

Metodología

Definir primero los procesos físicos que gobiernan el transporte de un gas a través de un medio poroso es de vital importancia para después comprender la metodología empleada en el presente estudio. En los siguientes apartados se definirán los procesos que controlan el flujo de gases a través de un medio poroso como el suelo para poder comprender mejor la metodología empleada en este trabajo.

V.1 El dióxido de carbono en suelos

V.1.1 Transporte de gases

Según Camarda (2006), *“El transporte de gases a través de medios porosos puede ocurrir por medio de dos procesos diferentes: la difusión y la advección”*. La difusión molecular la define como *“El proceso donde la materia se transporta de una región de alta concentración a una región de baja concentración”*; mientras que la advección o transporte de masas es *“El proceso donde la materia se transporta en respuesta a un gradiente de presión. En general –concluye–, el transporte de gas se produce debido a la combinación de estos dos mecanismos diferentes”*.

V.1.2 El flujo de dióxido de carbono

La exhalación es el proceso mediante el cual los gases se transportan del suelo a la atmósfera a través de los mecanismos descritos anteriormente. La exhalación difusiva de gas ocurre debido a la diferencia de concentraciones del mismo en el suelo y atmósfera. Por otro lado, *“La exhalación advectiva sucede cuando el gas en el suelo se encuentra sometido a una presión mayor que la presión atmosférica”* (Voltattorni et al., 2006).

En los últimos años, disciplinas como la Biología, Ecología, Agronomía, y ahora la Geología, se han dedicado a medir la exhalación de dióxido de carbono (CO₂) hacia la atmósfera a partir de fuentes individuales (naturales y antropogénicas) para estimar la

aportación global del CO_2 y establecer modelos más precisos para el ciclo del carbono a nivel mundial (Cardellini et al., 2003), debido a que el CO_2 es uno de los gases traza más abundantes en el efecto invernadero y el consecuente calentamiento global. Estos estudios de exhalación de dióxido de carbono se han desarrollado principalmente en las zonas agrícolas para medir la respiración del suelo, así como en zonas donde el CO_2 pueda derivarse de una estructura geológica a profundidad (Sanci et al., 2009). A la exhalación de dióxido de carbono, también se le conoce como flujo de CO_2 o flujo de salida (FCO_2) y se expresa en unidades de $[\text{masa} \cdot \text{área}^{-1} \cdot \text{tiempo}^{-1}]$.

V.1.3 Fuentes naturales del flujo de CO_2

De acuerdo a Kuzyakov (2006), *“Se pueden distinguir cinco principales fuentes biogénicas del FCO_2 . Estos son la respiración de la raíz, la respiración rizomicrobiana, el producto de la descomposición de residuos vegetales, la preparación de la tierra antes de sembrar por incorporación de residuos de plantas y por la descomposición microbiana de la materia orgánica del suelo”*. Sin embargo Chiodini et al. (1998), aseguran que *“El FCO_2 también puede liberarse a la atmósfera a partir de fuentes volcánicas activas y en reposo a través de fumarolas o emanaciones difusivas del suelo producto de la desgasificación magmática”*.

La importancia de los gases magmáticos va más allá de su rol en las erupciones volcánicas. Según Tilling y Punongbayan (1993) *“Las concentraciones de volátiles en los magmas basálticos en orden decreciente son los siguientes: CO_2 , H_2O , SO_2 , F, Cl, entre otros”*. Como se puede apreciar, el dióxido de carbono es el que se encuentra en mayor concentración; aspecto que nos permitirá marcar la pauta para el monitoreo de dióxido de carbono en los suelos del CVC por su composición andesítica-basáltica, es decir, que las anomalías de FCO_2 altos pueden relacionarse directamente con una desgasificación magmática y descartar su origen biogénico.

V.2 Aplicación en la Vulcanología

La aplicación de las mediciones del flujo de CO_2 es de gran interés para la Geología, debido a su potencial para identificar procesos geológicos profundos. Por ejemplo, se tiene el caso que describen Miller et al. (2004) en el que demuestran que *“Una serie de réplicas sísmicas que duraron cerca de 30 días en el norte de Italia fueron producidas por la liberación continua de CO_2 almacenado a 5 km de profundidad, causado por el fracturamiento de la roca almacén durante los eventos sísmicos principales; el posterior avance del gas hacia la superficie fue fracturando más roca y provocando dichas réplicas”*.

Camarda (2006) realizó mediciones de flujos de CO_2 al norte de la provincia de Messina, Italia y logró determinar la ubicación de una falla inversa con orientación NNW-SSE oculta por los depósitos volcánicos más recientes y que afecta incluso al basamento metamórfico del Paleozoico. Además, la presencia de emisiones submarinas de dióxido de carbono cerca de la playa de Fetente indica que esta estructura se extiende más allá de la línea de la costa.

Desde 1987, D'Alessandro et al. (1997) midieron los flujos de salida de dióxido de carbono para el Monte Etna (considerado uno de los volcanes más activos del mundo) obteniendo flujos de 1 Mt / año (~2,740 t / día) y mediante análisis de inclusiones fluidas en olivinos, determinaron que el CO₂ queda secuestrado a presiones de 7 kbar y 1,200°C. Posteriormente calcularon que los magmas del Monte Etna poseen un 0.7 wt% de CO₂, concluyendo que se requiere una producción de 0.7 km³ / año de magma para producir tal cantidad de dióxido de carbono.

Froncini et al. (2004) realizaron mediciones del FCO₂ en el Monte Vesubio en una superficie que abarcó 5.5 km² con 636 puntos de medición incluyendo flancos y cráter del volcán, obteniendo un FCO₂ de 151 t /día y concluyen que *“La morfología del cráter y la estratigrafía local ejercen un control directo sobre la difusión del CO₂”*. Además, consideran que *“El monitoreo constante del dióxido de carbono en terrenos volcánicos puede usarse como una herramienta para pronosticar erupciones volcánicas”*.

De acuerdo con Lewicki et al. (2005), *“Las mediciones del FCO₂ en suelos y su variabilidad natural y temporal en los entornos volcánicos y geotérmicos son importantes para la vigilancia volcánica, la exploración geotérmica y la delimitación de zonas de fallas y fracturas”*.

V.3 Descripción del método empleado

La técnica utilizada para medir el FCO₂ consiste en la determinación de la tasa de aumento de la concentración de CO₂ dentro de una cámara de acumulación que se coloca en la superficie del suelo. Esta técnica, conocida como método de la cámara de acumulación o de cámara cerrada, ha sido utilizada con éxito en las ciencias agrícolas para determinar la respiración del suelo y para medir el flujo en suelos de otras especies gaseosas, como el óxido nitroso (N₂O). Este método resulta ser la mejor manera de medir los valores del FCO₂ de carácter vulcanológico y geotérmico, ya que es un método absoluto, que no exige supuestos o correcciones en función de las características del suelo.

Sanci et al. (2009) describen los diferentes métodos que utilizan cámaras de acumulación, entre ellos el método de la cámara cerrada y de ciclo dinámico (empleado en el presente estudio), en el cual *“El aire circula entre la cámara y un analizador de gases infrarrojo externo –IRGA, por sus siglas en inglés– mediante un sistema de bombeo, y donde el aumento de la concentración de CO₂ en el tiempo es proporcional al FCO₂”*.

A continuación se enumerarán los pasos que deben completarse para realizar una medición de la tasa de incremento de la concentración de CO₂ en un punto de muestreo en campo:

1. Resulta de vital importancia que para evitar la contaminación de nuestro punto de muestreo por el CO₂ emitido por vehículos, se apague el motor de la camioneta y se aleje la cámara de acumulación de carreteras o caminos muy transitados o de la quema de pastizales.
2. Para evitar la influencia del CO₂ biogénico en la medición es necesario remover la capa de suelo más externa e insertar un tubo de PVC unido a la cámara de acumulación (deben de ser del mismo diámetro) y aislar las conexiones con un empaque o teflón, si es necesario.
3. Se deben realizar las conexiones de las mangueras de la cámara de acumulación, así como del puerto serie de la computadora hacia el analizador infrarrojo. Es importante crear el archivo del registro en la computadora desde antes de encender el analizador, debido a que si se hace después, se pierden los datos del principio.
4. Tomar las temperaturas ambientales y del suelo antes de comenzar el muestreo.
5. Encender el IRGA y esperar a que se encienda la luz verde que indica que ya se encuentra listo para empezar a medir.
6. Una vez encendida la luz verde, se pone en funcionamiento la unidad de flujo de gas integrada al IRGA, el cual permite que el aire exhalado por el suelo circule en un ciclo continuo entrando por la cámara de acumulación, pasando por las trampas de reactivos alcalinos que retienen el vapor de agua disuelto en el aire y posteriormente por el analizador infrarrojo, el cual mide la concentración en partes por millón de CO₂ cada segundo y después lo devuelve a la cámara de acumulación, reiniciado el ciclo.
7. Esta circulación del aire debe durar al menos de 3 a 5 minutos, hasta que el analizador haya alcanzado una cota máxima, que corresponde al valor del CO₂ ambiental.
8. Posteriormente, se inserta la cámara de acumulación con el tubo de PVC en el orificio escarbadado, asegurándose que no haya fugas para la circulación del aire. Deben pasar al menos 10 minutos con el sistema funcionando para alcanzar otra cota, correspondiente a la máxima concentración de CO₂ en el suelo.
9. Mientras pasan estos 10 minutos, se deben recabar los datos sobre temperatura ambiental, temperatura del suelo, presión atmosférica, altitud y posición geográfica mediante una unidad GPS.
10. Una vez realizadas estas tareas y completados los 10 minutos, se procede a tomar la lectura del valor máximo detectado por el IRGA y a extraer la cámara de acumulación del suelo para permitir que el analizador infrarrojo regrese a la medición original de concentración de CO₂ ambiental.
11. Cuando se alcanza este valor, se apagan los instrumentos y se cierra el software de la computadora para su posterior procesamiento. No es necesario seleccionar la opción de guardar nuevamente o se sobrescribirán los registros causando una pérdida de datos.

V.4 Estrategia de Medición en el Campo

Volcánico Chichinautzin

V.4.1 Selección del área de trabajo

La zona de estudio se eligió con base en el trabajo realizado por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008) en el que deciden trazar una retícula de 45 puntos formando un rectángulo que abarca casi por completo toda la extensión del Campo Volcánico Chichinautzin. La idea original de Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008) era crear una retícula con estaciones de trabajo equidistantes cada 10 km pero tuvieron que modificarla para mejorar el acceso a esos puntos mediante las vías de transporte existentes y accesibles mediante un vehículo “*todo terreno*” (**Figura 5.1**); sin embargo, durante los recorridos realizados para la recopilación de datos del presente estudio, algunas de las ubicaciones originales tuvieron que ser reubicadas dentro de un rango de 100 m debido a la incapacidad de llegar al punto exacto (nuevas construcciones, propiedad privada, zonas de barranca o zonas de alto peligro a orillas de la carretera; **Figura 5.1**).

Para llevar a cabo dichas mediciones, el trabajo de campo se dividió en dos temporadas: la primera entre el 3 de abril y el 2 de mayo del 2009; y la segunda, entre el 22 de marzo y el 2 de abril del 2010. Estas fechas se eligieron durante la temporada de estiaje para la zona de estudio, debido a que las mediciones realizadas en el 2005 por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008) fueron realizadas en la misma temporada y se busca hacer una comparación.

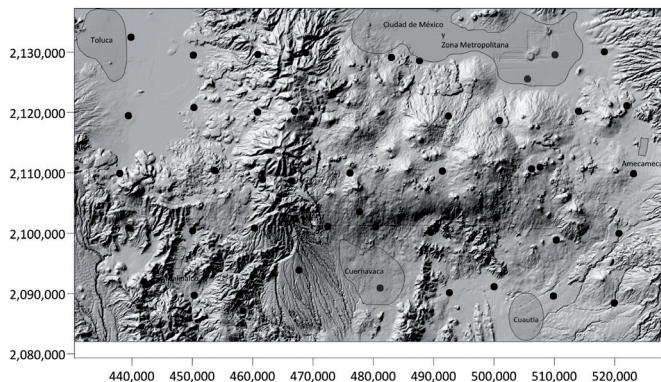


Figura 5.1: Distribución de los 45 puntos de medición en el CVC, basado en los puntos reportados por Delgado-Granados y Villalpando-Cortés (2008).

V.4.2 Instrumentación

El equipo utilizado para la medición de las concentraciones de CO₂ (**Figura 5.2**) en suelos del Campo Volcánico Chichinautzin consiste de:

- Analizador infrarrojo de CO₂ (IRGA) de la marca LI-COR® Inc. modelo LI-6252.
- Equipo de control de flujo de la marca LI-COR® Inc. modelo LI-670 que consiste en una bomba de flujo acoplable al analizador.
- Cámara de acumulación de la marca LI-COR® Inc. modelo 6000-09.
- Termómetro digital Fluke® con dos termopares para medir las temperaturas del suelo y ambiental.
- Computadora portátil con puerto y cable serial que registra los valores de las concentraciones de CO₂ en archivos de texto medidas por el analizador.
- Unidad GPS de mano marca Magellan® modelo eXplorist 210.
- Tres tubos de PVC de 10 cm de diámetro y longitudes de 15 cm, 30 cm y 50 cm.



Figura 5.2: Vista general de toda la instrumentación instalada en la estación de trabajo número 12. (A) Cámara de acumulación con tubo de PVC insertada en el suelo; (B) analizador infrarrojo de dióxido de carbono; (C) unidad de control de flujo acoplada al analizador infrarrojo; (D) computadora portátil conectada al analizador infrarrojo; (E) Termómetro digital con termopares.

Antes de comenzar la primera campaña de mediciones, el analizador infrarrojo se calibró el 27 de marzo de 2009 por personal del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y se le realizaron los cambios de reactivos el día 30 de marzo del mismo año por la misma dependencia. Para la segunda campaña de mediciones, la calibración del instrumento y cambio de reactivos se realizaron el día 17 de marzo del 2010 en las instalaciones del CENAPRED y del Instituto de Geofísica, respectivamente, pero por parte del autor del presente estudio.

V.4.3 Rutas de acceso

Para poder cubrir las 45 estaciones de trabajo de manera rápida y eficaz, se diseñaron 7 rutas continuas de un día de duración cada una, es decir, una semana de trabajo continuo y sin descanso permite recorrer todas las estaciones. A continuación se describen cada una de ellas:

Ruta 1- Roja: Parte de Ciudad Universitaria con dirección al Parque Nacional Los Dínamos hacia la estación número 45. A continuación, se desciende hasta el Anillo Periférico hasta tomar la Av. Picacho Ajusco para llegar a la estación de trabajo número 20 vía Toluca. Se continúa por la misma carretera hasta arribar a la estación de trabajo número 21, ubicada a un costado de la carretera. Continuando por la carretera a Xalatlaco, tomar la desviación a Chalma hasta llegar al poblado de La Esperanza, y posteriormente a la estación de trabajo número 34. A partir de La Esperanza, se debe de tomar el camino de terracería que lleva a Santiago Tianguistenco hasta arribar a la estación número 26. Salir de Santiago Tianguistenco por el oriente y tomar la carretera que lleva a La Marquesa hasta la estación número 22. Se continúa por la misma carretera tomando la desviación que lleva a Ocoyoacac – San Jacuzulco hasta llegar al poblado de San Pedro Cholula, donde se ubica la estación número 23. Finalmente, se debe llegar a Metepec, culminando con la estación número 24 y pernoctando en la ciudad de Toluca, Estado de México. Distancia recorrida: 130 km.

Ruta 2- Naranja: Partiendo de la ciudad de Toluca, se debe de avanzar hacia el Sur en dirección a la ciudad de Tenancingo de Degollado pasando por las estaciones número 25, 35 y 33. A partir de Tenancingo de Degollado, debe tomarse la carretera que lleva al Santo Desierto del Carmen para poder arribar a la estación número 36. Finalmente se debe regresar por el mismo camino hasta Tenancingo y tomar la desviación que lleva a Malinalco, pasando por la estación de trabajo número 32 y pernoctando en esta ciudad. Distancia recorrida: 109 km.

Ruta 3- Amarilla: Esta ruta inicia en el poblado de Malinalco y es la más larga de todas. Se parte con dirección a Chalma pasando por la estación de trabajo número 31 y posteriormente tomando la desviación a San Andrés hasta llegar a la comunidad rural de

Tlajotla, Morelos. Regresar por donde se llegó girando a la derecha en el entronque Malinalco – Chalma con dirección a Chalma, hasta llegar al poblado de Ocuilán de Arteaga donde se deberá de tomar la desviación de vuelta a Santiago Tianguistenco y posteriormente la salida hacia San Juan Atzingo hasta arribar en la estación de trabajo número 30. Una vez terminado este punto, se deberá volver por el mismo camino que se recorrió hasta el entronque de Ocuilán de Arteaga – Chalma y tomar la carretera con destino a Cuernavaca, Morelos. Al llegar al entronque, tomar la desviación hacia Buenavista del Monte hasta llegar a la estación 39. Regresar y seguir por la carretera hasta llegar a la ciudad de Cuernavaca, Morelos donde se deberá de avanzar al sur hasta la zona de la ciudad conocida como CIVAC, donde se realizará la medición en la estación número 38. Finalmente, tomar la autopista Cuernavaca – México con dirección a Tepoztlán, no sin antes detenerse en la estación de trabajo número 13 ubicada en una bahía lateral de la autopista y pernoctando en la ciudad de Tepoztlán. Distancia recorrida: 160 km.

Ruta 4-Verde: Esta ruta comienza en el poblado de Tepoztlán, donde se ubica la estación número 4 justo al pie del cerro del Tepozteco. Una vez realizado este punto, se deberá salir de Tepoztlán por la carretera libre a Yau-tepec, arribando en la estación número 5 antes de la entrada a este poblado. Posteriormente se deberá continuar por la carretera libre Yau-tepec – Cuautla con destino a Yecapixtla y posteriormente tomar la desviación a Xochitlán, pasando por las estaciones de trabajo 3 y 1. Después se debe regresar hasta la carretera Cuautla – Amecameca y avanzar hacia el norte hasta *la ruta de acceso* que lleva al poblado de Tlacotitlán, donde se realizará la medición del punto 2. Finalmente se deberá retomar la carretera Cuautla – Amecameca con dirección a la Ciudad de México, pasando por las estaciones número 16 y 9, y regresando hasta la Ciudad de México para pernoctar. Distancia recorrida: 117 km.

Ruta 5-Azul: Esta ruta es la más corta e inicia en la caseta de peaje de la carretera Chalco – Amecameca. Una vez pasada la caseta de peaje se deberá de tomar la desviación por debajo del puente hacia el poblado de San Martín Cuautlalpan, donde se llevará a cabo la estación número 8. Regresar e ingresar a Chalco para realizar la estación número 7. Tomar la salida de Chalco hacia Mixquic y realizar la estación número 44 en la entrada de este último poblado. Finalmente, regresar hasta la gasolinera y tomar la desviación con dirección hasta Temamatla donde se llevará a cabo la medición número 17. Distancia recorrida: 75 km.

Ruta 6-Morada: Esta ruta comienza al sur de la Ciudad de México en el Deportivo Xochimilco, a partir del cual se deberá viajar hacia el sur con dirección al poblado de Santiago Oztotepec, donde se llevará a cabo la medición número 43. Regresar al poblado de San Salvador Cuauhtenco y tomar la desviación que lleva al panteón y posteriormente al manantial de Tulmiac a través de un camino de terracería. Para

poder ingresar a esta zona del campo volcánico Chichinautzin es necesario portar identificación y oficios que lo acrediten como estudiante o investigador de la UNAM o el cuerpo de guardabosques le negará el acceso. Una vez que se haya llegado a Tulmiac, continuar el camino de terracería hacia el sur hasta llegar a los derrames del volcán Chichinautzin, donde se realizará la medición número 42. Regresar de nuevo hasta Tulmiac y tomar la desviación de terracería que lleva al poblado de Parres, donde se incorporará a la Carretera Federal México – Cuernavaca en dirección hacia el Sur, donde se encontrará con las estaciones de medición número 14 y 15 sobre la orilla de la carretera. Continuar sobre la Carretera Federal hasta el entronque con Huitzilac, donde se tendrá que desviar hacia este poblado pasando primero por la comunidad de Huertas de San Pedro, la cual alberga a la estación de trabajo número 27. Llegando a Huitzilac, se debe tomar la carretera con destino al Parque Nacional Lagunas de Zempoala donde se encuentran las estaciones de trabajo número 28 y 29. Regresar a la Ciudad de México por la Carretera Federal México – Cuernavaca. Distancia recorrida: 112 km.

Ruta 7-Negra: Esta ruta comienza cerca del H. Colegio Militar ubicado al Sur de la Ciudad de México, donde se lleva a cabo la estación de trabajo número 40. Después se tendrá que regresar por Viaducto Tlalpan hasta Periférico con destino a la Escuela Nacional de Artes Plásticas (ENAP – UNAM) donde se realiza la estación de trabajo número 45. De ahí, es necesario tomar la antigua carretera México – Oaxtepec con dirección a Milpa Alta, donde se realizará la medición número 19, a un costado de la carretera. Continuar por la carretera hacia Oaxtepec y salirse en el entronque CICITEC-IPN donde se llevará a cabo la medición número 12. Regresar y seguir por la carretera hasta el punto 18, ubicado a un costado de la carretera. Se debe seguir avanzando hasta llegar al poblado de Tlalnepantla, donde se lleva a cabo la medición número 11. Posteriormente, en el poblado de Oaxtepec se lleva a cabo la medición número 6. Finalmente, se debe volver hasta Tlayacapan, donde se toma la desviación hacia Totolapan, comunidad donde se lleva a cabo la medición número 10. Distancia recorrida: 102 km.

Debido a que es necesario mantener una constante vigilancia de los flujos de CO₂ en el CVC, fue que se diseñó este plan de monitoreo de 7 días, sistematizando la navegación y reduciendo los costos por duración de la campaña y complejidad de las vías de acceso.

V.5 Procesamiento de datos

El proceso de cálculo para obtener los flujos de salida de CO₂ se realizaron con base en el método propuesto por Gerlach et al. (2001) mediante el cual se toman a consideración las propiedades termodinámicas del dióxido de carbono, su tasa de incremento en suelo respecto al tiempo y una constante que depende de la cámara de acumulación, tal como lo muestra la siguiente ecuación:

$$F_{CO_2} = \left(\frac{P \cdot V}{R \cdot T \cdot A} \right) \left(\frac{dC_{CO_2}}{dt} \right)$$

donde:

F_{CO_2} , corresponde al flujo de salida de dióxido de carbono en unidades de flujo [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$].

P, corresponde a la presión atmosférica detectada dentro de la cámara de acumulación en [Pa].

V, es el volumen del sistema en [m^3].

R, es la constante molar de los gases en [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

T, es la temperatura de la cámara de acumulación en [K].

A, corresponde al área que ocupa la cámara de acumulación sobre el suelo en [m^2].

dC_{CO_2}/dt , corresponde a la tasa de incremento de la concentración de dióxido de carbono (C_{CO_2}) respecto al tiempo, después de haber sido colocada sobre la superficie del suelo.

Sin embargo, resulta importante destacar que para el cálculo de la tasa de incremen

to de CO_2 , es necesario graficar los valores obtenidos en campo de C_{CO_2} contra el tiempo (600 segundos) y posteriormente obtener el valor de la pendiente máxima (dC_{CO_2}/dt), tal como lo muestra la **Figura 5.3**.

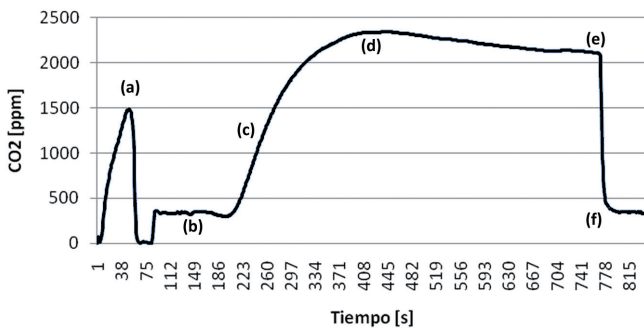


Figura 5.3: Gráfica de la estación N30 (2010) que muestra el patrón de comportamiento ideal durante el lapso de medición de las concentraciones de CO_2 . (a) Encendido del analizador infrarrojo (despreciable); (b) Inicio de la circulación del aire (se lee el CO_2 ambiental); (c) Inserción de la cámara de acumulación en el suelo; (d) Concentración máxima de CO_2 en suelo; (e) Extracción de la cámara de acumulación; (f) El analizador regresa al valor de CO_2 ambiental.

De esta forma y mediante la elaboración de tablas con el programa de paquetería Microsoft® Excel, se hizo el cálculo de los flujos para las 45 estaciones medidas en el CVC (ver resultados en el siguiente capítulo) durante las dos campañas de medición. Posteriormente, estos flujos obtenidos fueron cartografiados sobre un modelo digital de elevación adquirido de INEGI del área del CVC usando el programa Surfer® 9 en forma de isolíneas mediante la interpolación de "kriging" para visualizar geográficamente las principales anomalías de FCO_2 .

