

## MÉTODO PARA PRONOSTICAR LA LOCALIZACIÓN DE UN NUEVO VOLCÁN AL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Hugo Delgado-Granados<sup>1</sup> y Roberto E. Villalpando-Cortés<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Vulcanología, Instituto de Geofísica, UNAM, Circuito Exterior, C.U. Coyoacán 04510, México, D. F. <sup>2</sup>Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Depto. de Energía, UAM Azcapotzalco. E-mail: <sup>1</sup>hugo@geofisica.unam.mx

### RESUMEN

El pronóstico y predicción de erupciones o nacimiento de nuevos volcanes es una tarea difícil de abordar con precisión desde el punto de vista temporal y espacial. Existen estimaciones estadísticas del tiempo de retorno de erupción en grandes volcanes y campos volcánicos monogenéticos, pero la estimación del lugar donde podría nacer un nuevo volcán es un tema que no se ha abordado suficientemente por su complejidad. A diferencia de los grandes volcanes, donde se conoce la localización de su cráter, en los volcanes monogenéticos no se puede pronosticar el lugar donde se verificará la siguiente erupción. Los campos volcánicos monogenéticos son regiones cuyo condicionamiento geológico permite el nacimiento de nuevos volcanes, de acuerdo con una periodicidad propia de cada campo. Aunque los volcanes surgen en la intersección de fallas y fracturas que permiten el ascenso de los magmas, éstas están cubiertas por los productos eruptivos de volcanes previos. El período de retorno promedio para el surgimiento de un nuevo volcán en el Campo Volcánico Chichinautzin (CVC), al sur de la Ciudad de México, es <1700 años. La última erupción en el CVC ocurrió hace ~1700-2000 años, según los estudios reportados hasta ahora. Esto hace que la región al sur de la Ciudad de México sea propensa a registrar un evento eruptivo en el futuro cercano y la probabilidad de que ocurra éste crecerá con el tiempo. Por ello es necesario explorar formas de identificar las zonas más propensas para alojar la próxima erupción en la región, ya que esto permitiría prever los efectos de una erupción en la región más poblada del país. En este trabajo se propone un método para identificar las zonas de mayor actividad tectónica en el CVC, vías potenciales para el ascenso de magmas, mediante el uso de patrones de distribución de las tasas de emisión de CO<sub>2</sub> del suelo. Aquí reportamos dos zonas de emisión anómala de CO<sub>2</sub>: la más importante en magnitud se encuentra cerca del Colegio Militar y la segunda, de menor magnitud, cercana a Tenango, Estado de México. Estas anomalías están asociadas con rasgos tectónicos activos y son potenciales conductos para magmas en ascenso. Aunque no hay certeza de que así suceda, la información permite tener elementos para establecer planes de mitigación y de indicaciones de la actividad de las fallas de la región. Se requiere que los resultados que se presentan, sean verificados con más mediciones y, mediante comparación, se pueda observar la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo en el mediano y largo plazo.

**Palabras Clave:** CO<sub>2</sub> en suelos, emisión de CO<sub>2</sub>, fallas, Sierra Chichinautzin, volcanismo monogenético.

### ABSTRACT

Forecast and prediction of eruptions or birth of volcanoes is still a hard-to-tackle issue, temporally and spatially. Statistical estimates of return period for large volcanoes and monogenetic volcanic fields do exist. However, estimating the location for a new volcano to be born is a complex task. In difference with large volcanoes, for which the location of their craters is known, in the case of volcanic fields it is difficult to forecast where the next eruption will take place. Monogenetic volcanic fields are regions whose geologic setting allows the birth of new volcanoes according to a given periodicity. Volcanoes are born at the intersection of faults and fractures, and they are used by the ascending magmas. At monogenetic volcanic fields, eruptive products from previous volcanoes cover the traces of faults and fractures. The Chichinautzin Volcanic Field (CVF), south of Mexico City, has an average return period for new eruptions of <1700 years. The last eruption in the region occurred ~1700-2000 años years ago, according to the geologic studies reported so far. This implies that southern Mexico City is prone to witness a new eruptive event in the near future, and the probability for this to occur will increase with the time. Therefore, it is necessary to explore ways to identify the location of the next eruption for planning and prevention purposes to mitigate the effects of an eruption at the most populated region of the country. This study proposes a method to identify the most tectonically active zones in the CVF that might be used by ascending magmas, through the distribution patterns of the CO<sub>2</sub> emission rates from soils of the region. We report here two zones of anomalous emission of CO<sub>2</sub>: the most important is nearby the Colegio Militar, and the second, less important in magnitude, near Tenango, Estado de México. These anomalies are associated to active tectonic features, which might act as conduits for ascending magmas, although no certainty can be claimed; they represent elements for mitigation planning. In addition, our results attest for activity of faults in the region. Further work is required to confirm the results presented here and, through the comparison with more measurements, observe the evolution of CO<sub>2</sub> soil degassing in the mid- and long-term.

**Key Words:** CO<sub>2</sub> from soil, CO<sub>2</sub> emission, faults, Sierra Chichinautzin, monogenetic volcanism.

## INTRODUCCIÓN

**E**xisten zonas en nuestro planeta donde nacen volcanes que crecen mediante la acumulación de los productos eruptivos, formando conos de material piroclástico o flujos de lava que surgen a través de fisuras. Estos volcanes manifiestan su actividad eruptiva durante un período que puede durar algunos meses a varias décadas. Al terminar su actividad eruptiva, la probabilidad de que estos volcanes vuelvan a llevar a cabo una erupción, es muy pequeña. Las manifestaciones volcánicas posteriores en estas zonas se da generalmente en sitios distintos al anterior. Las zonas caracterizadas por este tipo de actividad eruptiva se les conoce como campos volcánicos monogenéticos<sup>1</sup>. Ejemplo de este tipo de zonas volcánicas son los campos volcánicos de San Francisco en los EUA<sup>2,3</sup>; Monaro en Australia<sup>4</sup>; Eiffel en Alemania<sup>5</sup> y en México se encuentran el Campo Volcánico Chichinautzin (CVC) en el sur del Distrito Federal<sup>6</sup>, el Campo Volcánico de la Cuenca de Serdán-Oriental<sup>7</sup> y el Campo Volcánico de Michoacán-Guanajuato<sup>8</sup>, entre otros. En este último campo nacieron los volcanes Jorullo (1759-1774) y Parícutin (1943-1952) con diferencia de 169 años entre su actividad y a 80 kilómetros de distancia entre uno y otro<sup>9</sup>.

Los volcanes monogenéticos se originan en la intersección de zonas de debilidad cortical, como son las fallas y fracturas<sup>1,10</sup>. En zonas donde los esfuerzos tectónicos distensivos son dominantes, el volcanismo poligenético está ausente o es escaso, mientras que el volcanismo monogenético se vuelve preponderante en zonas donde el régimen de esfuerzos es predominantemente extensional<sup>11</sup>. Así, los patrones estructurales deberían revelar los patrones de distribución de los volcanes monogenéticos. Sin embargo, en los campos volcánicos muy activos, sus mismos productos eruptivos cubren las trazas de las fallas y fracturas que sirven de conducto a los magmas generados a profundidad. Por esta razón, los lineamientos estructurales regionales se reconocen en función de alineamientos de volcanes y rara vez es posible encontrar planos de falla expuestos, donde se puedan medir las características cinemáticas de las fallas.

Los volcanes monogenéticos pueden ocasionar cambios fundamentales en la morfología existente al inicio de la erupción. El nacimiento del volcán Parícutin permitió conocer por primera vez este tipo de actividad eruptiva en forma cercana y detallada, atrayendo la atención de los geólogos debido al interés científico que despertó. El volcán produjo en total 1.3 km<sup>3</sup> de ceniza y 0.7 km<sup>3</sup> de lava<sup>12</sup>. Sin embargo, los diferentes flujos de lava y la acumulación de tefras en las inmediaciones del volcán cubrieron un área de 300 km<sup>2</sup> alrededor del cono y en las inmediaciones de éste las cenizas se acumularon hasta en espesores de 12 m<sup>9</sup>.

Aunque este tipo de erupciones no son tan catastróficas como las de los volcanes poligenéticos, el impacto de la erupción de un volcán monogenético en los asentamientos humanos cercanos al volcán puede ser muy importante e irreversible en la

mayoría de los casos. Durante la erupción del Parícutin, los poblados de San Juan Parangaricutiro (cabecera municipal) y Parícutin (pequeño caserío a la sazón) fueron cubiertos por los flujos de lava y sus habitantes forzados a dejar sus tierras y edificar nuevas poblaciones (como Nuevo San Juan Parangaricutiro). Otras poblaciones fueron cubiertas por varias decenas de centímetros de cenizas volcánicas obligando a una parte de su población a abandonar sus viviendas, como en el caso de Zacán, Zirosto y en menor grado Angáhuán<sup>13</sup>.

Un problema fundamental en el caso de los campos volcánicos monogenéticos es el desconocimiento del nacimiento del siguiente volcán en tiempo y espacio. En el caso de volcanes poligenéticos como el Popocatepetl, se desconoce la fecha exacta en que volverá a hacer erupción. Aunque estadísticamente se puede aproximar la ocurrencia de la siguiente erupción<sup>14-18</sup>, la probabilidad de que cambie el sitio donde se encuentra el cráter es muy baja. En contraste, en el caso de los campos volcánicos monogenéticos se desconoce la fecha del siguiente nacimiento volcánico, así como el lugar donde nacerá. Se pueden hacer algunas inferencias estadísticas sobre la posible fecha de la siguiente erupción<sup>19</sup>, pero la localización de su nacimiento es un problema de mayor dificultad.

Debido a que el impacto de la erupción de un volcán monogenético podría ser catastrófico si ésta se da en las inmediaciones de grandes centros poblacionales como la Ciudad de México, se hace necesaria la búsqueda de herramientas que permitan vislumbrar de manera preliminar, las zonas más probables donde nacería un nuevo volcán.

El nacimiento de un nuevo volcán en el CVC deberá estar controlado por los patrones tectónicos más activos en la región. Los patrones tectónicos consisten en fallas cuya traza puede interpretarse por alineamientos de volcanes, ya que las lavas y depósitos piroclásticos producto de la erupción de volcanes previos cubren los posibles afloramientos donde corroborar su presencia. Todas las fallas y fracturas en la región deben ser el camino para la conducción del CO<sub>2</sub> no biogénico hacia la superficie. Sin embargo, los rasgos estructurales más activos deben conducir un flujo mayor de CO<sub>2</sub> que las fallas menos activas y la cartografía de las anomalías más importantes de flujo de CO<sub>2</sub> en suelos del CVC debe de revelar la presencia de las estructuras más activas de la región. Ahora bien, estas fallas representan las zonas que, idealmente, usarían los magmas ascendentes como camino para llegar a la superficie, dado que son las zonas donde el campo regional de esfuerzos tiene mayores contrastes.

En la actualidad, una porción del CVC es parte de la ciudad más densamente poblada de México y del mundo y quizás, la de mayor importancia económica y política no sólo en México, sino en Latinoamérica. La situación que provocaría el nacimiento de

un nuevo volcán en esta región podría causar un gran desorden en la vida social, política y económica de toda la república. Pero como el nacimiento de un nuevo volcán es difícil de precisar en términos temporales y espaciales, el propósito de este estudio es mostrar las zonas más activas del CVC desde el punto de vista volcánico-tectónico, basados en el estudio de la emisión de CO<sub>2</sub> en suelos. La intención es correlacionar el flujo de CO<sub>2</sub> con la actividad volcánico-tectónica en el CVC e identificar las zonas más propensas a convertirse en el camino para el ascenso de magmas en el siguiente evento volcánico en la región. Así, el estudio establece el nivel de base para el flujo de CO<sub>2</sub> durante la estación de estiaje en un período de calma del CVC<sup>20</sup>.

En este trabajo presentamos una metodología para abordar el problema de la identificación de las zonas probables donde podría nacer un volcán, al reconocer las zonas tectónicamente más activas mediante la medición del flujo de CO<sub>2</sub> en suelos. La identificación de anomalías de emisión de CO<sub>2</sub> podría indicar las zonas de fallamiento más activas, aunque estén sepultadas por los productos eruptivos recientes y estas zonas tectónicamente activas serían las zonas donde, con mayor probabilidad, podría darse la actividad eruptiva.

#### EL FLUJO DE CO<sub>2</sub> EN SUELOS

El uso de la variación de los gases provenientes del suelo y, presumiblemente de origen no biogénico (el producido por la capa viva del suelo, entre microorganismos, insectos y las raíces de plantas y árboles<sup>21,22</sup>) como precursores predictivos para el caso de sismos, ha hecho que la emisión de CO<sub>2</sub> en suelos sea de gran interés para la tectónica, dado su potencial para identificar procesos profundos. En el ámbito de la tectónica se piensa que las réplicas de sismos se deben a pulsos de presión de fluidos generados por la liberación cósmica de CO<sub>2</sub> atrapado a alta presión en una fuente conocida<sup>23</sup>. La cartografía de anomalías de flujo de CO<sub>2</sub> muestra que las estructuras de desgasificación de CO<sub>2</sub> pueden estar asociadas a fallas tectónicas que involucren formaciones carbonosas y áreas de flujo subterráneo de agua recientes o "fósiles"<sup>24</sup>. Las anomalías de desgasificación de CO<sub>2</sub> en suelos revelan también los patrones de fallas asociadas a estructuras regionales como en el caso del graben Pedro Miguel en las Islas Azores<sup>25</sup>.

La emisión de CO<sub>2</sub> en suelos de áreas volcánicas ha despertado gran interés recientemente. Se ha observado que los volcanes que se desgasifican pasivamente pueden liberar cantidades significativas de CO<sub>2</sub> a través de sus flancos así como de las fumarolas en la cima. Se han medido grandes cantidades de gases como flujos provenientes del suelo en muchos volcanes alrededor del mundo como el Etna, Kilauea, la Montaña Mammoth, o el Popocatepetl, por mencionar algunos ejemplos<sup>26-29</sup>.

Las variaciones espaciales (en una zona de estudio determinada) en las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el suelo pueden aportar información estructural importante como lo es la traza de fallas

o fracturas, mientras que las variaciones temporales (cambios de concentración en un mismo lugar) pueden proveer una percepción de la dinámica interior del volcán<sup>29</sup>.

Baubron *et al.*<sup>30</sup> sugirieron que las mediciones de gas en suelo tenían el potencial de poder usarse como una herramienta para la predicción de erupciones volcánicas, con base en los resultados de las mediciones de CO<sub>2</sub>, He y Rn en tres volcanes italianos y dos en Indonesia.

#### EL CAMPO VOLCÁNICO CHICHINAUTZIN

El Campo Volcánico Chichinautzin (CVC) forma parte de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM). La FVTM es una zona volcánica con rumbo E-W, que se ubica entre los 19° y 20° de latitud norte, extendiéndose por más de 1,000 km desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (Figura 1). Su origen está relacionado con la subducción de las placas Rivera y Cocos por debajo de la Placa de Norte América. En la parte central de la FVTM se encuentra el CVC, que es de tipo monogenético y forma un terreno volcánico elevado por encima de 3000 m.s.n.m., alargado en la misma dirección E-W que la FVTM, extendiéndose desde los flancos del volcán Popocatepetl en el este hasta las faldas del Nevado de Toluca en el oeste. Su límite norte abarca zonas del D. F. y el Estado de México (incluida la franja sur de la Ciudad de México) y en el sur hasta el norte del Estado de Morelos (Figura 1).

El CVC posee una de las densidades más altas de volcanes monogenéticos de la FVTM, es decir, de número de volcanes por unidad de área. Incluye al menos 220 estructuras volcánicas cuaternarias que incluyen volcanes escudo, flujos de lava, conos de lava, conos de escoria y de ceniza, cuyos productos abarcan desde basaltos hasta dacitas<sup>6,33</sup> y están intercalados con sedimentos aluviales que, en su conjunto, llegan a cubrir un área de aproximadamente 2,500 km<sup>2</sup>. Bloomfield<sup>31</sup> reportó una densidad de conos de ceniza de 0.1/km<sup>2</sup>.

La mayor parte de la investigación desarrollada en el CVC se ha centrado en el volcán Xitle y flujos asociados que se encuentran en la parte sur de la Ciudad de México<sup>34</sup>. El Xitle se ha estudiado a detalle porque sus lavas destruyeron y sepultaron la antigua ciudad prehispánica de Cuicuilco, localizada 7 km al NE del cono. Aquí fechó Libby<sup>35</sup> por primera vez, carbón encontrado por debajo de los flujos del Xitle y encontró que pertenecía a una época de hace 2,422 ± 250 años A. P. Desde entonces, diversos autores se han dado a la tarea de fechar los materiales orgánicos encontrados por debajo de los productos eruptivos del Xitle, por el método del radiocarbón. Una recopilación reciente de datos radiométricos indica que el Xitle hizo erupción hace unos 1,670 ± 35 años A. P. y que Cuicuilco fue probablemente abandonada como consecuencia directa de esta erupción<sup>36</sup>. No obstante, los estudios geológicos realizados en el Xitle para cartografiar sus lavas y tefras reportaron una edad para la erupción del Xitle de 1977 ± 47 años A. P.<sup>37</sup>

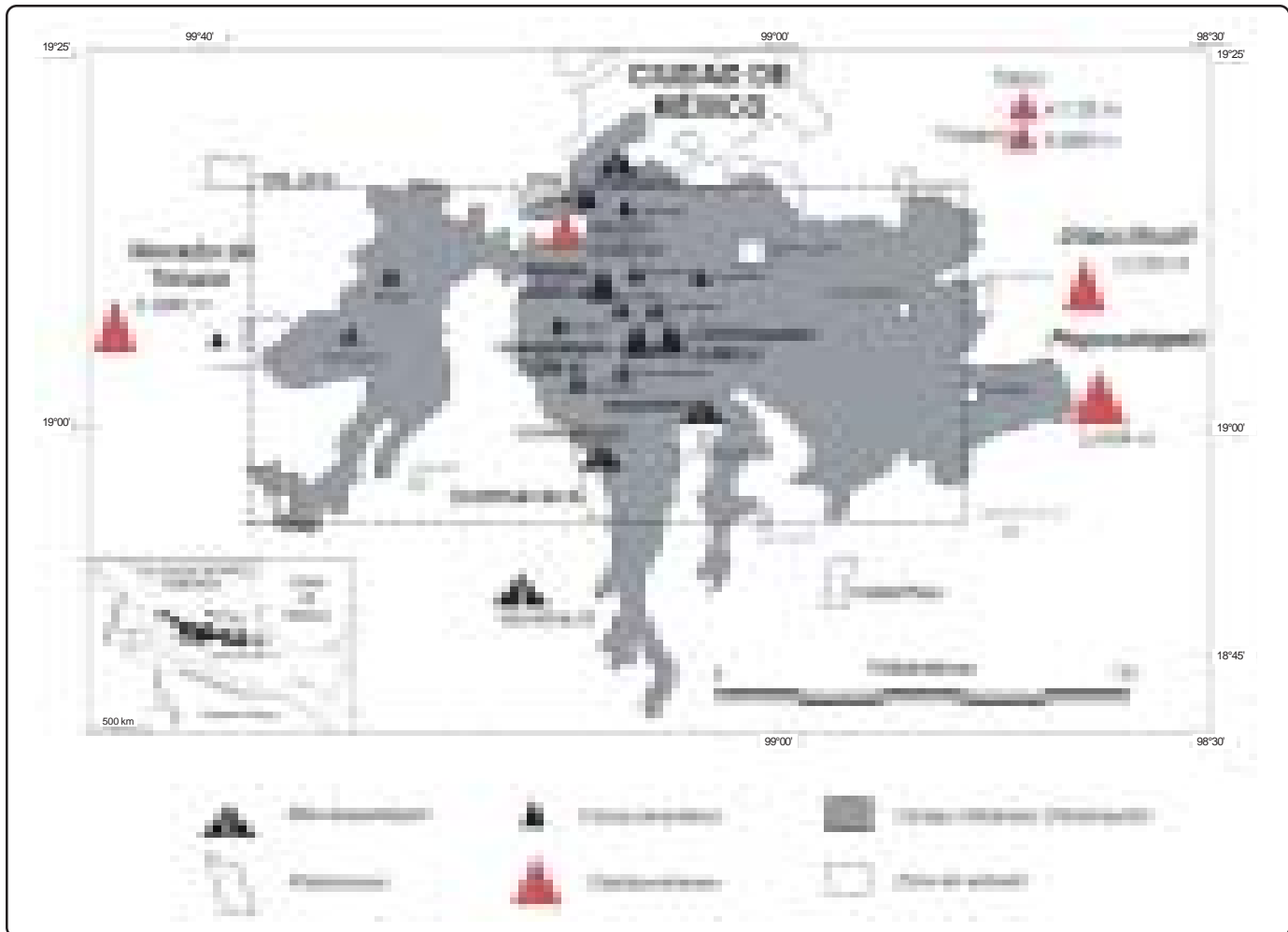


Figura 1. El Campo Volcánico de Chichinautzin (CVC), estratovolcanes circundantes importantes y poblaciones cercanas. La zona de estudio se muestra con línea discontinua al centro. En el recuadro inferior izquierdo se observa la FVTM y los elementos geodinámicos de la subducción en el suroeste de México (modificado de Bloomfield<sup>31</sup> y Siebe *et al.*<sup>32</sup>).

La erupción del Xitle fue eminentemente efusiva<sup>37-38</sup>. Los flujos de lava representan 95% del total de material emitido como roca densa ( $1.1 \text{ km}^3$ ). El 5% restante está representado por los productos explosivos. Estudios realizados en inclusiones de fundidos magmáticos (melt inclusions) en olivinos, indican ausencia de  $\text{CO}_2$ , aunque las pocas inclusiones del Xitle que contienen  $\text{CO}_2$  indican que éste es atrapado en ellas a grandes presiones (700-900 bares), es decir, a grandes profundidades<sup>38</sup>. Un contenido bajo y variable de  $\text{H}_2\text{O}$  y S en las inclusiones, además de la ausencia generalizada de  $\text{CO}_2$  sugieren que durante la erupción del Xitle, la desgasificación del magma ocurre en forma relativamente somera, antes de la formación del olivino. Así, volcanes como el Xitle permiten que las lavas desgasificadas sean extraídas lateralmente al pie del cono, mientras los gases escapan del magma en la parte más externa del conducto, justo debajo del cráter.

El estudio de otros volcanes en el CVC permite tener una idea más completa acerca de los intervalos de recurrencia de erupciones.

Siebe *et al.*<sup>32</sup> mencionan que el intervalo de recurrencia de erupciones en el CVC es  $<1,700$  años y la tasa de erupción promedio para la región es de  $0.6 \text{ km}^3/1000$  años. Si el intervalo de recurrencia es menor a 1700 años y la última erupción ocurrió hace  $\sim 1700\text{-}2000$  años (según estimaciones de Delgado Granados *et al.*<sup>37</sup> y Siebe<sup>36</sup>), la región del CVC estaría muy próxima a atestiguar el nacimiento de un nuevo volcán.

## METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

### Metodología

Se aplicó la técnica de medición de emisiones de  $\text{CO}_2$  en suelos, desarrollada por especialistas en agricultura<sup>39-41</sup>. La técnica se describe más adelante. Se aplicó en un área volcánica escogida cuidadosamente. Los datos obtenidos fueron cartografiados para definir las zonas con mayores tasas de emisión de  $\text{CO}_2$ . Así, las áreas de anomalía resultantes, son las zonas geológicamente más activas y candidatas a servir de conducto a magmas en un evento futuro. Estas zonas serían las indicadas para realizar trabajos de mayor detalle, procurando su medición dos veces por

año (en la época de estiaje y de lluvias), para establecer y confirmar los patrones reconocidos.

### Selección del área de trabajo

La zona de estudio abarca casi por completo el CVC. Debido a la ausencia de datos de tasas de emisión de CO<sub>2</sub> en suelos del CVC, fue necesario incluir la mayor área posible. Por ello, en una primera aproximación se decidió abarcar prácticamente todo el CVC con una retícula de 45 puntos equidistantes uno del otro ~10 km, formando un rectángulo como el de la Figura 1. El área que abarca la retícula es de aproximadamente 3200 km<sup>2</sup>. En la Figura 2 se muestra la misma zona, pero con la distribución real de los sitios de trabajo, ya que no fue posible conservar la equidistancia ortogonal de ~10 km de manera precisa, pues muchas veces los puntos de la carta topográfica no coinciden con carreteras, caminos de terracería, brechas, caminos de líneas de transmisión o vías de ferrocarril que son transitables con un vehículo todo terreno. Cuando fue posible se intentó que los puntos de la retícula coincidieran con zonas de fracturamiento mostradas en las cartas geológicas de la zona que comprende el CVC. El muestreo se llevó a cabo entre el 22 de abril y el 19 de mayo de 2005, durante la época de estiaje para esta zona.

Para acceder a los puntos de muestreo se usaron diversas cartas topográficas del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y un GPS modelo *e-Trek*<sup>®</sup> marca Garmin.

Las cartas topográficas empleadas fueron:

- E14-A38 Toluca, mitad inferior.

- E14-A39 Ciudad de México, mitad inferior.
- E14-B31 Chalco, mitad inferior.
- E14-A48 Tenango de Arista, completa.
- E14-A49 Milpa Alta, completa.
- E14-B41 Amecameca de Juárez, completa.
- E14-A58 Tenancingo, mitad superior.
- E14-A59 Cuernavaca, mitad superior.
- E14-B51 Cuautla, mitad superior.

También se consultaron las cartas INEGI de: uso de suelo, edafológica, geológica y uso potencial de cada zona mencionada, con la finalidad de contar con la mayor información posible para la elección de los puntos de muestreo.

La zona que abarca el estudio está ubicada entre los 18°54' y 19°16' de latitud norte y los 98°48' y 99°34' de longitud oeste.

### Instrumentación

El equipo utilizado para la medición de emisión de CO<sub>2</sub> en suelos del CVC consiste de:

- Equipo Analizador para CO<sub>2</sub> (modelo LI6252 de LI-COR<sup>®</sup> Inc. Lincoln, Nebraska 8504 USA<sup>42</sup>) consistente de un analizador infrarrojo diferencial para gases no dispersivo (Figura 3).
- Equipo de control de flujo (modelo LI-670 de LI-COR<sup>®</sup> Inc.<sup>43</sup>), que consiste en una bomba de flujo de gran precisión y se acopla al analizador (Figura 3).
- Cámara de respiración de suelos (modelo 6000-09 de LI-COR<sup>®</sup>

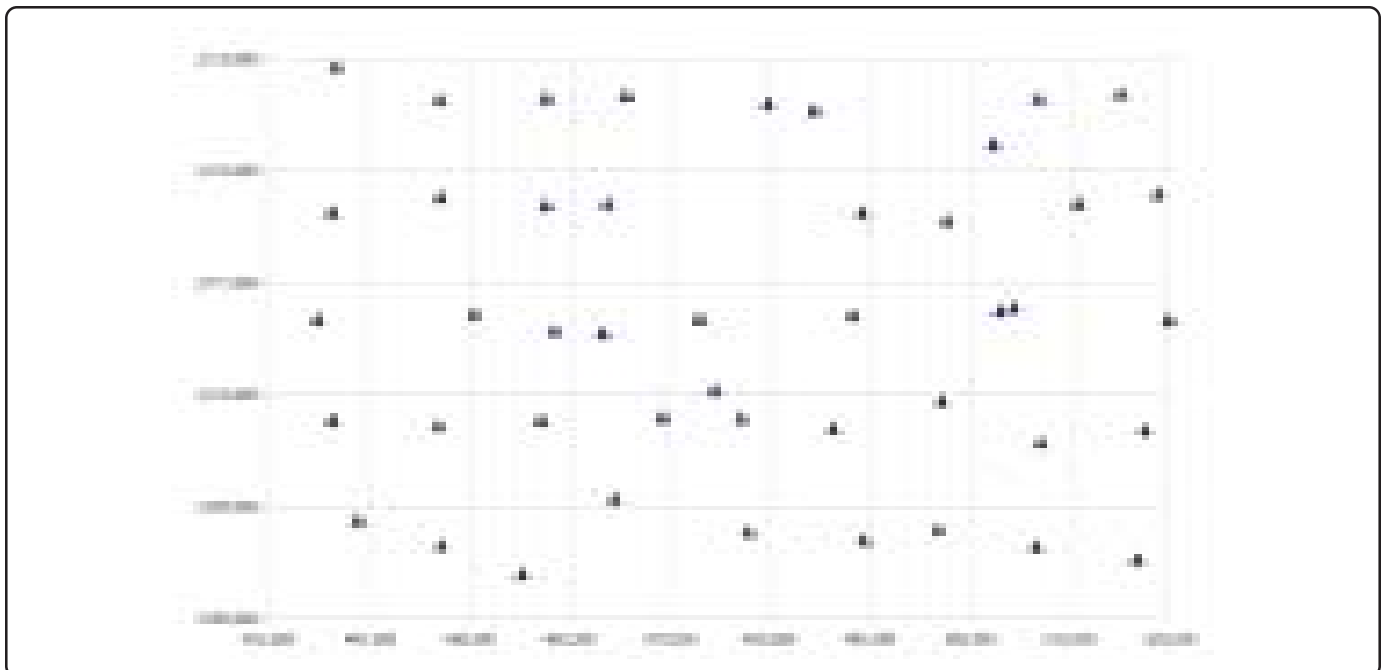


Figura 2. Distribución de las estaciones de medición de CO<sub>2</sub> en suelos del CVC. Se muestra la ubicación de cada punto en el área de estudio en coordenadas UTM, la Tabla I indica la ubicación precisa y el nombre de cada uno de los puntos.





Figura 3. Componentes del sistema de medición: computadora Lap-Top, analizador infrarrojo de CO<sub>2</sub>, unidad de flujo y GPS portátil.

Inc.<sup>44-45</sup>), para captar el gas emitido por el suelo. Se acopla la unidad de flujo LI-670 (Figura 4).

- Computadora Lap-Top con procesador Pentium, acoplada al analizador de CO<sub>2</sub> LI 6252 (Figura 3).
- Termómetro Fluke® común para conectar 2 termopares tipo J (Figura 4).

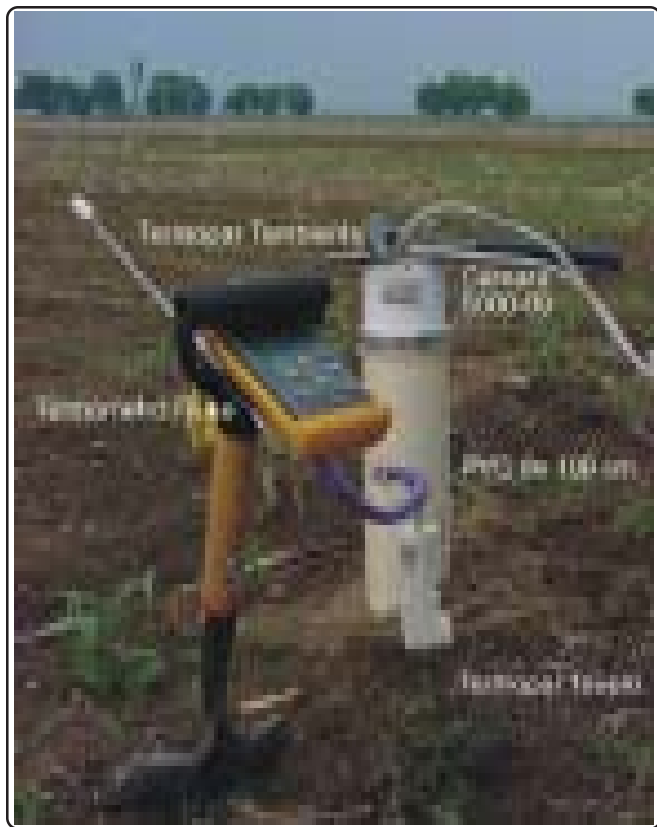


Figura 4. Cámara de respiración de suelo 6000-09 LI-COR® Inc. mostrada en posición para medir la concentración de CO<sub>2</sub> del suelo. Nótese que está sobre el tubo de PVC de 100 cm, en un terreno de labranza. También se muestran los termopares y el termómetro.

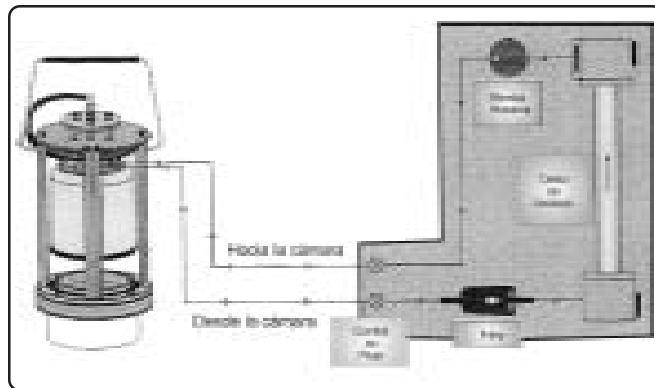


Figura 5. Esquema que muestra la circulación del gas analizado. El gas pasa una y otra vez a través del sistema, si no hay fugas, la concentración se mantiene constante. Si existe acumulación, como es de esperarse, se registra el flujo de gas y se obtienen gráficas con tendencia ascendente.

- Dos termopares Tipo J. Uno para suelo y otro para temperatura ambiente (Figura 4).
- Medidor de humedad para suelo agrícola (LIF, Lincoln Nebraska).

El equipo de medición de CO<sub>2</sub> LI 6252 y LI-670 se calibró el 10 de abril del 2005, antes de iniciar el trabajo de campo en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y se cambiaron las trampas de humedad en la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM-A) el 14 de abril del 2005.

### Medición

Se midió la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental y en el suelo para obtener, más adelante, la tasa de emisión de CO<sub>2</sub><sup>39-40</sup>. Con los datos de cada una de las 45 estaciones muestreadas se logró conformar un mapa de contornos de igual concentración de flujo real de CO<sub>2</sub> para la zona de estudio, conservando la topografía de la zona.

Al arribar al punto de muestreo se procedió a realizar lo siguiente:

1. Apagar el vehículo. Labor lógica, pero muy importante pues evita que la medición no se vea afectada por el CO<sub>2</sub> de la combustión interna del motor.
2. Remoción de la capa de suelo superficial o pastizal con una pala minera. Esta labor permitió dejar listo el terreno para introducir un tubo de PVC de 10 cm de diámetro, por el largo que fuese necesario (50 cm o 100 cm de longitud) dependiendo de las condiciones de compactación del terreno en cada caso.
3. Instalación del tramo de PVC para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en suelo. Esta operación permitió encauzar el CO<sub>2</sub> emitido por el subsuelo, próximo a la cámara de respiración, evitando contaminaciones ambientales o de las capas de suelo superficial adyacentes. Además, al realizar

esta operación antes de la instalación del equipo de medición, se permite el tiempo suficiente para que se establezca la perturbación causada *a priori*.

4. Conexión de los equipos de análisis y bombeo, a la computadora y a la cámara de respiración de suelos. Encendido del equipo para dejarlo listo para la adquisición de datos.
5. Instalación de un par de termopares: uno en el suelo y el otro para medir la temperatura ambiente que, conectados al termómetro, proveen la temperatura puntual y promedio en ~600 s de ambos ambientes de medición.
6. Adquisición de datos ambientales de CO<sub>2</sub> (~600 s), próxima al suelo, colocando la cámara de respiración cerca del suelo, acostada sobre el tubo de PVC. Al mismo tiempo, se crea un archivo en la computadora con los datos informativos del sitio de muestreo.
7. Medición de CO<sub>2</sub> en suelo. Se introduce la cámara de respiración en el extremo vertical del tubo de PVC, colocando entre las dos un empaque de neopreno, para sellar el ambiente interno de posibles contaminaciones ambientales externas. Durante ~600 s hasta que se establezca la medición, se guardan los datos adquiridos en otro archivo electrónico.
8. El equipo adquiere un dato de CO<sub>2</sub> cada segundo, para ambas mediciones. Se conformaron dos corridas de ~600 s aproximadamente para la medición de la concentración ambiental y otro tanto para la concentración en la emisión de suelo. Los registros de cada punto se almacenaron en una computadora mediante el programa del instrumento en archivos con formato de texto. En cada archivo los datos están dispuestos en cuatro columnas: tiempo de medición, concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura del gas y presión durante la medición. Adicionalmente, se tomaron otros datos importantes: ubicación de cada punto con GPS, temperatura y humedad del suelo a una profundidad de entre 10 y 20 cm, temperatura ambiente, y datos meteorológicos básicos en cada una de las mediciones.
9. Durante el tiempo transcurrido entre ambas mediciones, se aprovecha para crear el registro escrito (bitácora de campo) de todas las variables involucradas, iniciales y finales, a saber:
  - Coordenadas GPS del sitio y precisión de navegación.
  - Altitud
  - Presión atmosférica del analizador y del GPS. La observación continua y sistemática de esta variable en dos equipos diferentes por cada punto de medición, ayuda a corroborar que los equipos estén funcionando correctamente. Cuando uno de los dos no coincide o se aleja notoriamente, obliga a revisar las conexiones de las tuberías, el flujo de medición y la alimentación eléctrica. Fue útil para obtener certeza en los

- datos adquiridos de concentración ambiental y de suelo.
- Temperatura ambiental inicial y final, después de ~600 s.
- Concentración de CO<sub>2</sub> ambiental inicial y final, después de ~600 s.
- Presión en la cámara de respiración de suelo.
- Porcentaje de humedad del terreno.
- Concentración de CO<sub>2</sub> en suelo inicial y final, después de ~600 s.
- Condiciones meteorológicas básicas.

10. Apagado del equipo y alistamiento para el siguiente punto de muestreo. En cuanto al terreno, se restablece el orden inicial tapando el agujero de la medición con el material antes removido.

### Procesamiento de datos

El proceso de cálculo para obtener la emisión de CO<sub>2</sub> en suelo, así como la concentración ambiental para cada punto, se realizó de la siguiente manera:

*Etapa 1.* Elaboración de la gráfica de concentración de CO<sub>2</sub> vs. tiempo. Se obtuvieron dos gráficas por punto de muestreo y por lo tanto dos colecciones de datos independientes. Una para la concentración de CO<sub>2</sub> ambiental y otra para la emisión de CO<sub>2</sub> del suelo. En cada una de las gráficas se realizó una regresión lineal, con la finalidad de apreciar la tendencia de los datos y, sobre todo, en el caso de la gráfica de suelo, la pendiente de esta recta se usa junto con otros datos, para calcular la tasa de emisión de CO<sub>2</sub> (F, Figura 6 y 7). La fórmula para el cálculo de la tasa de emisión es:

$$F = 0.001 \times ((P \times V)/(R \times T)) \times ((dx/dt)/A)$$

donde:

- R, es la constante universal de los gases [Pa·m<sup>3</sup>·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>].
- V, es el volumen total del sistema de medición [m<sup>3</sup>].
- A, es el área expuesta del suelo [m<sup>2</sup>].
- T, es la temperatura dentro de la campana [K].
- P, es la presión dentro de la campana [KPa].
- dx/dt, es el gradiente de acumulación en la medición de suelo.
- F, es la tasa de emisión [mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>] o [g·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>].

De esta forma se obtuvo la tasa de emisión para cada uno de los 45 puntos estudiados. En la Tabla I se muestran los resultados.

*Etapa 2.* Con los datos de localización GPS por punto de estudio se realizó una hoja de cálculo, en la que se vertieron estos datos en formato UTM, que se acoplaron con los datos de flujo ya calculados de la Tabla I más los datos de identificación topográfica como: carreteras, ciudades cercanas o rasgos orográficos notorios, así como su clave PT y un número consecutivo del 1 al 45.

Punto	Estación	Longitud (E-UTM)	Latitud (N-UTM)	F <sub>CO<sub>2</sub></sub> (g·d <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
PT 1	Xochitlán	519,942	2,088,427	0.00
PT 2	Tlacotitlán	520,675	2,099,989	0.00
PT 3	Yecapixtla	509,851	2,089,570	0.00
PT 4	Tepozteco	489,550	2,100,120	0.00
PT 5	Yautepec	492,607	2,090,155	0.00
PT 6	AMEX-115	500,011	2,091,139	0.00
PT 7	Chalco	510,124	2,129,578	0.00
PT 8	Huexoculco	518,293	2,130,066	0.00
PT 9	Tlalmanalco	522,003	2,121,117	0.00
PT 10	Totolapan	510,312	2,098,851	0.04
PT 11	Tlalnepantla	500,364	2,102,612	0.56
PT 12	CICITEC1-IPN	506,204	2,110,656	1.46
PT 13	Bahía AMEX-115	480,403	2,101,053	0.84
PT 14	Gas AMEX-115	476,150	2,109,956	1.68
PT 15	CMEX-95	477,721	2,103,543	0.26
PT 16	Zoyatzingo	523,100	2,109,825	0.71
PT 17	Temamatla	514,028	2,120,213	0.45
PT 18	CICITEC2-IPN	507,617	2,110,947	7.10
PT 19	CMEX-142	500,875	2,118,708	1.29
PT 20	Capulín	466,949	2,120,236	0.12
PT 21	M&A Oil Co.	460,816	2,120,070	0.42
PT 22	Atlapulco	460,882	2,129,636	0.36
PT 23	G. Hidalgo	450,189	2,129,533	0.14
PT 24	CrisaVitro	439,822	2,132,489	0.83
PT 25	CMEX-55	439,413	2,119,463	1.53
PT 26	S. Tianguistenco	450,269	2,120,823	2.45
PT 27	S. Pedro	472,452	2,101,121	1.56
PT 28	Capulín Zempoala	466,506	2,108,663	0.28
PT 29	Zempoala S. Martha	461,663	2,108,908	7.82
PT 30	Tótoc	460,329	2,100,854	7.41
PT 31	P. Nuevo	450,344	2,089,679	0.93
PT 32	Tenancingo	450,052	2,100,408	0.65
PT 33	Tenango	439,437	2,100,906	0.00
PT 34	Esperanza	453,674	2,110,375	0.60
PT 35	Rayo	437,966	2,109,927	2.09
PT 36	Carmen	442,005	2,091,933	1.86
PT 37	Tlajotla	458,387	2,087,112	0.58
PT 38	CIVAC	481,098	2,090,922	0.27
PT 39	BV del Monte	467,683	2,093,845	3.31
PT 40	km. 21 AMEX-25	483,018	2,129,132	16.07
PT 41	40. Dínamo	468,830	2,129,907	0.43
PT 42	V. Chichinautzin	491,449	2,110,282	8.66
PT 43	S. Pablo	492,427	2,119,426	5.05
PT 44	Mixquic	505,578	2,125,536	0.08
PT 45	ENAP-UNAM	487,632	2,128,565	4.04

Tabla I. Tasas de emisión obtenidas para cada estación de medición. Se muestran los datos de ubicación de cada punto, así como los resultados calculados para el trazado del mapa de contornos de flujo de CO<sub>2</sub> en el CVC.

*Etapa 3.* Con los resultados anteriores se elaboró un mapa de contornos con el programa Surfer® en donde se ilustró la emisión de CO<sub>2</sub> en los 45 puntos estudiados. Este mapa de contornos se

superpuso a una carta topográfica digital de la zona de estudio, quedando así un solo mapa en donde se pueden observar las diferentes zonas de emisión de CO<sub>2</sub> e identificar los lugares



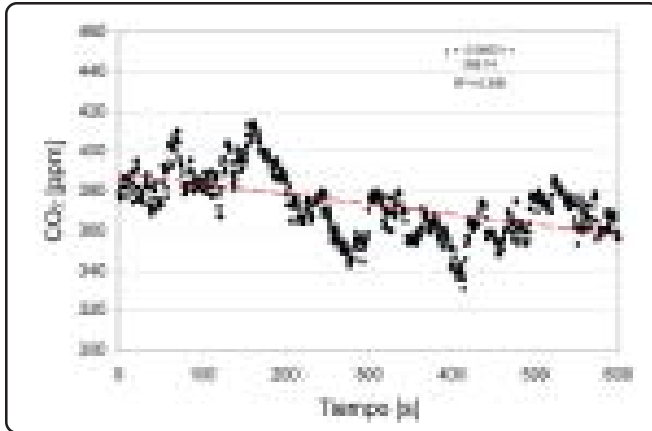


Figura 6. Concentración de  $\text{CO}_2$  ambiental vs. tiempo en el punto PT40 en el km 21 de la carretera México-Cuernavaca (MEX-95), el 15 de mayo del 2005.

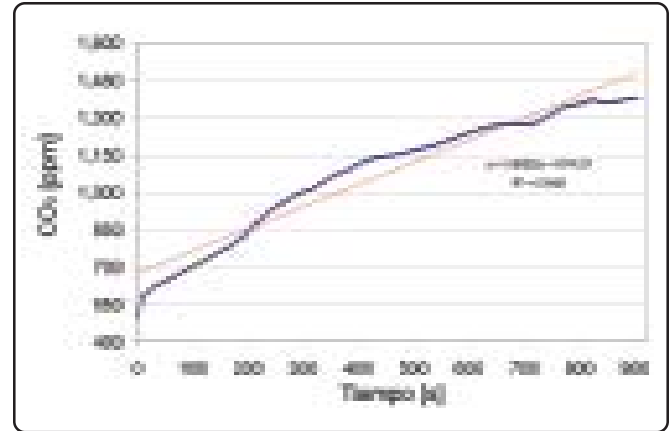


Figura 7.  $\text{CO}_2$  acumulado vs. tiempo para obtener el flujo de  $\text{CO}_2$  en suelo del punto PT40 en el km 21 de la carretera México-Cuernavaca (MEX-95), el 15 de mayo del 2005.

físicos a los que corresponden (Figura 8).

#### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las mediciones de emisión de  $\text{CO}_2$  en suelos del CVC estuvieron, en general, en un rango de 0 a  $8.6 \text{ [g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}]$ , tal como se esperaba de las características geológicas, tipo y uso de suelo.

Todas las mediciones excepto una fueron muy similares. El punto PT40 que se hizo en mayo 15 del 2005, ubicado en el kilómetro 21 de la autopista México-Cuernavaca (MEX95), muy cerca del Colegio Militar, mostró un comportamiento anómalo. La tasa de emisión de  $\text{CO}_2$  fue de  $16.1 \text{ [g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}]$ . Se puede observar el comportamiento registrado en el mapa de contornos (Figura 8). Se pensó inicialmente que este valor alto pudiera deberse a una acumulación de turba, atrapada al momento de construir la

autopista. De esta manera, sería posible que una porción del  $\text{CO}_2$  del suelo producido por la capa viva hubiera afectado las mediciones, al introducir los tubos de PVC de 50 ó 100 cm. Sin embargo, se procuró anular este efecto al permitir que se estabilizara el terreno por un período de tiempo, antes de tomar la muestra. Para confirmar esta tasa de emisión, se llevaron a cabo mediciones adicionales en este sitio.

La ocurrencia de un sismo a poca profundidad en el mes de octubre de 2005, con el epicentro cercano a esta región, sugiere que la estación de muestreo reflejó un incremento en el valor de flujo de  $\text{CO}_2$  normal debido a factores tectónicos. Así, la anomalía se consideró como un indicador de que el sistema de fallas en esta parte del área de estudio es activo, es decir, proclive a generar sismos. Este sistema de fallas puede ser usado por los magmas

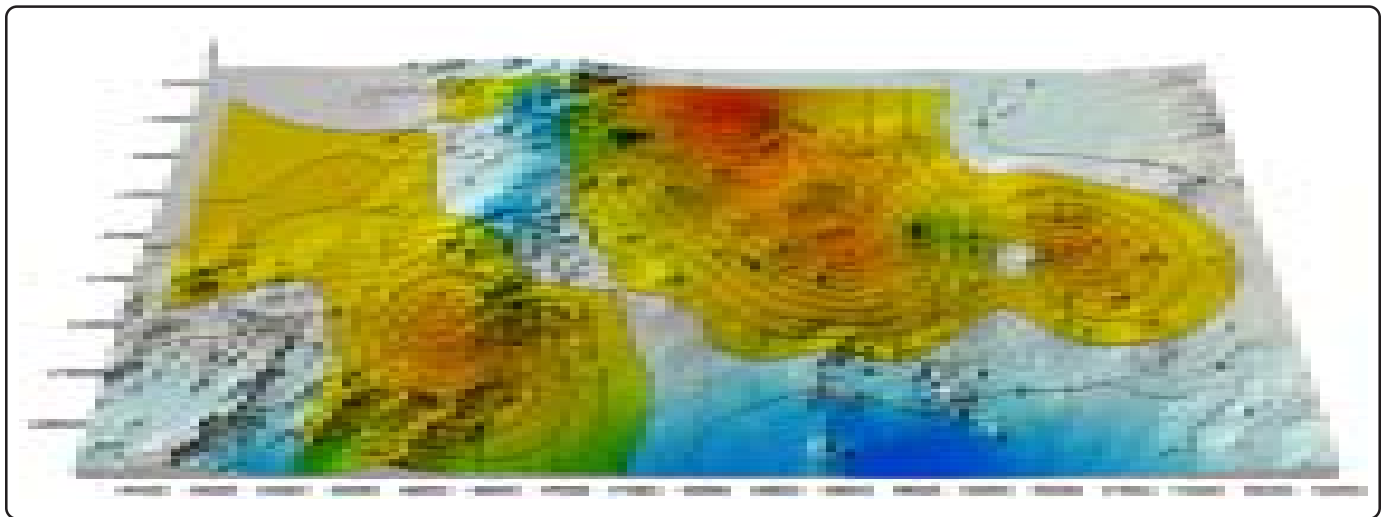


Figura 8. Vista completa de la zona estudiada en el CVC. La región estudiada se muestra en modelo sombreado construido a partir de un modelo digital de terreno. Los contornos de la tasa de emisión de  $\text{CO}_2$  en suelo, se construyeron a partir de los datos de la Tabla I. La zona más oscura es la anomalía discutida en el texto y que corresponde con la estación PT40, que se encuentra en el km 21 de la carretera México-Cuernavaca, cerca del Colegio Militar. En este punto, la tasa de emisión de  $\text{CO}_2$  en suelo fue de  $16.0 \text{ [g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}]$ .

en el futuro para ascender hacia la superficie. Es necesario señalar que la detección de anomalías de emisión de CO<sub>2</sub> sirve como un elemento de monitoreo tectónico y volcánico. En el caso que nos ocupa, esta anomalía resultó ser un precursor del evento sísmico.

Por otra parte, se observa otra zona de anomalía en la región cercana a Tenango. Las zonas de emisión promedio coinciden con la presencia de conos de ceniza o escoria, a excepción de una zona cercana al Valle de Toluca, que parecería estar influenciada por el volcán Tenango. Una manera de poder discernir si se trata de un error, por ejemplo un almacén natural de turba, o si en efecto corresponde a una emisión de CO<sub>2</sub> de origen geológico, es analizando datos geofísicos asociados, como la sismicidad del período estudiado, fracturamiento o fallamiento y hacer una nueva medición más detallada.

Es necesario hacer un estudio más detallado en las zonas de anomalía para documentar lo que puede estar sucediendo en el subsuelo. Para ello, hay que completar este estudio con la medición del flujo de CO<sub>2</sub> en la época de lluvias y así, con dos mapas de contornos en momentos estacionales distintos será posible discernir mejor la naturaleza de estos valores.

Los contornos de la emisión de CO<sub>2</sub> en suelo permiten identificar rasgos tectónicos que han sido sepultados por depósitos jóvenes de tefra de pequeños volcanes monogenéticos. Aunque se piensa que los rasgos tectónicos pueden servir de conducto para magmas en ascenso, no hay certeza de que esto sea así, sólo una actividad eruptiva lo corroborará. Mientras tanto, los resultados son elementos de ayuda en la planeación de medidas de prevención y mitigación. Al mismo tiempo, los resultados muestran zonas sismogénicas a las que es necesario vigilar.

#### PERSPECTIVAS FUTURAS

Es importante continuar con esta investigación con el fin de obtener varios mapas de contornos tanto para la época de lluvias, como para la de estiaje, para la misma zona de estudio en el CVC y así tener más elementos que permitan conformar un banco de información del estado del CVC en un período de calma. La comparación de resultados entre diferentes épocas y años permitirá evaluar la evolución de los procesos geológicos en la zona, principalmente tectónicos y volcánicos.

Sería muy útil poder aumentar la densidad de puntos, particularmente en las zonas que presentaron un flujo de CO<sub>2</sub> importante para saber con mayor detalle que está ocurriendo en éstas y quizás descubrir otras, que por la amplitud de la primera retícula no se estudiaron.

En la medida de lo posible, sería ideal poder dejar los tubos de manera fija en el terreno, como bancos de nivel topográficos, para siempre regresar al mismo sitio y saber que el gas que se está midiendo proviene del subsuelo, sin ninguna perturbación

cercana por la instalación reciente. Sin embargo, esto se antoja impráctico, debido a las actividades humanas de la zona y la posibilidad de que los sitios sean vandalizados.

#### CONCLUSIONES

Esta evaluación de las emisiones de CO<sub>2</sub> en suelos del CVC durante la época de estiaje del año 2005 (22 de abril al 19 de mayo), arrojó datos importantes y de gran utilidad en la conformación del primer mapa de contornos de tasas de emisión de CO<sub>2</sub> en suelos para esta zona. Este mapa proporciona una clara visión del comportamiento estacional del flujo del suelo en el período de calma analizado. Este mapa permite también ver las zonas geológicamente más activas de la región del CVC.

La anomalía en PT40 estableció un punto en el sur de la Ciudad de México que se considera actualmente como un precursor de sismos futuros, al que hay que observar de manera muy cercana y confirmar la presencia de una anomalía centrada en esta parte. Esta área representa una zona de tectónica activa que podría ser utilizada por magmas en ascenso, llegado el momento.

La anomalía cercana a Tenango, aunque es mucho menor a la de PT40, podría indicar una zona adicional de actividad geológica que establece una zona probable adicional para el nacimiento de un volcán.

Se hace necesaria la realización de más campañas de medición, idealmente dos veces por año, a lo largo de varios años. Las mediciones aquí reportadas representan, en todo caso, el nivel de base de emisión de CO<sub>2</sub> en suelos en la región del CVC y cualquier cambio en mediciones futuras de tasas de emisión o de patrones de distribución y sus fluctuaciones, permitirán reconocer mejor los procesos geológicos que aquí actúan y su evolución a través del tiempo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), a través del proyecto IN104905. Agradecemos cumplidamente el apoyo del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de la Secretaría de Gobernación, en particular a su titular el M. I. Roberto Quaas, así como al Ing. Enrique Guevara, por prestar amablemente la instrumentación necesaria para realizar esta investigación. Agradecemos a la Dra. Agnes Mazot la lectura de una versión previa y sus útiles comentarios.

#### REFERENCIAS

1. Nakamura, K. Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation – principle and proposal. *J Volcanol Geotherm Res* **2**, 1-16 (1977).
2. Robinson, H.H. The San Francisco volcanic field, Arizona. *U.S. Geol. Surv. Profess. Pap.* **76**, 213 (1913).
3. Tanaka, K.L., Shoemaker, E.M., Ulrich, G.E. & Wolfe, E.W. Migration of volcanism in the San Francisco volcanic field,

- Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.* **97**, 129-141 (1986).
4. Brown, M.C., McQueen, K.G., Roach, I.C. & Taylor, G. Monaro Volcanic Province. IAVCEI Canberra 1993 excursion guide. Australian Geological Survey Organisation, Record 1993, 61 (1993).
  5. Rutten, M.G. The Geology of Western Europe. Amsterdam: Elsevier, 520 (1969).
  6. Martin del Pozzo, A.L. Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico. *Bulletin Volcanologique* **45**, 9-24 (1982).
  7. Siebe, C. & Verma, S.P. Major element geochemistry and tectonic setting of Las Derrumbadas rhyolitic domes, Puebla, Mexico. *Chem Erde* **48**, 177-189 (1988).
  8. Hasenaka, T. & Carmichael, I.S.E. The cinder cones of Michoacan-Guanajuato, central Mexico: their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *J Volc Geotherm Res* **25**, 105-124 (1985).
  9. Luhr, J.F. & Simkin, T. (eds). Paricutin: The Volcano Born in a Mexican Cornfield. *Phoenix: Geoscience Press* **427** (1993).
  10. Connor, C.B. & Conway, F.M. Basaltic volcanic fields. In: Sigurdsson, H., *et al.* eds. Encyclopedia of volcanoes: Academic, San Diego, CA, p. 331-343 (2000).
  11. Connor, C.B. Structure of the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field, Mexico. *J Volcanol Geotherm Res* **33**, 191-200 (1987).
  12. Fries, C. Jr. Volumes and weights of pyroclastic material, lava and water erupted by Paricutin volcano, Michoacán, México. *Transaction of the American Geophysical Union* **34(4)**, 603-616 (1953).
  13. Nolan, M.L. Impact of Paricutin on five communities. In: Sheets PD and Grayson DK (eds.) Volcanic Activity and Human Ecology. New York, Academic Press, 293-338 (1979).
  14. Delgado Granados, H., Carrasco Nuñez, G., Urrutia Fucugauchi, J. & Casanova Becerra, J.M. Analysis of the eruptive records of the Popocatepetl volcano, México, Kagoshima International Conference on volcanoes, Kagoshima, Japan, Proceedings, 510-513 (1988).
  15. De la Cruz Reyna, S. Poisson-distributed patterns of explosive activity. *Bull. Volcanol.* **54**, 57-67 (1991).
  16. De la Cruz Reyna, S. Random patterns of occurrence of volcanic eruptions at Colima volcano, México. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **55**, 51-68 (1993).
  17. De la Cruz Reyna, S. Probabilistic analysis of future explosive eruptions. In: Scarpa, R., Tilling, R.I. (Eds.), Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards. Springer, Berlin, 599-629 (1996).
  18. De la Cruz Reyna, S. & Carrasco Nuñez, G. Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **113**, 307-318 (2002).
  19. Scandone, R. Preliminary evaluation of the volcanic hazard in the southern Valley of Mexico. *Geofísica Internacional* **18**, 21-35 (1979).
  20. Villalpando Cortés, R.E., Delgado Granados, H. & Farraz Montes, I.A. Use of carbon dioxide soil emission to forecast eruptions in monogenetic volcanic fields. Fourth Conference: Cities on Volcanoes IAVCEI Quito, Ecuador, January 2006, Abstracts, 184 (2006).
  21. García, R.L. Assimilation and allocation of carbon in determinate and indeterminate soybeans, 1st Edition, Nebraska University, USA, Nebraska University Press, 230 (1991).
  22. García, R. & Verma, B. Soil surface CO<sub>2</sub> fluxes and the carbon budget of a grassland. *Journal of Geophysical Research* **97(D17)**, 18845-18853 (1992).
  23. Miller, S.A., *et al.* Aftershocks driven by a high-pressure CO<sub>2</sub> source at depth. *Nature* **427**, 724-727 (2004).
  24. Donnini, M., *et al.* Carbon dioxide degassing at Bagni San Filippo (Tuscany, Italy): quantification and modeling of gas release. *Geophys Res Abs* **9**:S-Ref-ID:1607-7962/gra/EGU2007-A-02954 (2007).
  25. Faria, C., Ferreira, T., Gaspar, J.L. & Sousa, F. Tectonic features revealed by CO<sub>2</sub> soil diffuse degassing anomalies at Faial Island (Azores). *Geophys Res Abs* **5**, 13119 (2003).
  26. D'Alessandro, W., Giammanco, S., Parello, F. & Valenza, M. CO<sub>2</sub> output and δ13C(CO<sub>2</sub>) from Mount Etna as indicators of degassing of shallow asthenosphere. *Bull Volcanol.* **58**, 455-458 (1997).
  27. Gerlach, T.M., McGee, K.A., Elias, T., Sutton, A.J. & Doukas, M.P. Carbon dioxide emission rate of Kilauea Volcano: Implications for primary magma and the summit reservoir. *Journal of Geophysical Research* **107(B9)**, 2189, 1-15, doi:10.1029/2001JB000407 (2002).
  28. McGee, A. & Gerlach, T.M. Annual cycle of magmatic CO<sub>2</sub> in a tree-kill soil at Mammoth Mountain, California: Implication for soil acidification. *Geology* **26(5)**, 463-466 (1998).
  29. Varley, N.R. & Armienta, M.A. The absence of diffuse degassing at Popocatepetl volcano, Mexico. *Chem. Geol.* **177**, 157-173 (2001).
  30. Baubron, J.C., Allard, P., Sabroux, J.C., Tedesco, D. & Toutain. Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *J. P. J. Geol. Soc. Lond.* **148**, 571-576 (1991).
  31. Bloomfield, K. A late Quaternary volcano field in central Mexico. *Geologische Rundschau* **64**, 476- 497 (1975).
  32. Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P. & Abrams, M. Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards. *Bulletin of Volcanology* **66**, 203-225 (2004).
  33. Meriggi, L., Macías, J.L., Tommasini, S., Capra, L. & Conticelli S. Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central Mexico): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **25(2)**, 197-216 (2008).
  34. Velasco-Tapia, F. & Verma, S.P. Estado actual de la investigación geoquímica en el campo monogenético de la Sierra de Chichinautzin: análisis de información y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **18**, 168-203 (2001).
  35. Libby, F.W. Radiocarbon dating. Chicago, University Chicago Press, 124 (1955).
  36. Siebe, C. Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern Basin of Mexico-City. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **104**, 45-64 (2000).
  37. Delgado Granados, H., *et al.* Geology of Xitle volcano in southern Mexico City, a 2000-year old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **15**, 115-131 (1998).
  38. Cervantes, P. & Wallace, P. Magma degassing and basaltic eruption styles: a case of ~2000 year BP Xitle volcano in central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **120**, 249-270 (2003).
  39. Pattey, E., Rochette, P., Desjardins, R.L. & Dube, P.A. Estimation of the net CO<sub>2</sub> assimilation rate of maize (*Zea mays* L.) canopy

- from leaf chamber measurements. *Agric. For. Meteorol.* **55**, 37-5 (1991).
40. Rochette, P., Desjardins, R.L. & Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Can J Soil Sci* **71**, 189-196 (1991).
41. Parkinson, K.J. An improved method for measuring soil respiration in the field. *The Journal of Applied Ecology* **18(1)**, 221-228 (1981).
42. LI-COR. LI-6252 CO<sub>2</sub> Analyzer Instruction Manual, 1st Edition, Nebraska, USA, LI-COR, Inc., 126 (1992).
43. LI-COR. LI-670 Flow Control Unit Operating and Service Manual, 1<sup>st</sup>. Edition, Nebraska, USA, LI-COR, Inc., 58 (1990).
44. LI-COR. 6000-09 Soil Respiration Chamber Instruction Manual, 1<sup>st</sup>. Edition, Nebraska, USA, LI-COR, Inc., 123 (1993).
45. LI-COR. 6400-09 Soil CO<sub>2</sub> Flux. Chamber, Product Bulletin, 1<sup>st</sup>. Edition, Nebraska, USA, LI-COR, Inc., 28 (1993).