del tamaño de partícula se llevó a cabo en el laboratorio de química del Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se obtuvieron 4 gramos de tres muestras secas que fueron analizadas por triplicado con un equipo Coulter LS-100 Q con un rango de medición en partículas de 0.4 a 2000 μm. Su principio de funcionamiento se basa en una serie de lentes que proyectan la luz dispersando un haz láser que impacta en las partículas secas de la muestra que se encuentran suspendidas en el aire. El haz produce distintos patrones de difracción y distribución del tamaño de las partículas de la muestra.

Determinación de la composición química

El análisis de la composición química de elementos mayores y traza se llevó a cabo en el laboratorio de Química del Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo empleando de un equipo de Fluorescencia de Rayos X modelo S8 Tigre, marca Bruker a través del análisis de una muestra de polvo fino prensada. El error estimado para la determinación de iones mayores es menor de 1 % y para elementos traza, menor a 4 %.

RESULTADOS

Distribución espacial de los gases producto de la combustión (CO_2 , H_2S y CH_4)

Con los resultados de los flujos de gases en cada punto de medición (Tabla 1), se realizaron los mapas de iso-flujos de gases para identificar el comportamiento del sistema; para ello se utilizó el software Surfer v.19 y el método de interpolación Kriging simple por ser el mejor estimador lineal no sesgado y minimiza la varianza de los errores de estimación del modelo probabilístico (Figura 4).

En la Figura 4 se eliminaron los sitios 12 y 17 porque presentan flujos mayores $10000 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (valor máximo de medición) y el sitio 4 porque tiene concentraciones mayores del rango de medición (20000 ppm); aunque no se tiene certeza analítica en la medida, estos puntos anómalos con altas concentraciones de CO_2 , CH_4 y H_2S representan zonas con mayor cantidad de gas que está emanando en esos sitios

como se observa en la Figura 3b. El CO_2 que está emanando como producto de las reacciones de oxidación sólida se va disipando hacia la parte externa de la zona (Figura 4), y en el sitio del gasoducto presenta el valor más bajo ($1.35 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). Se presenta otra zona donde se concentra altos valores de flujo de CO_2 , en la parte de la cañada (sitio 21; $339 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$). Se detectaron flujos de H_2S en un 40% de los sitios de medición, y sus valores están entre 0.09 a $4.26 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (Tabla 1), y su distribución espacial tiene un comportamiento similar a la distribución del CO_2 de la parte NO, se presentan valores anómalos de flujos en los sitios 12 y 17 (Figura 4). Los flujos de CH_4 se detectaron en el 36 % del total de los sitios de medición, y sus valores están entre 0.09 y $116.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; al igual que el comportamiento de CO_2 y H_2S , se presentan anomalías de metano en el sitio 12 ($116.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), mientras que para los sitios 4 y 17, se va disipando estos flujos presentando valores de 3.548 y $10.544 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente (Figura 4; Tabla 1).

Para evaluar si la distribución de temperatura presenta un patrón

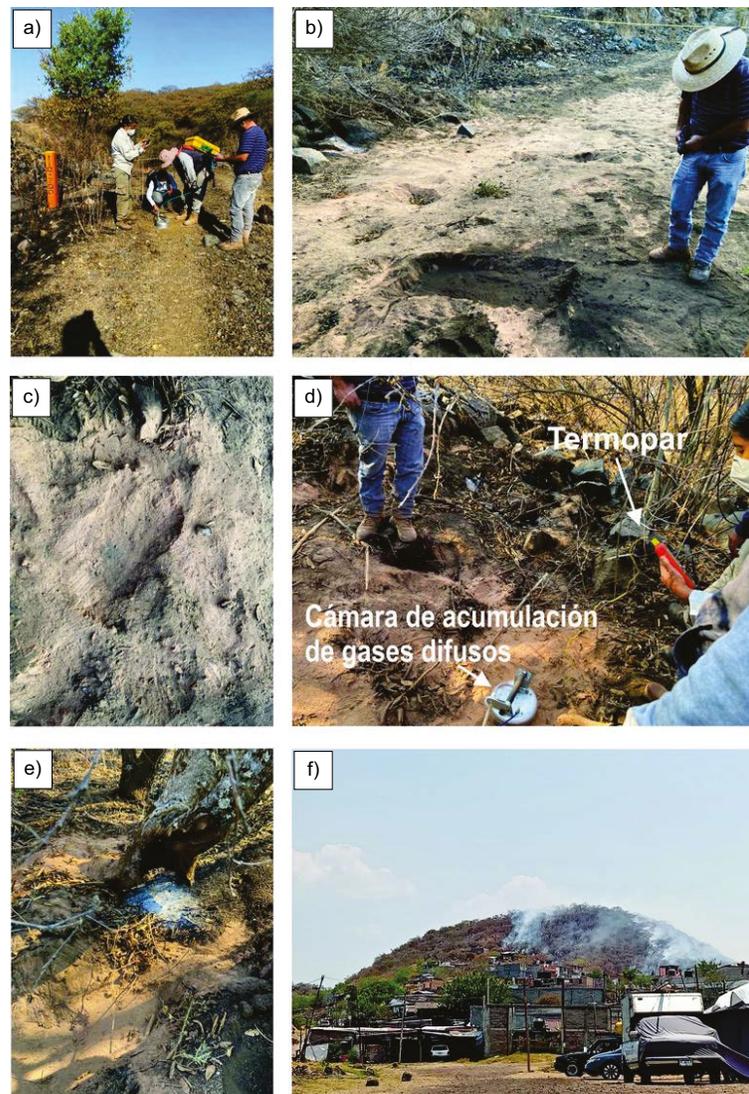


Figura 3. Fotografías del sitio donde el suelo estuvo bajo un fenómeno de combustión. a) Localización del poste indicando el sitio por donde pasa el gasoducto, b) Material arenoso en combustión, c) Orificios en el suelo producidos por la desgasificación, d) Mediciones de temperatura del suelo superficial (15 cm de profundidad) y de gases difusos de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), donde se muestra el equipo empleado, e) ceniza que es producto de la combustión del material arbóreo del sitio, f) vista lateral del incendio en el volcán Quinceo ocurrida del 30 de abril al 4 de mayo del 2022 (fotografía donada por Protección Civil Estatal de Michoacán).

Tabla 1. Resultados de las mediciones de flujos difusos medidos dentro del polígono de riesgo establecido por Protección Civil de Morelia. LIE: Límite Inferior de Explosividad. Los valores en rojo indican que están fuera del rango de medición reportado por el proveedor.

Sitios de medición	x (m)	y (m)	Altitud (m)	Temperatura superficial (°C)	Temp. suelo (°C, aprox. 15 cm)	Flujo de gases difusos (g·m ⁻² ·día ⁻¹)			Concentración de gases (ppm)				O2 (%)	LIE (%)	Observaciones	
						CO ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	NH ₃				CO
1	263553	2184597	2393	17	21.5	2.0	ND	ND	449	ND	ND	2	ND	ND	ND	
2	263562	2184599	2381	11.7	19.4	1.7	ND	ND	450	ND	ND	3	ND	ND	ND	
3	263558	2184599	2381	14.5	19.9	1.9	ND	ND	446	ND	ND	3	ND	ND	ND	
4	263560	2184599	2382	46	98.3	6749.8	0.804	3.55	22070	2.181	35	2	70	ND	ND	
5	263562	2184599	2383	33	48.4	477.8	ND	ND	6409	0.551	7	6	ND	ND	ND	
6	263564	2184598	2385	23	48.6	23.7	ND	ND	821	ND	4	18	ND	ND	ND	
7	263565	2184601	2383	12.4	33.7	5.9	ND	ND	505	ND	8	8	ND	ND	ND	
8	263569	2184602	2378	13.2	22.5	2.0	0.088	ND	476	ND	4	7	ND	ND	ND	
9	263568	2184599	2381	16.6	30.4	7.3	ND	ND	535	ND	4	6	ND	ND	ND	
10	263566	2184598	2380	21.8	44.4	10.7	0.111	ND	1117	ND	5	5	ND	ND	ND	
11	263561	2184598	2383	20.3	45	50.5	0.098	ND	1574	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
12	263558	2184597	2384	130	260	488189.5	4.259	116.44	93010	6.380	140	100	1099	20	7 a 10	Los sensores se alertaron posiblemente por la temperatura tan alta. Fuerte olor a azufre. Este sitio está a unos 40 cm de distancia con respecto al sitio 12 (anterior).
13	263559	2184597	2379	SM	22.1	7.1	0.126	ND	578	0.087	ND	ND	ND	ND	ND	
14	263559	2184597	2381	24	32.1	ND	0.181	ND	530	ND	14	11	ND	ND	ND	
15	263558	2184592	2379	22	25.9	2.2	0.138	ND	479	0.105	ND	11	ND	ND	ND	
16	263563	2184602	2382	25	40.6	4.1	0.091	ND	520	ND	8	4	ND	ND	ND	
17	263559	2184600	2385	192	244	147725.2	2.047	10.54	28910	0.600	23	18	4	ND	ND	
18	263555	2184597	2382	30	23.6	404.2	ND	1.91	636	0.110	5	18	61	ND	ND	
19	263556	2184608	2382	22	42.6	282.6	ND	1.08	725	ND	6	5	6	ND	ND	A partir del sitio 19, fuimos atrás del camino, donde hay árboles, sobre la cañada.
20	263562	2184610	2376	21.6	47.8	52.5	ND	0.09	630	ND	5	4	ND	ND	ND	
21	263560	2184612	2375	19.2	28.8	338.9	ND	0.81	712	ND	5	1	6	ND	ND	
22	263560	2184614	2379	69	251.7	126.4	ND	0.85	2809	0.133	7	4	35	ND	ND	
23	263558	2184620	2386	19	23.1	1.7	ND	ND	423	ND	ND	4	ND	ND	ND	
24	263563	2184614	2377	27	341.4	52.9	ND	0.32	1495	ND	10	2	1	ND	ND	
25	263587	2184597	2380	SM	35.1	1.3	ND	ND	447	ND	3	ND	ND	ND	ND	Sitio donde se localiza el gasoducto. El suelo es terracería, por lo que se tomó la temperatura superficial con la sonda.

ND= no detectado; SM= sin medida

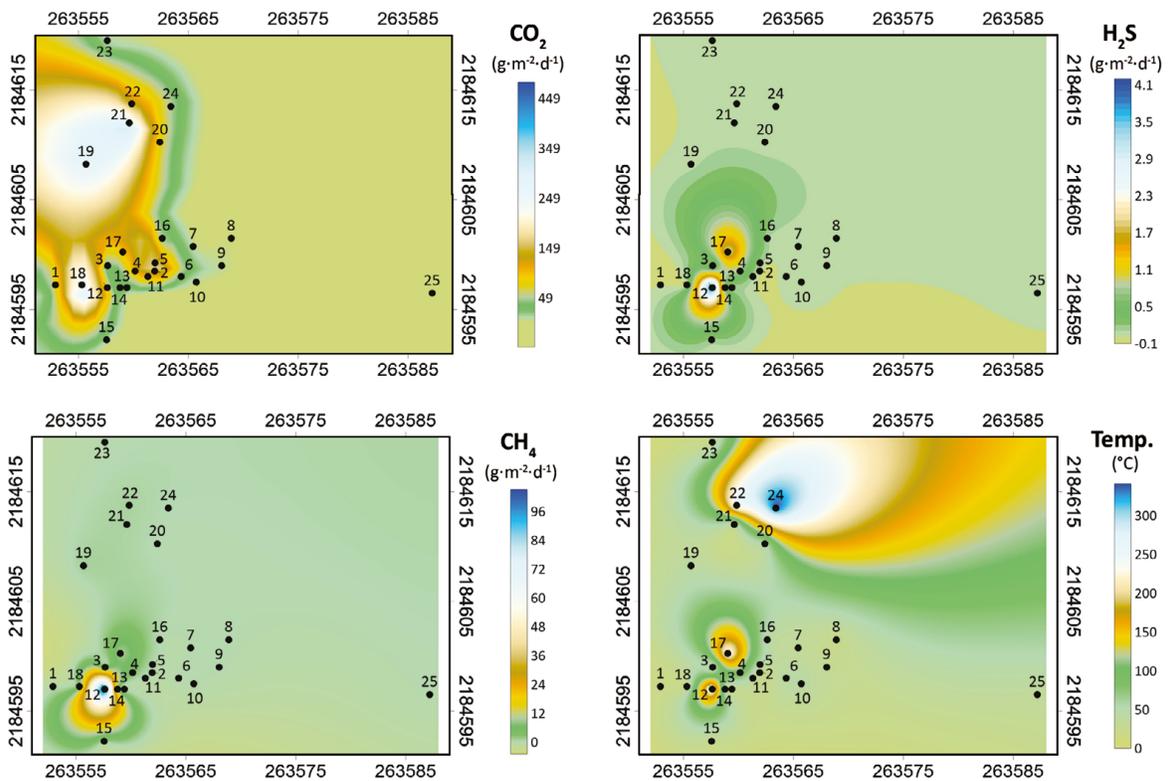
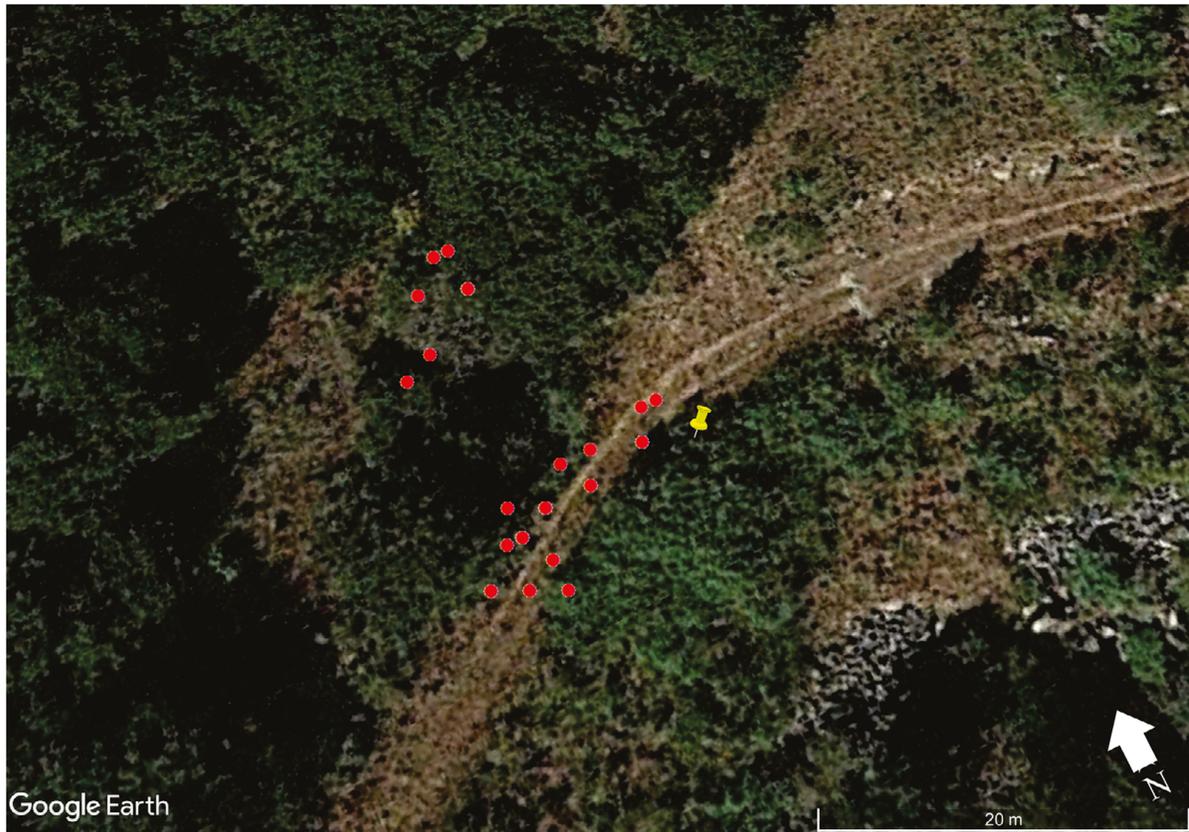


Figura 4. Distribución de flujos difusos de CO_2 , H_2S , CH_4 , ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en la zona de riesgo en el Cerro del Quinceo. Se presenta el mapa con la distribución de los datos, donde se indica en símbolo de color amarillo la posición del gasoducto. Los mapas de isoflujos se realizaron eliminando los datos extremos (fuera de rango del equipo de medición).

similar al comportamiento para la distribución de flujos de CO₂, H₂S y CH₄, se calculó el índice de correlación de Pearson (Ecuación 4) para evaluar la relación entre los flujos de gases (variables independientes) y la temperatura (variable dependiente).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{X}}{s_x} \right) \times \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{s_y} \right) \quad [4]$$

Donde

n = número de mediciones,

X_i, Y_i = valores de medición de la variable dependiente (Y) e independiente (X),

\bar{X} , \bar{Y} = valores promedio de la variable dependiente (Y) e independiente (X),

s_y, s_x = desviación estándar de la variable dependiente (Y) e independiente (X).

Los resultados muestran una fuerte correlación (r = 0.9; Hernández-Lalinde *et al.*, 2018) de la temperatura con el flujo de H₂S y una correlación moderada con el flujo de CH₄ (0.4; Tabla 2), mientras que con el CO₂ no hay una correlación (r = 0.1).

Representación de los resultados de concentración de gases.

Las concentraciones de CO₂, H₂S, CH₄, NH₃, y la temperatura se representaron en diagramas de caja para evaluar la distribución de la muestra (hablando estadísticamente del subconjunto de la población) a través de cuartiles (Figura 5) e identificar valores atípicos (Frigge *et al.*, 1989). El programa estadístico empleado para la elaboración de los gráficos fue el software MINITAB (versión gratuita).

El diagrama de caja o bigote, desarrollado por Tukey (1977), consta de los siguientes elementos (Flores y Flores, 2018): el valor mínimo, el primer cuartil (Q1), el segundo cuartil (Q2), el tercer cuartil (Q3) y el valor máximo (Figura 5d); la representación gráfica es una caja incluye el Q1 y el Q3 que representan el 50 % de las observaciones. El diagrama de caja muestra una medida de tendencia central, la mediana

(Q2), que está indicada por la línea central dentro de la caja (Figura 5d). Los bigotes son las líneas verticales que salen de la caja e indican los valores mínimo y máximo que están fuera del 50 % central de la distribución. Además, el diagrama presenta una medida de dispersión representada por el rango intercuartil e indica la simetría o asimetría de la distribución. Adicionalmente con este tipo de gráfico es posible determinar los valores atípicos, que son los que se extienden más allá de los valores máximo o mínimo (Frigge *et al.*, 1989). Para el cálculo del rango intercuartil, valores extremos y valores atípicos es importante primero identificar la mediana (estadístico que parte el grupo de datos en dos, es decir, deja la misma cantidad de valores de un lado que otro) y posteriormente calcular los cuartiles (Q1 y Q3). Las fórmulas empleadas son las siguientes:

$$\text{Rango intercuartil (RIC)} = Q3 - Q1 \quad [5]$$

$$\text{Valor mínimo} = Q1 - 1.5 \times \text{RIC} \quad [6]$$

$$\text{Valor máximo} = Q3 + 1.5 \times \text{RIC} \quad [7]$$

En un diagrama de caja o bigote se considera un valor atípico el que se encuentra 1.5 veces del rango intercuartil o hasta 3 veces (valor máximo).

Los valores de la temperatura (Figura 5a) muestran un comportamiento simétrico con una mediana de 22.7 °C, el 50 % de los datos medidos están entre 47.8 y 19.4 °C, pero algunos sitios mostraron temperaturas máximas de hasta 48.6 °C; y los valores atípicos para la zona de estudio están por arriba de 98 °C y se localizan en la zona de la cañada donde se encontraba el material arbóreo en combustión (Figura 4: sitios 22 y 24; Figura 3d y 3e), y en la zona acordonada por Protección Civil Estatal de Michoacán (sitios 12 y 17; Figura 3b y 3c).

En el caso de los diagramas de caja de CO₂, se eliminaron los datos de los sitios 4, 12 y 17, cuyo flujo y concentración estaban por arriba del rango de medición con certeza analítica. Para la distribución de CO₂, la muestra presenta un valor de la mediana de 556 ppm, la mayoría de los datos está entre 423 y 895 ppm (50 %), pero hay algunos sitios que presentan valores máximos como 1495 ppm; se identifican 3 valores atípicos por arriba de 1574 ppm (sitios 5, 11 y 22; Figura 5b). Con respecto al valor de la mediana (Figura 5b), se puede observar que el comportamiento de las concentraciones de CO₂ es asimétrica positiva (es decir, la distancia entre el Q3 a la mediana es más larga) y los datos de la muestra tienden a tener valores arriba de la mediana.

La distribución de los datos de concentración de CH₄ (Figura 5c), H₂S (Figura 5e) y NH₃ (Figura 5f), también es asimétrica positiva, es decir, el 25 % de los datos se encuentra por arriba de la mediana, siendo los valores para el sitio 12 atípicos.

Para el caso del O₂, solo hubo un sitio que presentó el 20 % de este gas, en los demás no se detectó. Para el CO, los valores medidos van desde 1099 ppm (sitio 12), 70 ppm (sitio 4), 61 ppm (sitio 18), 35 (sitio 22) y de ahí varía la concentración de 11 a 1 ppm en 7 sitios.

Tamaño de partícula y composición química del suelo

Además de la presencia de CO₂ como producto final de la quema de la biomasa, también hay elementos minerales contenidos en la ceniza. Las partículas están constituidas en su mayoría por Si, Fe, Al y Ca, seguidas por bajos porcentajes de Ti y K en su mayoría. Indicando su proveniencia de la erosión de rocas del volcán, siendo el 60 % de la muestra constituido por carbón y hollín.

El análisis de tamaño de partícula muestra una granulometría muy fina (Figura 6). La distribución de los datos es binomial y en general es asimétrica negativamente. La mayoría de los resultados se concentran en valores de 70.28 μm (<90%) y de 54.72 μm (<75%), siendo las partículas más finas menores de 20 μm, estas últimas compuestas por cenizas orgánicas derivadas de la combustión de material orgánico.

Tabla 2. Composición química del suelo colectado en la zona de riesgo. Los análisis químicos fueron realizados por Fluorescencia de rayos X.

Elemento u óxido químico	Composición porcentual (% en peso)
SiO ₂	20.3
Fe ₂ O ₃	6.94
Al ₂ O ₃	5.98
CaO	4.72
TiO ₂	0.903
K ₂ O	0.741
P ₂ O ₅	0.611
MnO	0.247
MgO	0.214
SrO	0.179
SO ₃	0.126
BaO	0.116
C	58.0
	Composición (ppm)
Cl	318
ZnO	200
Cr ₂ O ₃	113
Rb ₂ O	109
As ₂ O ₃	76.7
CuO	68.5
Suma*	100 %

*Considerando el cambio de unidades de concentración de los elementos traza en % en peso.

Aunque también se distinguen partículas de entre 80 y 100 μm , representativas de micropartículas de brazas de carbón.

Simulación del impacto de falla en el ducto de tubería de gas

Se evaluó el riesgo del impacto en caso de falla en el ducto de la tubería de gas de 24 pulgadas que se encuentra aproximadamente a una distancia de 28 m de la zona de mayor temperatura ($> 48.6\text{ }^\circ\text{C}$, que es la temperatura anómala; ver Figura 4). La modelación se realizó empleando el programa ALOHA, el cual estima las zonas de amenazas asociadas con las emisiones de sustancias químicas peligrosas, nubes de gases tóxicos, incendios y explosiones. El objetivo de aplicar la simulación es evaluar el impacto de un incidente químico que involucre la ruptura del ducto, explosión por la combustión latente y la consecuente liberación del CH_4 (gas flammable) proveniente de la pipa de gas. Los datos de entrada para la modelación son variables atmosféricas

promedio para la fecha de medición: velocidad del viento (0.62 m/s), temperatura del aire ($20\text{ }^\circ\text{C}$) y humedad relativa (35 %) (datos tomados del INEGI). El resultado obtenido se presenta en la Figura 7.

DISCUSIÓN

Comportamiento del CO_2

A través de diagramas de barra (Figura 8), se comparó el valor de la mediana de flujos ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) y de concentraciones (ppm) de CO_2 para la zona de estudio (se eliminaron los resultados que estaban fuera del rango de medición reportado por el proveedor), con valores de flujos y concentraciones de gases obtenidos de experimentos de laboratorio controlados de incendios de turbera (Hu *et al.*, 2019) y de valores reportados (Rein *et al.*, 2009).

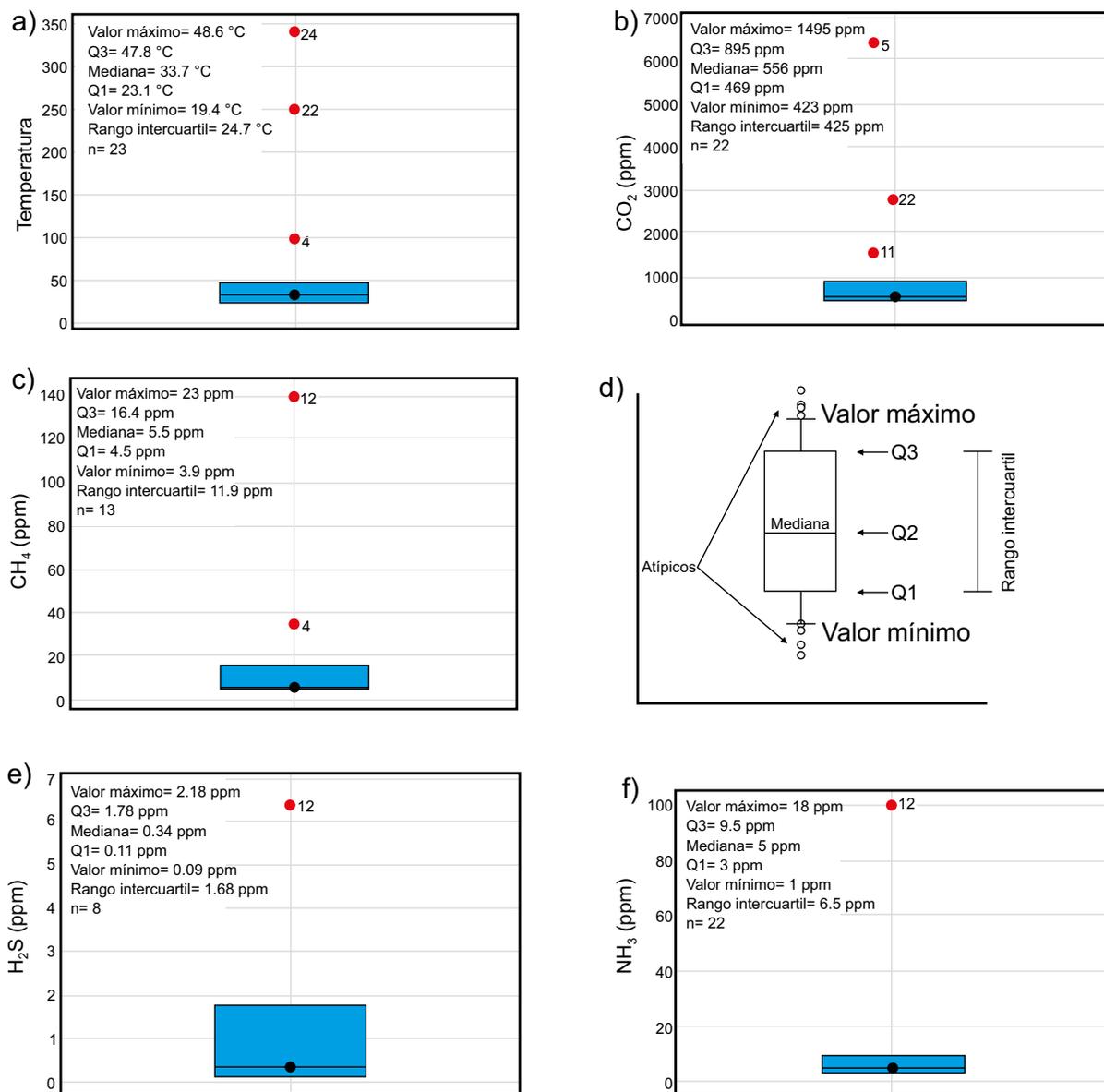


Figura 5. Diagramas de caja de la concentración de: a) Temperatura, b) CO_2 (ppm), c) CH_4 (ppm), e) H_2S (ppm) y f) NH_3 (ppm). Los símbolos en rojo indican los valores atípicos. Estos diagramas de caja se realizaron eliminando los datos extremos (fuera de rango del equipo de medición). El área azul indica el rango intercuartil. El círculo gris indica la mediana. La figura d) indica los elementos contenidos en un diagrama de caja.

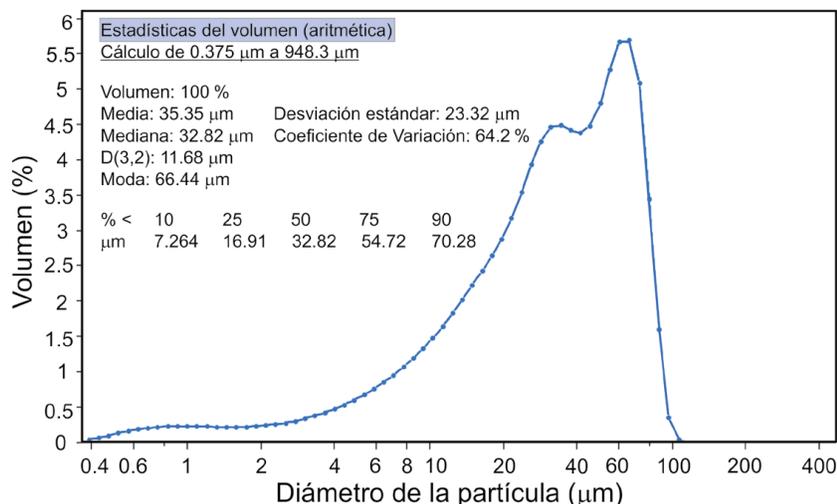


Figura 6. Gráfico de distribución de tamaño de partícula.

La importancia de la determinación de gases como producto de las reacciones químicas que se llevan a cabo en un proceso de combustión latente residual, es por el impacto que tienen estos fenómenos como gases de efecto invernadero y, por tanto, su papel que juega en el calentamiento terrestre. En nuestro país, el principal gas de efecto de invernadero es el CO₂ y aporta con el 67 % (INEGYCEI, 2020). Los resultados muestran que los flujos de CO₂ y CH₄ (Figura 8a) que se producen en la zona del volcán Quinceo están más de 1000 y 100 veces, respectivamente, por debajo de lo que se ha reportado tanto en experimentos controlados (Hu *et al.*, 2019), así como en zonas de medición en turberas (Rein *et al.*, 2009). Calculando las emisiones de CO₂ para un área de 345 m² y quitando los valores extremos (sitios 4, 12 y 17) para dar un estimado conservador, se tiene por ejemplo que la desgasificación que produce el volcán El Chichón (210 t·d⁻¹; Mazot y Tarán, 2009) es 320 veces más que el CO₂ que emite la combustión latente residual ocurrida en el volcán Quinceo (0.64 t·d⁻¹). Valores reportados de emisiones de CO₂ a la atmósfera producidos por la quema de vegetación en zonas de uso agrícola es de 112 Tg de CO₂ en 12 años (Bautista Vicente, 2015), lo que equivale a 25,571 t de CO₂·d⁻¹. Por tanto, debido a que el flujo de CO₂ y la emisión estimada por el proceso de combustión latente residual en el volcán Quinceo se considera que el aporte de CO₂ al ambiente es bajo.

Por otro lado, la concentración de CO₂ en el volcán el Quinceo, es 1.6 veces más que lo reportado para aire seco (Carpenter *et al.*, 2016) y como resultado de la oxidación de ceniza (350 ± 50 ppm; Hu *et al.*, 2019). La explicación a este comportamiento se debe a la influencia de la temperatura sobre la densidad molecular. El sensor de gas arroja una señal proporcional a la densidad molecular (moles·volumen⁻¹ de gas o mg·m⁻³). A medida que cambia la temperatura, la densidad molecular del gas cambia conforme a la ley de gas ideal:

$$PV = nRT \quad [8]$$

Donde:

- P = presión,
- V = volumen (L),
- n = número de moles del gas (mol),
- R = constante del gas ideal (0.082·L·atm·K⁻¹·mol⁻¹),
- T = temperatura (K).

El cambio de la temperatura afecta la densidad molecular y el resultado se expresa en la lectura de la concentración (ppm) del sensor.

A presión constante, cuando se incrementa la temperatura, con el sensor de infrarrojo detecta menor cantidad de moléculas de CO₂ y por eso es posible que la correlación de la temperatura con este gas sea débil. De ahí que no exista correlación entre la temperatura y el flujo (r = 0.1) y una correlación débil con la concentración de CO₂ (r = 0.3).

Comportamiento del CH₄

Al igual que para el CO₂, la mediana de la muestra de CH₄ se representaron en diagramas de barra (Figura 8), donde se comparó los flujos (g·m⁻²·d⁻¹) y las concentraciones (ppm) medidas *in situ* (se eliminaron los resultados que estaban fuera del rango de medición reportado por West Systems, 2019) con valores de flujos y concentraciones de gases obtenidos en laboratorio bajo condiciones controladas de incendios de turbera (Hu *et al.*, 2019) y de valores reportados (Rein *et al.*, 2009).

El metano también es un gas de efecto de invernadero, es el segundo gas causante del efecto de invernadero (24 %) (INEGYCEI, 2020). Los flujos de metano reportados en la literatura (Figura 8; Hu *et al.*, 2019; Rein *et al.*, 2009), son aproximadamente 700 veces el flujo

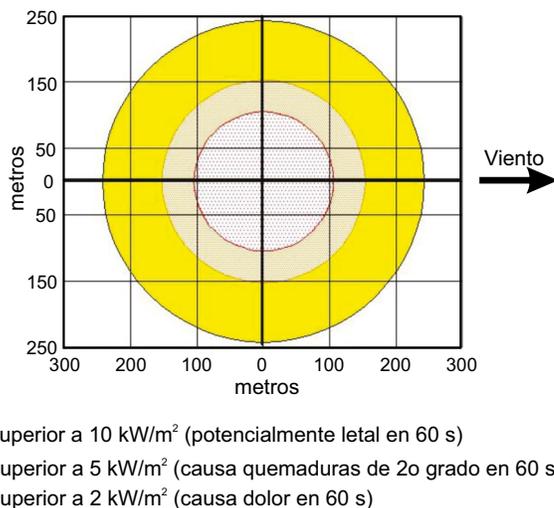


Figura 7. Resultados de la simulación del impacto de falla del ducto de la tubería de gas natural, obtenida empleando el programa ALOHA.

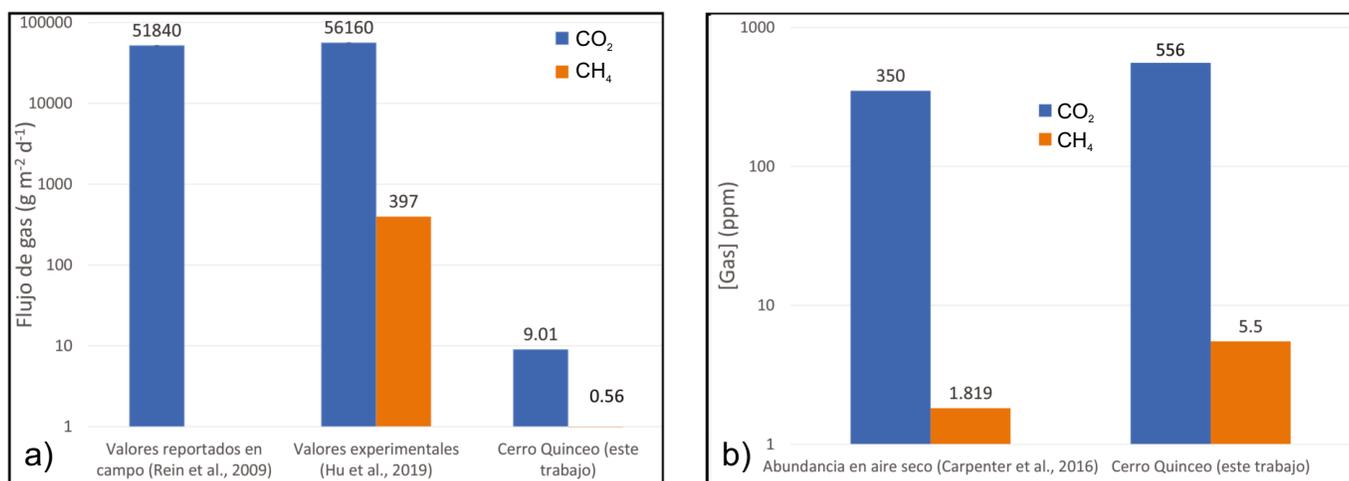


Figura 8. Gráfico de barras de valores logarítmicos de a) flujos ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) y b) concentraciones (ppm) de CO_2 y CH_4 reportados en la literatura, los cuales se comparan con los valores obtenidos en este trabajo (mediana). La mediana obtenida de los resultados de este trabajo (valor que se encuentra en la parte superior de la barra), se obtuvo eliminando los datos extremos (fuera de rango del equipo de medición).

medido en el volcán Quinceo (Figura 8a). Aún, los valores de flujo de CH_4 para la zona de Quinceo son bajos comparados con los que se han medido en rellenos sanitarios (entre 8 y 51 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; Villanueva-Estrada *et al.*, 2019). Considerando el área perturbada (345 m^2) en el volcán Quinceo, la CLR emite $0.04 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ en el volcán Quinceo, los cuales comparados con las emisiones de CH_4 provenientes de incendios forestales, representan menos del 0.001 % (valor reportado $5479 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$; Bautista Vicente, 2015). Contrariamente a los flujos, las concentraciones de metano en el volcán Quinceo se incrementan tres veces en las concentraciones reportadas para este gas en la tropósfera (Figura 8b; Carpenter *et al.*, 2016) localizándose las anomalías principalmente en la parte oeste de la zona de estudio. Es posible que este comportamiento que se observó con el CO_2 , donde los valores de flujo para el volcán Quinceo eran menores a los reportados, y las concentraciones de metano son mayores a las reportadas, sean producto de este efecto de la temperatura sobre la densidad molecular (Levine, 2002). Por otro lado, la temperatura tiene una correlación moderada ($r=0.4$) con el flujo de metano y fuerte ($r=0.6$) con la concentración del metano (Tabla 3). El comportamiento observado evidencia que las reacciones de pirólisis y oxidación sólida son reacciones exotérmicas, donde hay una liberación de calor por el calentamiento de la materia orgánica y se evidencia por la emisión de calor. El metano alcanza su máxima concentración durante la etapa de ignición, y es emitido durante la reacción de pirólisis (Hu *et al.*, 2019).

Otros gases (H_2S , NH_3 , CO y O_2)

Hay otros gases que se reportan en trabajos relacionados a la combustión (Hu *et al.*, 2019; Rein, 2009; Rein *et al.*, 2009; Wooster *et al.*, 2011), entre ellos se presentan en orden de abundancia en el presente trabajo: $\text{CO} > \text{NH}_3 > \text{H}_2\text{S}$. No todos los gases muestran una evolución similar al CO_2 porque se forman en distintas etapas de las reacciones en una combustión (Hu *et al.*, 2019). El CO se presenta en 44 % de los sitios que se midieron en el volcán Quinceo con un rango de concentraciones de 1099 a 1 ppm. El NH_3 se presenta en el 88 % de los sitios, y el rango de concentraciones es de 100 a 1 ppm. Mientras que para el H_2S se presenta en 32 % de los sitios con concentraciones de 6.38 a 0.09 ppm.

El CO es un gas incoloro, inodoro y tóxico para el ser humano. Proviene de la combustión incompleta como el carbón y gas natural (Bolaños Morera y Chacón Araya, 2017). En un proceso de combustión

natural, el CO junto con el CO_2 , es producto de la oxidación de la carbonización. Las concentraciones reportadas en la literatura son de $90 \pm 10 \text{ ppm}$ (Hu *et al.*, 2019) y se ha identificado en la etapa de la combustión latente en la sabana (Wooster *et al.*, 2011). Valores cercanos a los reportados por Hu *et al.* (2019) se presentan en los sitios 18 (61 ppm) y sitio 4 (70 ppm), a excepción del sitio 12 que detectó una concentración anómala de CO de 1,099 ppm. En 8 sitios se reportan concentraciones de 35 a 1 ppm de CO . El CO , junto con el NH_3 y el CO_2 reportan concentraciones anómalas en el sitio 12. Se ha reportado un comportamiento del CO muy similar al del NH_3 , y junto con el CH_4 se han reportado emisiones altas durante la combustión latente residual a comparación de las etapas con flama (Wooster *et al.*, 2011). El CO y el CO_2 se presentan principalmente en la reacción de oxidación y producen una capa fina de ceniza. El CO_2 se forma cuando el suministro de oxígeno es constante, es decir en la zona superficial del suelo; mientras que el CO se forma cuando el suministro de oxígeno es menor, es decir en las zonas profundas de las capas del suelo (Rein *et al.*, 2009).

El H_2S es un gas con un olor característico a huevo podrido, cuya percepción al ser humano es detectable cuando está en concentraciones del orden de 0.008 a 0.2 ppm (Amoore y Huatala, 1983; Beauchamp *et al.*, 1984). En el volcán Quinceo las concentraciones están por debajo de la percepción del olfato, excepto para los sitios 4 (2.18 ppm), 5 (0.55 ppm), 12 (6.38 ppm) y en el sitio 17 (0.6 ppm). Estos sitios son los que presentan anomalías de temperatura y otros gases como el CO_2 , CH_4 , CO y NH_3 , especialmente en el punto 12 donde también se detectó O_2 .

El oxígeno juega un papel muy importante en el proceso de combustión, porque no es un gas producto de la CLR pero se encuentra en un 21 % en el aire y es el que puede causar que el metano se inflame. El sitio 12 es el único que reporta una concentración de O_2 de 20 % y es precisamente este sitio el que detectó concentraciones de metano más altas en la zona (140 ppm), valor que está muy superior a lo que se reporta para el aire (Carpenter *et al.*, 2016).

Efectos de la combustión sobre el suelo

Se ha reportado que hay poca que hay poca variación del tamaño de partícula pero que las concentraciones varían sustancialmente, encontrándose la siguiente distribución de partículas: modo nucleación ($<0.1 \mu\text{m}$), modo acumulación (0.1 a $2.0 \mu\text{m}$) y modo grueso ($>2 \mu\text{m}$)

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson (r) obtenido a partir de la relación de la variable dependiente (Temperatura) y la variable independiente. El cálculo se hizo eliminando los datos extremos (fuera de rango del equipo de medición), por tanto, se presenta el número de mediciones. La conclusión de la dependencia lineal entre estas variables cuantitativas se basó en el criterio presentado por Hernández-Lalinde *et al.* (2018).

Variable independiente (gas)	Coeficiente de correlación de Pearson (r)	n	Valores atípicos descartados	Conclusión ¹
CO ₂ (g·m ⁻² ·d ⁻¹)	0.1	22	12 y 17 (sitio 14 no detectó flujo de CO ₂).	Correlación nula entre las variables.
H ₂ S (g·m ⁻² ·d ⁻¹)	0.9	10	Ninguno.	Correlación fuerte entre las variables.
CH ₄ (g·m ⁻² ·d ⁻¹)	0.4	9	Ninguno.	Correlación moderada entre las variables.
CO ₂ (ppm)	0.3	20	4, 12 y 17.	Correlación débil entre las variables.
H ₂ S (ppm)	0.1	7	12.	Correlación nula entre las variables.
CH ₄ (ppm)	0.6	11	4, 12.	Correlación fuerte entre las variables.

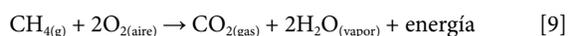
¹Los criterios de la correlación de Pearson se basaron en el trabajo de Hernández-Lalinde *et al.* (2018).

(Hu *et al.*, 2019; Restuccia *et al.*, 2019). En la zona del Volcán Quinceo se muestra un modo de distribución de partículas grueso asociado a la erosión de partículas provenientes de un drenaje intermitente proveniente de la cima del volcán.

Existe investigación en suelos que han sido propensos a presentar fuego de turba, donde disminuye el contenido de carbono total, nitrógeno y fósforo orgánico, y aumenta el contenido de fósforo inorgánico y calcio total (Smith *et al.*, 2001). En la química de la muestra de suelo que se colectó en el volcán Quinceo se reporta concentraciones de calcio del orden de 4.7 % y concentraciones de fósforo (P₂O₅) del 0.6 ppm.

Consecuencias de la combustión latente residual

El gas natural es una fuente de energía de origen fósil y contiene 95 % de metano y el resto son una mezcla de hidrocarburos simples; tiene un gran poder calorífico (11.98 kWh). Es una de las energías primarias más ampliamente usadas como combustible doméstico o industrial. El límite inferior de explosividad (LIE) del metano es 5 %, esto quiere decir que una mezcla para que sea inflamable es suficiente con 5 % de metano como mínimo. Adicional al porcentaje de metano y a la presencia de oxígeno para que el metano adquiere mayor posibilidad de inflamabilidad, la temperatura juega un papel muy importante para que se lleve a cabo la siguiente reacción:



La reacción de combustión del metano en presencia de dos moles de oxígeno produce un mol de CO₂, dos moles de agua y liberación de energía (reacción exotérmica). Sin embargo, el metano en un ambiente oxidante, no arderá espontáneamente, requiere una fuente de ignición para hacer que la temperatura aumente y comience la reacción. Cuanto más alta sea la temperatura de ambos gases (o la temperatura ambiente), menor será la energía de ignición y la reacción de combustión sucederá más rápido. A esta energía de ignición se le conoce como energía de activación (E_a). El límite superior de explosividad del metano es de 15 % (LSE) (Suzuki, 1994). Una mezcla de gases que contiene 15 % de metano no es inflamable si la temperatura está a 20 °C; pero si la mezcla se ha calentado, la mezcla se convertirá en inflamable en cualquier momento. Por esta razón es importante medir el LIE cuando ocurren estos fenómenos naturales para evaluar el riesgo de una explosión, de acuerdo con la reacción 9.

En el caso de las mediciones del volcán Quinceo, el 48 % de los sitios no detectaron concentraciones de metano, el 64 % de los sitios no determinaron un flujo de metano y el 4 % de los sitios medidos presentaron una alerta en el LIE (Tabla 1). Por el contrario, en 36 % de los sitios se detectaron concentraciones de metano entre 0.09 a 3.55 ppm,

con dos sitios anómalos; 3 (35 ppm) y 12 (140 ppm) (Figura 5c). Es también en el sitio 12 donde se presenta un valor de LIE entre 7 a 10 %, además que se registra una alta temperatura (260 °C) (Tabla 1). Por tanto, el riesgo de una explosión es latente porque confluye la presencia de CH₄, valores superiores al LIE de este gas y temperaturas altas, principalmente en el sitio 12 y alrededores (Figura 1). El riesgo reside en que es una zona transitada y con una simple chispa muy cerca del sitio focalizado, puede comenzar la oxidación del pirolisato donde hay evidencia de flama.

Para evaluar el riesgo de una explosión en la zona por la falla en el ducto de la tubería de gas natural que se encuentra aproximadamente a una distancia de 28 m de la zona de mayor temperatura, se realizó la simulación con el programa ALOHA. Los resultados mostraron que, en caso de una explosión, esta puede causar consecuencias potencialmente letales a la población que se encuentre a 100 m del sitio, a 150 m puede causar quemaduras de segundo grado y el impacto puede llegar hasta 250 m causando daños menores a la población (Figura 8).

Peligros asociados a este fenómeno

Cabe resaltar que un fenómeno similar en el mismo sitio ocurrió en el año 2016, y a la fecha se ha observado un crecimiento urbano acelerado en 7 años, dado que se están poblando laderas a mayor altitud. Este fenómeno puede ser imperceptible a la población porque no genera flama, y eso puede causar un riesgo a los transeúntes al tener contacto directo con la zona que presenta temperaturas superiores a los 60 °C.

Al no proteger la cobertura vegetal y cambiar el uso de suelo se incrementaría la erosión hacia zonas más bajas. Estas laderas desprovistas de vegetación son más susceptibles a presentar erosión. En un escenario de lluvias torrenciales, generaría procesos hídricos puntuales acumulando sedimentos, que a su vez pueden cubrir materiales en combustión, causando daños a la población. Condiciones similares han sido documentadas por Roy *et al.* (2021); estos autores llegan a la conclusión de que la reducción de cobertura de suelo agrícola y forestal en las últimas 4 décadas han producido escasez de agua, así como las actividades antropogénicas relacionadas a la agricultura de la cuenca El Potosí (México) son los factores antropogénicos causantes de fuego subterráneo de la combustión de turba.

Es importante mencionar que los resultados de este estudio descartan cualquier actividad volcánica ya que no se presentó sismicidad en la zona ni emisiones altas de gases que indicaran actividad volcánica, sino más bien está relacionado por el incendio forestal ocurrido en el mes de abril. Otra característica que descarta una reactivación de la actividad volcánica en el sitio es la ausencia de emisiones de H₂S de fuentes geotérmicas en superficie (p. ej., manantiales, fumarolas, pozos de lodo), de sismicidad o ausencia de un abombamiento del volcán.

RECOMENDACIONES

Desde un punto de vista científico, es importante hacer monitoreo continuo de los gases difusos en la zona de estudio considerando la temporalidad e integrando más información química (p. ej., tipo de suelo, contenido de humedad, materia orgánica, etc.) para recabar más información respecto a las condiciones ambientales que favorecieron este fenómeno y así tener herramientas para predecir la ocurrencia de otro fenómeno similar, ya sea en el mismo sitio o en sitios parecidos. Otro aspecto importante, es integrar estudios edafológicos (contenido mineral, ceniza, carbón) para poder identificar las características del suelo que pudieran originar un fenómeno como el ocurrido en el volcán el Quinceo.

En caso de presentarse estos fenómenos es recomendable hacer mediciones de temperatura del suelo y un monitoreo de gases, principalmente del contenido de CO₂, CH₄, CO y O₂, dado que son estudios *in situ*, no se requiere de la colecta de muestra para ser analizada en un laboratorio y los resultados obtenidos son inmediatos y útiles en la toma de decisiones de las autoridades responsables y así evitar riesgo a la población. Dado que Morelia se encuentra en la zona de volcanes monogenéticos más grande del mundo, es importante que las autoridades definan junto con los científicos la posibilidad de aparición de volcanes, que se diferenciaron primeramente de la CLR por la ocurrencia de sismos y también por la presencia de gases a través de fumarolas o manantiales gasohidrotermales, donde predominan el CO₂ y H₂S, a diferencia de los gases que provienen de la CLR que son principalmente CO₂ y CH₄. Es importante dar a conocer a la población la ocurrencia de estos tipo de fenómenos y su diferencia con la actividad volcánica para evitar una mala interpretación del fenómeno y también para que la población tome precauciones al respecto.

El fenómeno de la combustión latente residual presentado en el volcán Quinceo es consecuencia de un mal manejo territorial y ambiental. Por lo que sería recomendable enfocar estos estudios desde un punto de vista de sustentabilidad social donde las acciones implementadas apuntalen hacia el equilibrio del crecimiento urbano, económico y de equidad social, y considerando un cuidado del medio ambiente. Es importante que también se trabaje con la población para compartir con ellos la forma de cuidar su entorno con la idea que los recursos naturales no pueden ser usados sin una cierta racionalidad.

CONCLUSIONES

Las anomalías de temperatura del suelo, así como las concentraciones y los flujos medidos de los gases difusos *in situ*, sugieren que en la zona estudiada se produjo una combustión latente residual, la cual se favoreció por el tipo de suelo, los fenómenos naturales y sociales que han cambiado el uso de suelo (p. ej., crecimiento de la zona urbana, deforestación) y el reciente incendio en la zona aledaña.

Los resultados mostraron que el impacto de una explosión debida a la presencia del gasoducto cercano a la zona de mayor temperatura y gases alcanzaría a dañar hasta 250 m, por lo que es importante que las dependencias gubernamentales de Morelia implementen medidas para disminuir el riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo para el trabajo de campo al Biól. Gabriel González Chávez y al personal de Protección Civil: Anastasio Mascote Alcaraz y Miguel Ángel Padilla Rayo. También se agradece el apoyo de

la Q.F.B. Nora Elia Ceniceros Bombela por la preparación de material para la salida de campo y de Remedios Cisneros por el análisis de laboratorio en el Instituto de Metalurgia y Materiales.

REFERENCIAS

- Amoore, J.E., Hautala, E., 1983, Odor as an aid to chemical safety: odor thresholds compared with threshold limit values and volatilities for 214 industrial chemicals in air and water dilution: *Journal of Applied Toxicology*, 3, 272-290, DOI: 10.1002/jat.2550030603
- Asbjornsen, H., Velázquez-Rosas, N., García-Soriano, R., Gallardo-Hernández, C., 2005, Deep ground fires cause massive above- and below-ground biomass losses in tropical montane cloud forests in Oaxaca, Mexico: *Journal of Tropical Ecology*, 21, 427-434 DOI:10.1017/S0266467405002373
- Avellan D.R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J.L., Gomez-Vascocelos M.G., Layer W.P, Sosa-Ceballos, G., Robles-Camacho J., 2020, Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia – Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 100: 102554, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102554>
- Bautista Vicente, F.S., 2015, Emisiones totales anuales de CO₂ por incendios forestales en el periodo 1999-2010 en México y estimación de índice de riesgo: CIUDAD, ESTADO, PAÍS, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., Tesis de doctorado, 131 pp.
- Beauchamp, R.O.J., Bus, J.S., Popp, J.A., Boreiko, C.J., Andjelkovich, D.A., 1984, A critical review of the literature on hydrogen sulfide toxicity: *Critical Reviews in Toxicology*, 13, 25-97. DOI: <https://doi.org/10.3109/10408448409029321>
- Bertschi, I., Yokelson, R.J., Ward, D.E., Babbitt, R.E., Susott, R.A., Goode, J.G., Hao, W.M., 2003, Trace gas and particle emissions from fires in large diameter and belowground biomass fuels: *Journal of Geophysical Research*, 108 (D13), 8472, DOI:10.1029/2002JD002100
- Bolaños Morera, P., Chacón Araya, C., 2017, Intoxicación por monóxido de carbono: *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), ISSN 1409-0015.
- Bolós, X., Del Ángel, V., Villanueva-Estrada, R.E., Sosa-Ceballos, G., Boijseauneau-Lopez, M., Méndez V., Macías, J.L., 2022, Surface hydrothermal activity controlled by the active structural system in the self-sealing geothermal field of Acoculco (Mexico): *Geothermics*, 101, 102372, DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102372
- Carpenter, M.B., Keane, C.M., Cantner, K., 2016, *The Geoscience Handbook: Alexandria, Washington, USA, American Geosciences Institute*, 480 pp.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., Marini, L., 1998, Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas: *Applied Geochemistry*, 13, 543-552, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(97\)00076-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(97)00076-0)
- Connor B.Ch., 1987, Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, 33(1-3), 191-200, DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90061-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90061-8)
- Drysdale, D., 2011, *An Introduction to Fire Dynamics: Scotland, UK, University of Edinburgh*, 3rd Edition, 576 pp., DOI:10.1002/9781119975465
- Flores, J., Flores, R., 2018, La Enseñanza del Diagrama de Caja y Bigotes para Mejorar su Interpretación: *Revista Bases de la Ciencia*, 3(1), 69-75, DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v3i1.1107
- Frigge, M., Hoaglin, D.C., Iglewicz, B., 1989, Some implementations of the boxplot: *The American Statistician*, 43(1), 50-54, DOI: <https://doi.org/10.2307/2685173>
- González-Pérez, J.A., González-Vázquez, R., De la Rosa J.M., González-Villa, E.J., 2011, El Fuego y la Materia Orgánica del Suelo: España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2(3), <http://digital.csic.es/bitstream/10261/49248/1/El%20fuego%20y%20la%20materia%20org%C3%A1nica%20del%20suelo.pdf>. Consulta 24 de agosto de 2022.
- Hadden, R.M., Rein, G., Belcher, C.M., 2013, Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smouldering combustion in peat: *Proceedings of the Combustion Institute*, 34, 2547-2553, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2012.05.060>
- Han, X., Xu, H., Wang, T. Yin, S., Gao, B., Wang, Y., Shan, Y., 2022, The effects of humus moisture content on underground fires in a *Larix gmelinii*

- plantation: *Journal of Forestry Research*, 33, 865-873, DOI: <https://doi.org/10.1007>
- Hartford, R.A., Frandsen, W.H., 1992, When it's hot, it's hot... or maybe it's not! (Surface flaming may not portend extensive soil heating): *International Journal Wildland Fire*, 2(3), 139-144, DOI: <https://doi.org/10.1071/WF9920139>
- Hernández-Lalinde, J.D., Espinosa-Castro, J.F., Peñalosa-Tarazona, M.E., Díaz-Camargo, E., Bautista-Sandoval, M., Riaño-Garzón, M.E., Chacón Lizarazo, O.M., Chaparro-Suárez, Y.K., García Álvarez, D., Bermúdez-Pirela, V., 2018, Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: verificación de supuestos mediante un ejemplo aplicado a las ciencias de la salud: *Sociedad Venezolana de Farmacología Clínica y Terapéutica*, 3 (5), 552-561.
- Hu, Y., Christensen E., Restuccia, F., Rein, G., 2019. Transient gas and particle emissions from smouldering combustion of peat: *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 4035-4042, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.008>
- Huang, X., Rein, G., 2014, Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics: *Combustion and Flame*, 161, 1633-1644, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.013>
- Huang, X., Rein, G., Chen, H., 2015, Computational smoldering combustion: Predicting the roles of moisture and inert contents in peat wildfires. *Proceeding of the Combustion Institute*, 35: 2673-2681, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.048>
- Huang, X., Restuccia, F., Gramola, M., Rein, G., 2016, Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires: *Combustion and Flame*, 168, 393-402, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.01.017>
- IMPLAN (Instituto Municipal de Planeación), S/F, Estudio Técnico Justificativo del polígono denominado "Cerro Quinceo" como propuesta para su declaratoria como Área Natural Protegida: Morelia, Michoacán, IMPLAN, 108 pp. https://implanmorelia.org/site/wp-content/uploads/2021/08/CERRO_QUINCEO_CARACTERIZACION_Y_DIAGNOSTICO.pdf
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2017, Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo: México, INEGI, 723 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), S/F, Conjunto de datos vectoriales de Información Topográfica, Escala 1:250 000. Serie V. Michoacán de Ocampo. 37 pp.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2020, Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) 1990-2019: México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 1 p.
- Jácume Paz, M.P., Delgado Granados, H., 2022, Uso del flujómetro de WEST System y elaboración de mapas con Wingslib: Ciudad de México, México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Infraestructura Científica y Desarrollo Tecnológico, 36 pp.
- Jácume Paz, M.P., González-Romo, I.A., Prol-Ledesma, R.M., Pérez-Zárate, D., Rodríguez, A., Estrada-Murillo, A., 2020a, Multivariate analysis temporal variations of diffuse degassing and correlation with main faults in Agua Caliente-Tzitzio, Michoacán, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 394, 106808, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106808>
- Jácume 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, 106558, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106558>
- Jácume Paz, M.P., Taran, Y., Inguaggiato, S., Collard, N., 2016, CO₂ flux and chemistry of El Chichón crater lake (Mexico) in the period 2013-2015: Evidence for the enhanced volcano activity. *Geophysical Research Letters*, 43, 127-134, DOI: <https://doi.org/10.1002/2015GL066354>
- Kolker, A., Engle, M., Stracher, G., Hower, J., Prakash, A., Radke, L., Schure, A.T., Heffern, E., 2009, Emissions from Coal Fires and Their Impact on the Environment: United States Geological Survey, Fact Sheet 2009-3084, 4 pp., <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3084/>
- Levine, 2002. *Physical Chemistry*. 5th edition. Mc-Graw-Hill. USA, New York, 890 pp.
- Mazot, A., Tarán, Y., 2009, CO₂ flux from volcanic lake of El Chichón (Mexico): *Geofísica Internacional*, 48(1), 73-83.
- Menella, L., Garduño-Monroy, V.H., Ginger-Robles, Liotta, D., Brogi, A., 2022, Definition of the stress-deformation field and sismotectonics of the Morelia-Acambay fault system, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39(1), DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2022.1.1688>
- Page, S.E., Siegert, F., Rieley, J.O., Boehm, H-DV, Jaya, A., Limin, S., 2002, The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997: *Nature*, 420, 61-65, DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01131>
- Peiffer, L., Carrasco-Núñez, G., Mazot, A., Villanueva-Estrada, R.E., Inguaggiato, C., Bernard Romero, R., Rocha Miller, R., Hernández Rojas, J., 2018, Soil degassing at the Los Humeros Geothermal field: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 356(163-174), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.001>
- Pérez-Martínez, I., Villanueva-Estrada, R.E., Rodríguez-Díaz, A., Canet, C., García, R., Ramos-Leal, J.A., García, D., Froylan Cambrón, J., 2021, Diffuse gases in soil of Araró-Simiraio geothermal system, Michoacán, Mexico: *Andean Geology*, 48(3), 496-513, DOI: <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV48n3-3327>
- Rein, G., 2009, Smouldering combustion Phenomena in Science and Technology: *International Review in Chemical Engineering*, 1, 3-18.
- Rein, G., 2013, Smouldering fires and natural fuels, *en* Belcher, C., (Ed.), *Fire Phenomena and The Earth System*: Wiley and Sons. 15-33 pp., <https://doi.org/10.1002/9781118529539.ch2>
- Rein, G., 2016, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*: Springer, 581-603, https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_19
- Rein, G., Cleaver, N., Ashton, C., Pironi, P., Torero, J.L., 2008a, The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil: *Catena*, 74, 304-309, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.05.008>
- Rein, G., Garcia, J., Simeoni, A., Tihay, V., Ferrat, L., 2008b, Smouldering natural fires: comparison of burning dynamics in boreal peat and Mediterranean humus. *Moldering, Monitoring and Management of Forest Fire: Transactions on Ecology and the Environment*, 119, 183-192, DOI: 10.2495/FIVA080191
- Rein, G., Cohen, S., Simeoni, A., 2009, Carbon emission from smouldering peat in shallow and strong fronts. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, 2489-2496.
- Restuccia, F., Fernandez-Anez, N., Rein, G., 2019, Experimental measurement of particle size effects on the self-heating ignition of biomass piles: Homogeneous samples of dust and pellets: *Fuel*, 256, 115838, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115838>
- Roy, P.D., Logesh, N., Lakshumanan, C., Sánchez-Zavala, J.L., 2021, Decadal-scale spatiotemporal changes in landuse/land cover of El Potosi Basin at semi-arid northeast Mexico and evolution of peat fire between 1980-2020 CE: *Journal of South American Earth Sciences*, 110, 103395, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103395>
- Roy, P.D., Rivero-Navarrete, A., Sánchez-Zavala, J.L., López-Balbiaux, N., 2014, Subsurface fire and subsidence at Valle del Potosí (Nuevo León, Mexico): Preliminary observations: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(3), 553-557.
- Smith, S.M., Newman, S., Garret, P.B., Leeds, J.A., 2001, Differential effects of surface and peat fire on soil constituents in a degraded wetland of the northern Florida Everglades: *Journal of Environmental Quality*, 30, 1998-2005, DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1998>
- Stockwell, C.E., Jayarathne, T., Cochrane, M.A., Ryan, K.C., Putra, E.I., Saharjo, B.H., Nurhayati, A.D., Albar, I., Blake, D.R., Simpson, I.J., Stone, E.A., Yokelson, R.J., 2016, Field measurements of trace gases and aerosols emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 11711-11732, DOI: 10.5194/acp-16-11711-2016
- Sun, Y., Zhang, Q., Li, K., Huo, Y., Zhang, Y. 2022, Trace gas emissions from laboratory combustion of leaves typically consumed in forest fires in Southwest China: *Science of the Total Environment*, 646, 157282, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157282>
- Suzuki, T., 1994, Empirical relationship between lower flammability limits

- and standard enthalpies of combustion of organic compounds: *Fire and Materials*, 18, 333-336, DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.810180509>
- Torero, J.L., Gerhard, J.I., Martins, M., Zaroni, M.A., Rashwan, T.L. Brown, J., 2020, Processes defining smouldering combustion: Integrated review and synthesis: *Progress in Energy and Combustion Science*, 81, 100869, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100869>
- Tukey, J.W., 1977, *Exploratory data analysis*: Reading, MA, USA, Addison-Wesley, 712 pp.
- Van der Werf, G.R., Dempewolf, J., Trigg, S.N., Randerson, J.T., Kasibhatla, P.S., Giglio, L., Murdiyarso, D., Peters, W., Morton, D.C., Collatz, G.J., Dolman, A.J., DeFries, R.S., 2008, Climate regulation of fire emissions and deforestation in equatorial Asia: *Biological Sciences*, 105(51), 20350-20355, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0803375105>
- Villanueva-Estrada, R.E., Rocha-Miller, R., Arvizu-Fernández, J.L., Castro González, A., 2019, Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City: *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31, 236-244, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.005>
- West Systems, 2019, *Portable diffuse fluxmeter. Handbook. Release 9.1*: Pisa, Italia, West Systems Srl, 104 pp.
- Wooster, M.J., Freeborn, P.H., Archibald, S., Oppenheimer, C., Roberts, G.J., Smith, T.E.L., Govender, N., Burton, M., Palumbo, I., 2011, Field determination of biomass burning emission ratios and factors via open-path FTIR spectroscopy and fire radiative power assessment: headfire, backfire and residual smouldering combustion in African savannahs: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11591-11615, DOI: [10.5194/acp-11-11591-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-11591-2011)

Manuscrito recibido: noviembre 16, 2022

Manuscrito corregido recibido: marzo 3, 2023

Manuscrito aceptado: marzo 6, 2023