

INFRAESTRUCTURA CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Uso de flujómetro de West System[®] y
elaboración de mapas con Wingslib[®]

Mariana Patricia Jácome Paz - Hugo Delgado Granados

1



Universidad Nacional
Autónoma de México

2022

INFRAESTRUCTURA CIENTÍFICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Uso de flujómetro de West System® y
elaboración de mapas con Wingslib®

Mariana Patricia Jácome Paz - Hugo Delgado Granados

1



Universidad Nacional
Autónoma de México

2022

Universidad Nacional Autónoma de México
Serie Infraestructura científica y desarrollo tecnológico.

Instituto de Geofísica
Unidad de Apoyo Editorial



Uso del flujómetro de West System® y elaboración de mapas con Wingslib®.

Mariana Patricia Jácome Paz - Hugo Delgado Granados

Editor académico: Peter Schaaf
Editora técnica: Andrea Rostan Robledo
Diseño: Vanesa L. Gómez Vivas

Primera edición: 2022
DR. © Universidad Nacional Autónoma de México.

Unidad de Apoyo Editorial
Instituto de Geofísica
Av. Universidad 3000 Universidad Nacional Autónoma de México.
Col. Copilco-Universidad, Delegación Coyoacán,
C. P. 04360 México, D. F.
Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria.
Teléfono: 01 (55) 56224115

ISBN 978-607-30-6475-0

Prohibida la reproducción parcial o total por cualquier medio, sin autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales. Se permite la reproducción total o parcial citando la fuente.

Hecho en México

Contenido

Introducción	9
Breve descripción del estudio de CO ₂ en sistemas volcánicos	9
Sensores de gases.....	10
Sensor IR.....	10
Temperatura de la celda.....	11
Sensor electroquímico.....	11
Cámara de Acumulación.....	11
Tubos.....	12
PALM / PDA (Personal Digital Assistant).....	12
Temperatura, GPS y Presión.....	13
Mantenimiento	13
Baterías del flujómetro	13
Baterías de la PDA y del ventilador	13
Filtros	13
Trampas de humedad	14
Proceso de Verificación y Calibración	15
Calibración de los sensores	15
Sensores LICOR de diferentes longitudes.....	18
Algunos aspectos del controlador de Flujo.....	19
Recalcular el flujo de cada componente.....	21
Gráfica e interpolación.....	22
Uso en el campo	22
La lista que no hay que olvidar	22
Elección de lugares de medición.....	23
Breve Descripción del Método en cada punto	23
Solución de los problemas más comunes en campo.....	24
Procesamiento	25
Obtención de Datos	25
Análisis con Flux Revision	25
Cálculo del flujo	26
Análisis Estadístico	27
Herramientas estadísticas	28
¿Cómo hacer mapas con Wingslib®?.....	28
Botones básicos del programa.....	29
Archivos de datos.....	30
Histograma	30
Mapa de ubicación	31
Gráfica de probabilidad acumulada.....	31
Transformación “Normal Score”	31
Variograma Experimental y Teórico	31
Simulación gaussiana.....	33
Post Proceso	34
Primera visualización del mapa en Wingslib®.....	34
Realización del mapa en Surfer®.....	34
Construcción de un grid Surfe®r directamente.....	34
Construir un grid de Surfer® indirectamente	35
Conclusiones	35
Agradecimientos	36
Referencias	36
Lecturas Recomendadas	36

Introducción

Este manual está realizado con base en la experiencia de los autores en el uso del equipo en el campo y a la teoría aprendida en el curso *Uso y calibración del Flujómetro portátil de West System®* realizado en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), en Heredia, Costa Rica del 16 al 23 de mayo del 2011; Impartido por Davide Continanza y Mattia Menichi de West Systems, Pontedera (PI), Italia e IGG (Institute of Geoscience and Georesource), CNR, Pisa Italia: El objetivo del curso fue enseñar el uso correcto y calibración del flujómetro con fines de monitoreo vulcanológico.

Este manual está dirigido a usuarios del flujómetro de West System®, para ser usado como complemento del manual editado por West System® y que acompaña cada equipo que se adquiere.

El manual se puede descargar en línea en:
<https://www.westsystems.com/download/>

Breve descripción del estudio de CO₂ en sistemas volcánicos.

Los gases volcánicos salen hacia el exterior a través de tres procesos principalmente, las emisiones directas del cráter por la pluma o por fumarolas; disueltos en acuíferos y, por lo que se conoce como emisión difusa. La emisión difusa de un volcán consiste en la emisión de gases a través de toda su superficie. En general, está ligada a zonas de alta permeabilidad del edificio volcánico (Baubron *et al.*, 1990; Giammanco *et al.*, 1997; Chiodini *et al.*, 1998).

Es importante hacer notar que se le ha llamado “flujo difuso” a la desgasificación total del suelo; que de manera específica combina diversos procesos como la difusión y la advección a través de todo el edificio volcánico, (no se consideran en la emisión difusa la pluma volcánica y las fumarolas) (López *et al.* 2004. Chiodini *et al.* 1998), indica que los flujos bajos son dominados por el proceso de difusión y los flujos altos por el proceso de advección.

Las emisiones difusas consisten principalmente en H₂O, CO₂, y gases nobles (He, Ar y Rn) a veces diluïdos con N₂ y O₂. Los flujos volcánicos difusos más importantes son CO₂, He y Rn (Baubron *et al.* 1991). El CO₂ es un indicador de actividad profunda y es considerado como un parámetro fundamental del monitoreo volcánico (Baubron *et al.*, 1990; Chiodini *et al.*, 1998). La aportación de las primeras publicaciones de emisiones difusas era poner en la mesa del monitoreo volcánico evidencia de que la desgasificación pasiva y continua de un volcán arroja información sobre

la dinámica del sistema y el origen de los fluidos que emanan.

Actualmente los flujos de las emisiones difusas son utilizados en pro de: obtener el flujo total del área de estudio, determinar la desgasificación base de un volcán con el fin de poder detectar cambios en la desgasificación, obtener la distribución espacial de los flujos y con ello las direcciones de las principales estructuras de desgasificación, verificar la actividad de fallas geológicas cercanas al volcán y correlacionar las magnitudes de los flujos con la actividad volcánica (e.g. Giammanco *et al.*, 1997; Salazar *et al.*, 2001; Chiodini *et al.*, 2001; Rogie *et al.*, 2001; Cartagena *et al.* 2004; Mazot y Taran, 2009; Pérez *et al.*, 2012; Inguaggiato *et al.*, 2013;).

Teoría del funcionamiento del equipo

El principio del sistema West System® está basado en el proceso de difusión de los gases y en el principio de la cámara de acumulación (Chiodini *et al.* 1998).

El suelo tiene mayor concentración de gas que la atmósfera, esto quiere decir, que naturalmente, por el principio de difusión o ley de Fick se tiene un flujo de gas de subsuelo hacia la atmósfera.

$$\phi = -D \nabla C$$

Donde ϕ es el flujo, D es el coeficiente de difusión de la sustancia en cuestión y ∇C es el gradiente de concentración de la misma sustancia. El flujo va en la dirección de la menor concentración, como pretendiendo alcanzar un equilibrio y homogeneizar el sistema.

Lo que pretende este aparato es colocar un “medidor en el camino del flujo de gas” sin perturbarlo, solo cuantificarlo y dejarlo ir hacia la atmósfera. Es decir, el flujo permanece homogéneo, isobárico e isotérmico. Y la técnica no es destructiva.

Flujómetro

El flujómetro consiste en una bomba que transporta el aire de la cámara de acumulación hacia los sensores y luego lo hace salir de nuevo hacia la cámara de acumulación (Fig. 1). Con esto, la concentración de CO₂ va aumentando al mismo ritmo que es emitido del suelo. El cambio de concentración en el tiempo dentro de la cámara de acumulación es proporcional al flujo de salida del suelo del gas. El proceso ocurre a presión atmosférica.

Las virtudes de este equipo son el uso de muestras de pequeño volumen y la portabilidad del sistema.

Sensores de gases

Dependiendo del analito gaseoso que interese monitorear, se tienen diferentes sensores.

Para CO_2 y CH_4 se tiene un sensor infrarrojo (IR). Para H_2S se tiene un sensor electroquímico. Para SO_2 se tiene un sensor IR pero todavía está en la fase experimental.

Los rangos de medición y detalles técnicos de cada sensor son:

- Sensor IR de CO_2 con rango de medición de 0 a 20 000 ppm, con errores entre 5 – 10 % dependiendo del valor de flujo.
- Sensor IR de CH_4 con rango de medición de 60 a 50 000 ppm.

Con una resolución de 22 ppm y un error entre 10 – 25 % dependiendo del valor del flujo. Este sensor tiene una deriva (drift) debido a sensibilidad del sensor a presión y temperatura, por lo tanto, el valor de esta deriva es aproximadamente 0.086 ppm/seg para una presión de 1013 bar y 26°C durante la medición

El sensor de metano es sensible a otros hidrocarburos (metano, hexano, propano, etc.) No es un sensor selectivo, por lo tanto, no es posible asumir que la medición que reporta el instrumento sea enteramente metano. Se sugiere tener información extra que indique la posibilidad de encontrar o no otros hidrocarburos en la zona de estudio.

El sensor de metano tiene una deriva en el tiempo por lo que es necesario fijar periódicamente el cero en aire donde no hay presencia de ningún hidrocarburo. Mientras más tiempo pase sin medir el sensor mayor puede ser esta deriva; por lo tanto se sugiere realizar esta operación cada vez que se usará en campo el instrumento (una vez dentro del software Flux Manager se usa la opción SET ZERO para esta operación).

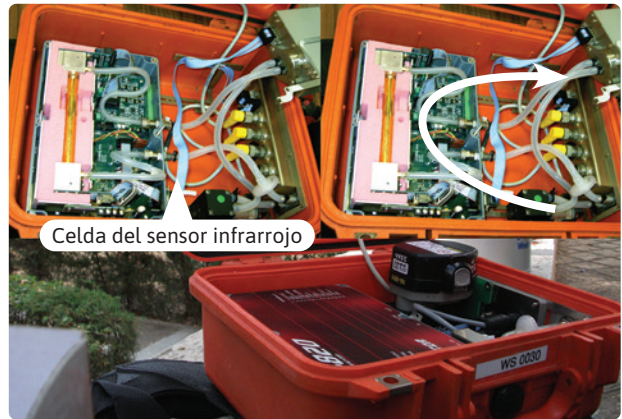


Figura 1. Vista general del equipo y de la ubicación del espectrómetro IR.

Sensor IR

El sensor IR se basa en la propiedad que presentan las moléculas, como H_2O y CO_2 , que absorben radiación infrarroja, debido a que las frecuencias de vibración de sus enlaces son del orden de las longitudes de onda del espectro IR, por lo tanto absorben y reemiten radiación en todas las direcciones (Doménech, 2000). Es decir, cada molécula absorbe una fracción de la radiación que incide sobre ésta y estas franjas de absorción caracterizan a las moléculas de forma única.

Con base en esto se han construido instrumentos que ayudan a identificar la existencia de CO_2 en una muestra de gas. En general, los espectrómetros de IR para el CO_2 son de doble canal, es decir, dos secciones de la celda por donde pasa el gas (Fig. 1). Hay una fuente que produce un espectro de radiación en cierto rango; que pasa por las dos celdas o secciones. Por ambas secciones se hace fluir el CO_2 .

El espectrómetro es de doble canal (Fig. 2), por una sección se hace pasar un rango de radiación en el que absorbe el

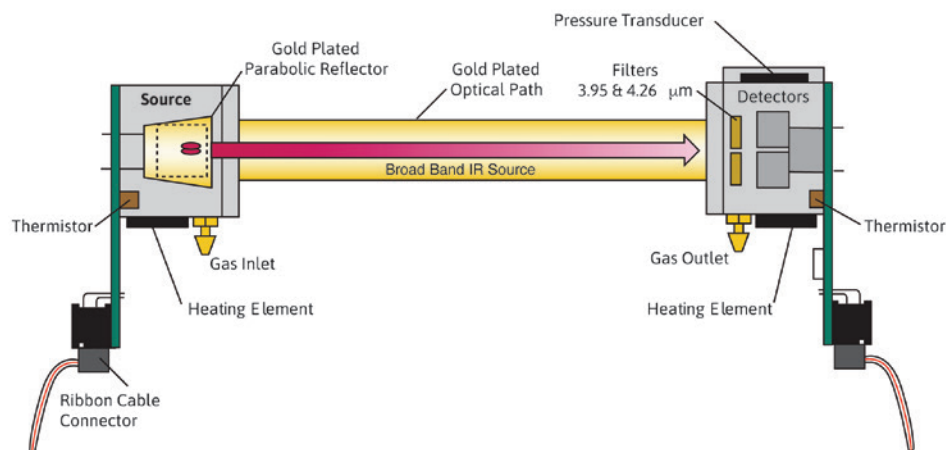


Figura 2. Esquema de funcionamiento del espectrómetro IR. (Tomada del manual oficial West system)

CO₂ y por la otra sección un rango en que no hay absorción por parte del CO₂.

Al activar el proceso, una muestra del gas absorbe cierta cantidad de la radiación IR y la otra no. En el detector se obtiene esta diferencia y con esto se obtiene el total de CO₂ en la muestra. Esta medición se hace cada segundo.

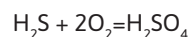
Temperatura de la celda

La celda de infrarrojo trabaja a una temperatura de 50 ± 2°C. La celda se debe calentar debido a que el rayo de luz infrarroja necesita una fuente térmica para ser emitido. El proceso es isotérmico, puesto que el flujo que el instrumento despliega en las mediciones considera este factor de temperatura y arroja el valor corregido. Si la muestra realmente se calentara en este proceso, ya no se podría considerar como isotérmico el proceso y el cálculo del flujo sería diferente, puesto que se tendría que considerar este cambio de temperatura en el sistema.

Sensor electroquímico

Sensor electroquímico de H₂S con rango de medición de 0.2 a 200 pm. Con error entre 5 – 10% dependiendo de la cámara de acumulación utilizada. Este sensor también presenta sensibilidad cruzada con otros elementos como SO₂, NO, NO₂, Cl₂, H₂, CH₄, CO, NH₃ arrojando errores que van desde – 2.50 hasta 1.60 ppm en las concentraciones de H₂S.

El sensor electroquímico hace el conteo del H₂S con base en una reacción química inducida (Fig. 3).



El residuo de H₂SO₄ queda circulando en la cámara de acumulación. Si no se usa la septa de la cámara de acumulación para tomar muestra este residuo no afecta en.

Sin embargo hay que considerar lo siguiente: cuando se está midiendo directamente H₂S la podría haber una ligera subestimación del flujo de H₂S ya que una mínima parte se esta transformando en H₂SO₄ por medio de la reacción descrita.

Para verificar el buen funcionamiento de dicha cámara se debe hacer una medición periódica de control regulando el flujo de entrada. Se recomienda usar un flujo conocido de 10 – 20 ppm /segundo de H H₂S.

También es importante saber que si el sensor lee una concentración inferior a 0.2 ppm, se puede considerar 0 ppm. Por ejemplo, si el sensor muestra una concentración de 0.19 ppm de H₂S podría mostrar de igual manera 0 ppm; no puede leer diferencia entre estas dos concentraciones ya que no tiene esa resolución.

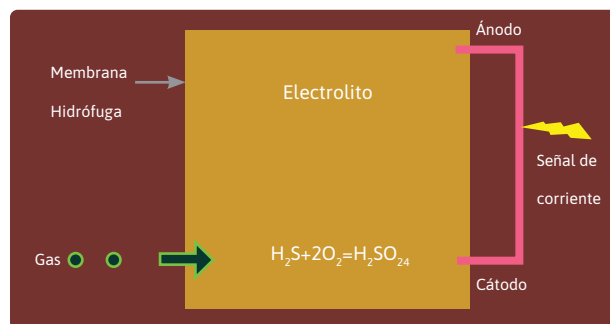


Figura 3. Esquema del sensor electroquímico.

Los sensores electroquímicos son clasificados como celdas de combustión, donde tiene lugar un proceso de conversión de energía química a energía eléctrica; puede haber de dos o tres electrodos. Cuando las moléculas del gas del exterior ingresan, se produce un proceso de óxido-reducción, cerrando el circuito entre ánodo y cátodo. Los electrones libres producidos pueden ser medidos con un circuito eléctrico, la señal de la corriente generada es proporcionalmente lineal con la cantidad de gas que ingresa a la celda. El H₂S no es el único gas que produce señal, incluso la presencia de determinados gases puede invertir los procesos de óxido-reducción obteniendo medidas negativas (Sagarra, 2011).

Es importante hacer una re-calibración periódica, puesto que la celda de este sensor puede dejar de funcionar. Tiene una vida teórica de 5 años, pero puede ser afectada antes dependiendo de su uso.

Si en una campaña de campo no hay mucho interés en medir el flujo de H₂S, es recomendable desconectar el sensor del circuito para evitar el desgaste innecesario de la celda.

Cámara de Acumulación

Hay tres tamaños de cámara de acumulación. Si se va a medir en zonas con flujos bajos conviene usar la cámara A, que es la de menor volumen, en cambio si se va a medir en zonas con flujos altos conviene medir con la cámara B, de mayor volumen. Esto con el fin de que haya más sensibilidad a la baja concentración en el primer caso y de que no haya saturación tan rápido en el segundo caso. La cámara C es la más grande y ancha, se usa para medir flujos en cuerpos de agua como lagos, donde se necesita que la cámara sea estable y no se voltee sobre su costado con el oleaje; además se usa con un flotador.

Si se está utilizando el detector de metano conviene usar la cámara A porque el tiempo de respuesta de este detector es lento.

Para el buen funcionamiento de la cámara de acumulación lo que se debe considerar es:

1. El correcto funcionamiento de la válvula que regula la presión. Dicha válvula permite la salida del gas que entra, esto para que la presión sea la atmosférica. Así no se perturba el flujo natural por advección ni se acumula demasiada presión en la cámara (Fig. 4).
2. Ventilador y su batería. Este factor es muy importante, puesto que con esto se garantiza la homogeneidad del sistema.
3. El septum. Está solo en algunos modelos de cámaras, permite tomar una muestra del gas mientras se toma la medición. Este proceso puede afectar el gradiente de concentración entre la atmósfera y el suelo, por lo tanto es recomendable no considerar la medida de flujo hecha mientras se toma la muestra. O tomar la muestra una vez fijada la pendiente de ese flujo.

Tubos

La mayor parte de los tubos del equipo son de teflón o de silicón (silicone tube).

Los tubos de silicón son más permeables a gases que los de teflón. En tiempos largos, se puede tener una pérdida

por difusión a través de las paredes de estos tubos, sin embargo, dicha pérdida no es motivo de preocupación dada la corta duración de las mediciones (~ 60 segundos). Los tubos de las trampas de humedad y los que conectan la bomba a los sensores son de silicón (Fig. 5).

Las mangueras que conectan la cámara de acumulación con el flujómetro son tubos de teflón, los cuales son más



Figura 5. Vista de mangueras utilizadas en el equipo. Dentro del equipo, de silicón (arriba) y mangueras externas de teflón (abajo).

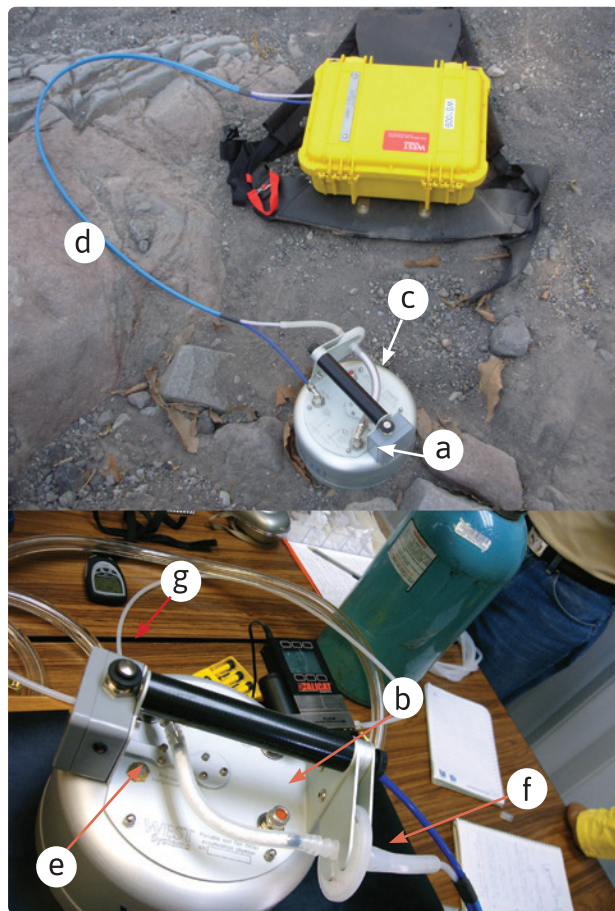


Figura 4. Vista de las partes de la cámara de acumulación. a) Baterías del ventilador, b) Septa de muestreo, c) Trampa de humedad, d) Mangueras de conexión al equipo, e) válvula reguladora de la presión dentro de la cámara, f) filtro, g) botón de prendido y pagado del ventilador.

rígidos y permiten menos la salida de gases. Como parte del buen funcionamiento del equipo hay que cuidar que no haya ningún orificio en estas mangueras. Si se va a medir en terreno donde puedan sufrir daño (rocas filosas, cactáceas, etc), se recomienda recubrirlas con algún material que las proteja.

PALM / PDA (Personal Digital Assistant)

Inicialmente el equipo se controlaba por medio de un dispositivo PALM, actualmente se puede controlar desde cualquier dispositivo móvil que tenga sistema operativo Windows, ya que éste permite la instalación del software Flux Manager. A este dispositivo, de forma genérica se le identificará con las letras PDA.

En la PDA se encuentran incluidos los programas Flux Manager y Calibra. Con el software Flux Manager se controla el equipo para hacer las mediciones de CO_2 , H_2S , CH_4 y SO_2 . Con el programa Calibra se hace la calibración de los sensores de H_2S , CH_4 y SO_2 . (El programa para calibrar el sensor infrarrojo LI-COR de CO_2 se debe instalar directamente en PC y viene en un disco junto con las herramientas de mantenimiento del espectrómetro) o se puede descargar de la página <https://www.westsystems.com/download/>.

Para fines de registro es importante anotar la hora y la fecha exacta en la PDA para que los archivos de medición se graben con estos datos correctos, puesto que la estructura de un nombre de archivo guardado es:

Sitename_pointname_date_time.txt

La forma de sincronizar correctamente estos datos dentro de la PDA es, dentro del programa Flux Manager, seguir la ruta:

Clock→GPS →GPS time

En ese menú hay que elegir →GET synchronise

Temperatura, GPS y Presión.

Algunos modelos de PDA tienen integrado el GPS, en caso contrario hay que tener un GPS externo al momento de las mediciones.

Para calcular el flujo de los gases es necesario considerar la presión y la temperatura. La presión es tomada cuando la bomba está apagada. El barómetro está incluido en el sensor LI-COR; por tanto, si se tiene el sensor de CO₂ ya no es necesario llevar un barómetro externo. Cabe hacer notar que las mediciones de presión se hacen aproximadamente cada 15 minutos; es decir, si se está trabajando en un terreno que cambia de altura muy abruptamente quizá estos cambios de presión atmosférica no se consideren dentro de la tabla de datos. Además de que cualquier variación en la presión debida al viento no es considerada, por lo que se recomienda también llevar un barómetro y un anemómetro externos.

La temperatura está incluida en el detector de metano, sin embargo ésta no es muy exacta, varía hasta $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Se sugiere llevar un termómetro externo para poder hacer esta corrección a los datos de campo. Si no se tiene el detector de metano incluido en el equipo, debe llevarse un termómetro externo siempre.

Mantenimiento

A continuación se describen los accesorios a los que se les aplica mantenimiento.

Baterías del flujómetro

El equipo incluye dos baterías. Se recomienda no guardar el equipo con las baterías conectadas. En caso de querer corroborar la carga de las baterías, sin necesidad de encender el equipo (se puede ver la carga por medio de la PDA), utilizar un voltímetro midiendo el voltaje directo del pin 1 y pin 4 del cable de las baterías. Se mide el voltaje en DC. Lo ideal es tener 16 volts cuando está 100% cargada. Con esto sólo se puede checar la carga de la batería pero no lo potencia. Aunque comprobemos la carga de la batería, esto no descarta la posibilidad de que la batería esté en mal estado y que su velocidad de descarga sea muy alta (Fig 6).



Fig. 6. Esquema de los pines de la batería principal del equipo. Los pines 1 y 4 son los que se deben usar para ver la carga de la batería con multímetro (tomada del manual oficial West System).

Es recomendable hacer ciclos de carga-descarga en las baterías cuando se les va a dejar mucho tiempo sin usar (i. e. 6 meses). Los ciclos se ejecutan prendiendo el equipo y dejando que se agote la batería hasta que se apague por sí solo. Esto se hace por lo menos un par de veces con cada batería. El objetivo es darles mantenimiento a las baterías para un mejor rendimiento cuando las baterías se vuelvan a usar.

Baterías de la PDA y del ventilador

Para la batería de la PDA es recomendable tener un repuesto, ya que sólo viene una incluida y en general se agota antes que las baterías del flujómetro; las baterías específicas dependen del modelo de dispositivo móvil. Actualmente, la mayoría de los dispositivos móviles se pueden cargar con pilas extras portátiles de entradas USB a mini USB

La batería del ventilador no viene incluida en el equipo, es de 9 volts. Si se usan baterías recargables, hay que cargarlas y descargarlas, como en el caso anterior, cuando el equipo se quede mucho tiempo sin uso. En caso de usar baterías comunes, retirarlas del equipo.

Filtros

Los filtros deben limpiarse entre campañas. Los filtros tienen la función de impedir el paso de polvo al sistema, por lo tanto su vida útil dependerá de que tanto polvo hayan atrapado. Cuando tienen ya mucho polvo el cambio de color es evidente, ya no se ven blancos, sino ligeramente pardos (Fig. 7).

En este caso hay que cambiarlos y revisar constantemente el filtro de la campana y el filtro que se encuentra junto a la bomba del flujómetro (Fig. 8).

Además, si los filtros están muy sucios, la bomba hará un sonido diferente al trabajar. Esta forma de detectar la necesidad de un cambio puede ser más complicada pues amerita atención auditiva de nuestra parte.



Fig. 7. Comparación entre dos filtros, uno usado y el otro nuevo.

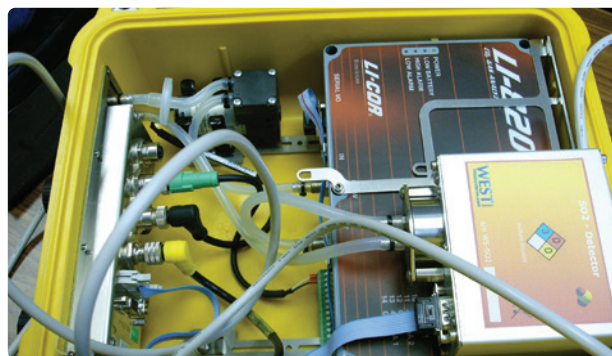


Fig. 8. Vista del filtro que se encuentra junto a la bomba al interior del equipo.



Fig. 9. Vista trampa de la humedad de la cámara de acumulación.

Trampas de humedad

Las trampas de humedad tienen por objeto evitar el paso del agua al sistema, esto porque se puede dañar el sensor en caso de pasar mucha humedad hacia adentro. No se recomienda medir en suelos mojados o durante la lluvia, porque se afecta la permeabilidad del suelo, se puede dañar el equipo y porque el vapor de agua absorbe en la misma región que el CO_2 .

La trampa de humedad está en la cámara de acumulación del equipo (Fig. 9). Se recomienda usar solo ese volumen de trampa para no afectar el volumen total utilizado durante la calibración (cámara de acumulación más mangueras externas e internas del equipo), o en su caso, si se va a optar por un mayor o menor volumen para la trampa, se recomienda colocarlo en el sistema antes de la calibración (solo el volumen de tubo, no del deshidratante).

Para la trampa de humedad se pueden usar varios deshidratantes, por ejemplo: perclorato de magnesio, silica gel o drierita.

El perclorato de magnesio absorbe la humedad y la forma de verificar su saturación es observando su endurecimiento y pérdida de movilidad dentro del tubo. El perclorato dura más que gel de silica.

El perclorato de magnesio es una sustancia inflamable y explosiva, por lo que hay que extremar precauciones. No

se debe usar este deshidratante si se esperan altas concentraciones de metano.

Su inhalación prolongada y en grandes concentraciones, es tóxico. Esto no quiere decir que no se puede utilizar en el campo, solo que hay que tener ciertas precauciones con la sustancia. Para rellenar los tubos de repuesto hay que usar guantes y tapabocas, evitando el contacto con la piel y hay que procurar que el frasco de perclorato o los tubos nunca estén cerca de muy altas temperaturas.

Por estas características en algunos países su uso es ilegal o restringido, razón por la que hay que informarse antes de viajar a otros países.

El silica gel absorbe la humedad también, pero se satura más rápido. El cambio en coloración indica esta saturación, adquiriendo un color morado.

La drierita dura más que la silica gel. El cambio en la coloración indica saturación, cambia de azul a rosa y una gran ventaja es que si se calienta, se deshidrata y puede volverse a usar.

Las sustancias hay que checarlas periódicamente. Al salir a campo con el equipo, es importante llevar tubos de repuesto y deshidratante en un frasco por separado.

Se recomienda hacer algunas pruebas con el equipo con trampa de humedad y sin trampa de humedad, pero con el mismo volumen total (cámara de acumulación más mangueras internas externas). Esto para ver la influencia del deshidratante. Además muchas veces, si se coloca mucha sustancia y apretada, se puede tener poca permeabilidad en el tubo y con eso afectarse el flujo que se mide. Es recomendable llevar siempre un tubo sin sustancia que pueda ser colocado en esta parte del equipo en caso de que el problema sea la permeabilidad del deshidratante que sirve como trampa de humedad.

Proceso de Verificación y Calibración

Se debe calibrar el equipo por lo menos 1 vez al año y de preferencia antes de salir al campo, o antes de la temporada de campo. Por lo general, el equipo no se utilizará durante la temporada de lluvias, por tanto, se recomienda calibrarlo justo cuando se termina esta temporada en que no se usa, para que no pase tanto tiempo entre la calibración y el uso del equipo.

Para minimizar errores de medición, es recomendable checar la calibración cada vez que se vaya a salir a campo. La forma de checar la calibración es corroborando la curva de calibración (se explica más adelante).

Se recomienda iniciar una bitácora donde se anote el historial de calibraciones de cada sensor.

En el caso de un equipo donado o un equipo cuya historia se desconoce (el estado de sus sensores o calibraciones previas); conviene hacer una primera calibración antes de utilizarlo en campo por primera vez.

Calibración de los sensores

Se calibran sin el deshidratante de la trampa de humedad. Se debe hacer en un laboratorio con baja humedad relativa pues la calibración puede ser afectada este factor. Para un mayor control se recomienda registrar el grado de humedad que se tenga al momento de la calibración.

La calibración de los sensores considera dos puntos de calibración, un cero y otro cercano al 100% (i. e. 75%). En los programas de calibración de los sensores éstos se denominan ZERO y SPAN respectivamente. En el sensor de H₂S el valor de SPAN es 20 ppm, en el de CH₄ 2500 ppm y en el de CO₂ es 20000 ppm o 2000 ppm, dependiendo del sensor adquirido en LI-COR (el fabricante vende estos dos, aunque el más usual es el de 20000 ppm).

El punto ZERO para cualquiera de los sensores se hace con nitrógeno. También se puede hacer con una trampa de CO₂. En el caso del CO₂ basta con adquirir otro cilindro de concentración entre 15000 y 20000 ppm para el SPAN.

Prever una batería completamente cargada para la calibración, con el fin de contar con energía para culminar el proceso de calibración.

Procedimiento:

1. Encender el flujómetro con la PDA.
2. Desconectar el sensor LI-COR y conectar el flujómetro a una computadora con un cable serial RS232 (Fig. 10). Abrir el software de calibración del sensor LI-COR. (File → conect)

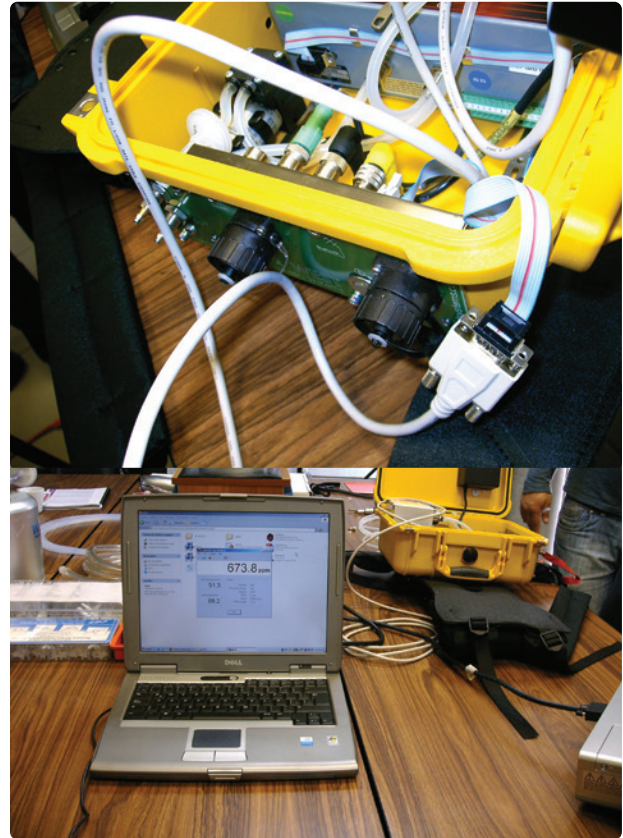


Fig. 10. a) Detalle de la conexión serial RS232 b) Vista general de la conexión entre la computadora y el flujómetro para iniciar la calibración.

3. Se observa en pantalla la ventana inicial para iniciar la calibración (Fig. 11).
4. Una vez que se tiene comunicación entre la computadora y el equipo se abre en la barra superior la opción view y se elige calibra en el menú (Fig. 12). View → Calibra.
5. Luego se procede con las bolsas tedlar y los estándares de los diferentes gases. Para iniciar se hace vacío

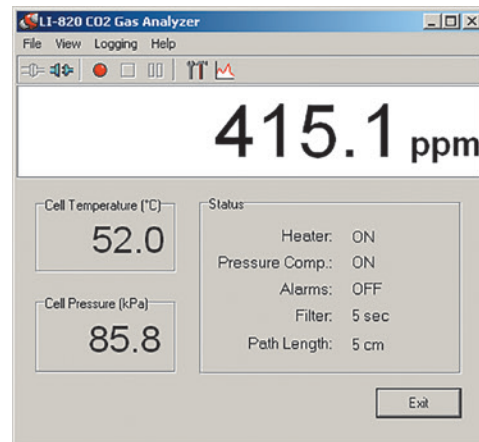


Fig. 11. Pantalla de guía para iniciar proceso de calibración. Se observa la lectura de la concentración, la temperatura y presión de la celda.

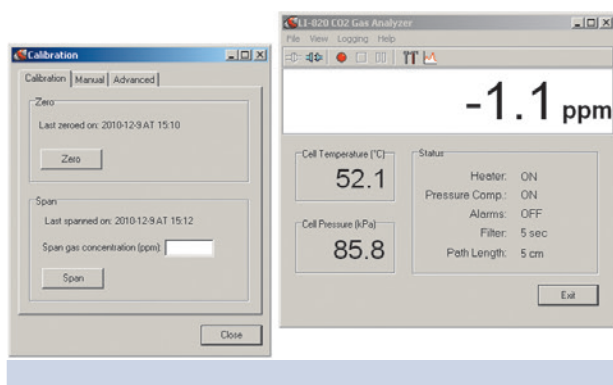


Fig. 12. Pantallas del software Calibra.



Fig. 13. Conexión entre la bolsa y el equipo.



Fig. 14. Vista de la bolsa conectada al equipo.



Fig. 15. Vista de una de las bolsas utilizadas e identificadas.



Fig. 16. Vista del controlador de flujo Praxairi.



Fig. 17. Conexión entre la bolsa y el cilindro.

- en una de las bolsas; esto se hace conectando la bolsa en la entrada del flujómetro (Fig. 13 y 14); y ya que la bomba estará prendida, inmediatamente aspirará todo el aire contenido en la bolsa y quedará vacía.
- Es importante que siempre se use la bolsa para la misma concentración por eso conviene escribir en la bolsa directamente "CO₂ al 20000 ppm" o "Nitrógeno", de acuerdo con el cilindro que se vaya a usar (Fig. 15).
 - Se procede a llenar la bolsa con el cilindro correspondiente. Se conecta la bolsa con la válvula del controlador cerrada (Fig. 16). Se abre la válvula y se procede a llenar abriendo la respectiva llave del controlador de flujo.

- Es importante notar que la conexión entre el controlador de flujo y el cilindro con la bolsa es doble (tiene doble manguera; una manguera de diámetro menor dentro de la manguera exterior) para evitar todo tipo de fugas (Figs. 17 y 18).
- Una vez que la bolsa está llena (no a un 100% para evitar el riesgo de que se reviente), se conecta al flujómetro con la válvula cerrada inicialmente. Las bolsas conviene llenarlas y usarlas rápidamente para evitar que el gas se contamine y ya no nos sirva (Fig. 19).
 - Se abre la válvula de la bolsa y se espera a que el valor en la pantalla se estabilice y se fija el ZERO con el botón que dice ZERO (Fig. 20).



Fig. 18. Acercamiento de la conexión hacia el cilindro.



Fig. 19. Conexión entre la bolsa y el flujómetro.

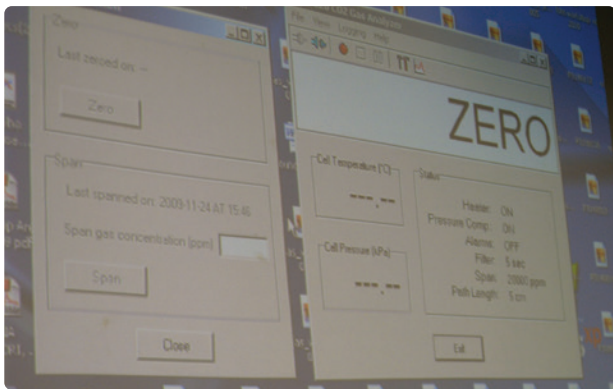


Fig. 20. Vista de la pantalla donde se fija el ZERO.

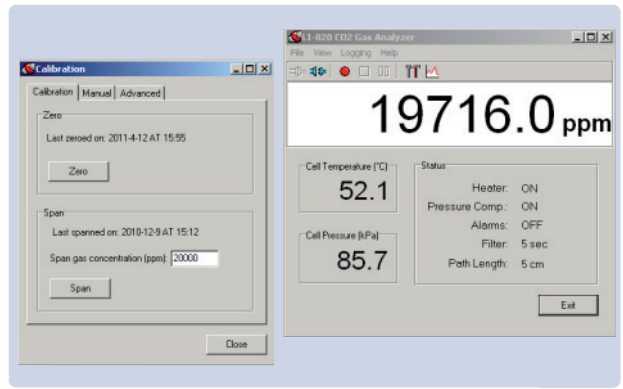


Fig. 21. Acercamiento de la pantalla donde se escribe el valor de SPAN.

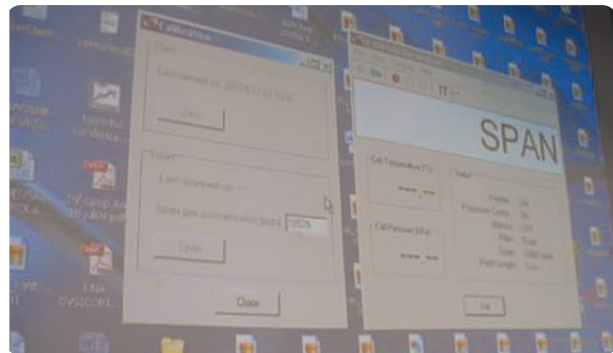


Fig. 22. Vista de la pantalla donde se fija el SPAN.

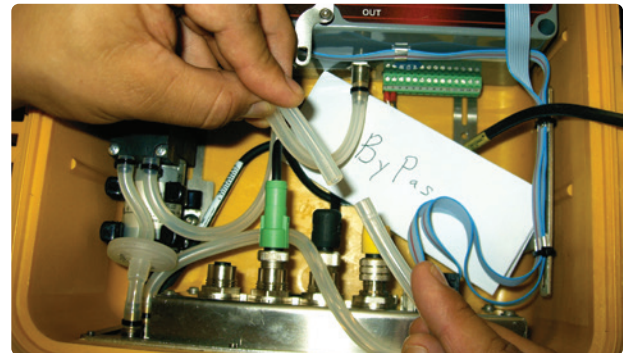


Fig. 23. Si se quisiera dejar fuera al sensor de H₂S para no desgastar la celda electroquímica, se tendría que conectar directamente el LICOR a la bomba como se muestra en la imagen. Se usan las mangueras enteras para no alterar el volumen total.

10. Luego se procede a hacer lo mismo con otra bolsa, pero esta vez con la concentración que nos dará el SPAN.
11. La única diferencia con el procedimiento descrito para el valor ZERO es que después de hacer el vacío en la bolsa y llenarla con la concentración correspondiente es que en el programa se debe ingresar el valor de concentración de CO₂ (Fig. 21)
12. Una vez ingresado el valor se procede a conectar la bolsa, abrir la válvula y esperar a que el valor se estabilice para fijar el SPAN con el botón que dice SPAN (Fig. 22).

Una vez calibrado el equipo conviene hacer el menor número de modificaciones posibles al volumen del equipo. Incluso si alguno de los sensores se quiere dejar fuera del circuito, es mejor usar el largo de las mangueras como se tiene y conectarlas con algún pedazo de manguera de teflón que una las mangueras de silicón entre sensores (Fig. 23).

Sensores LICOR de diferentes longitudes

Cabe hacer notar que en el caso del sensor LICOR se debe checar qué tipo de sensor se tiene, antes de realizar

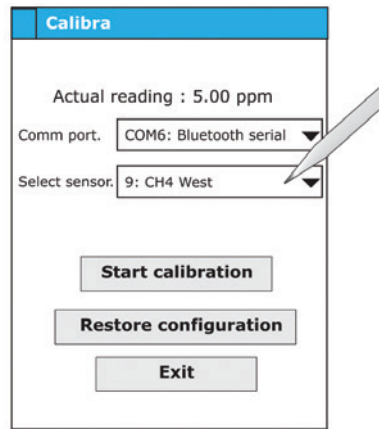


Fig. 24. Pantalla inicial para calibrar los sensores de H2S y CH4.

cualquier manipulación de calibración. El sensor óptico se fabrica con dos celdas o trayectorias ópticas con diferente longitud de celda. El sensor LI-COR puede venir con una de dos celdas: la de 14cm con un nivel de saturación en 2000ppm o la de 5cm con un nivel de saturación de 20000 ppm.

Para fines de monitoreo volcánico conviene tener la celda de 5 cm para evitar la saturación rápidamente, el equipo con mayor longitud en la celda se puede saturar con muy poca concentración de CO₂ en el suelo.

El proceso anteriormente descrito cambia, puesto que la concentración que se usa en las bolsas tedlar es diferente (en un caso la concentración de SPAN debe estar por debajo de los 2000ppm y en el otro por debajo de 20000 ppm).

En el caso de la calibración de los otros gases (H₂S, CH₄ y SO₂) la diferencia es que el programa no necesita una PC externa, sino que se ejecuta en la misma PDA. Así que no hace falta ese paso extra durante la calibración. Se enlistan a continuación los pasos para estos sensores:

1. Se mantiene el equipo prendido y se abre el programa calibra en la PDA. Al abrir este programa se muestra una pantalla para elegir entre los sensores (Fig. 24).
2. Se debe elegir el sensor que se calibrará y posteriormente se le da en "start calibration". Con esta operación la bomba comenzará a funcionar.
3. Se inyecta el contenido de la bolsa tedlar con concentración cero. Se espera que la lectura promedio se establezca alrededor del cero. Se presiona "next" cuando ya se tiene un valor estable. Notar que el valor se tomará de la porción de la medición que esté entre las líneas rojas (Fig. 25).
4. Inyectar la concentración del SPAN por medio de otra bolsa tedlar. Presionar "Set Span". Esperar de nuevo a que la lectura se establezca y seleccionar por medio de las líneas rojas el intervalo de medición apropiado. Una vez estable, presionar "calibrate" (Fig. 26).

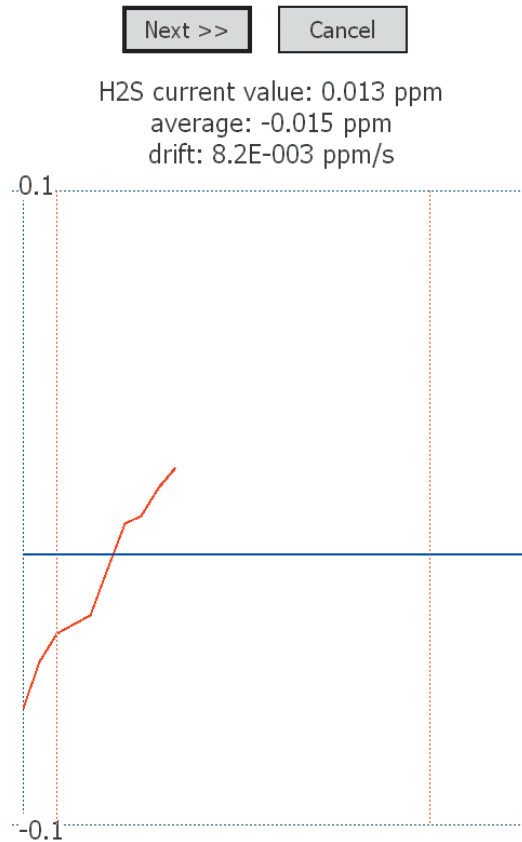


Fig. 25. Pantalla donde se debe estabilizar el valor de concentración cero.

5. Luego de darle calibrar, se muestra de nuevo la ventana de este programa. Ahí se puede elegir calibrar el otro sensor o salir del programa.

Algunos aspectos del controlador de Flujo

Conviene que el controlador de flujo sea de dos pasos. El primer medidor o paso nos dirá la presión del gas en el cilindro y el otro paso nos dejará regular la presión de nuestro flujo a la bolsa (Fig. 27).

El orden para operar el controlador de flujo es intuitivo pero es mejor anotarlo para evitar inseguridad al momento de manejar el equipo. Es importante que el cilindro esté sujeto a alguna pared durante su uso para mayor seguridad.

1. El controlador de flujo se conecta al cilindro mientras todas las válvulas están cerradas, incluida la válvula del cilindro.
2. Se abre la llave del cilindro y la primera válvula (1) del controlador de flujo, ésta nos dará la presión del cilindro.
3. Luego se abre la válvula 2 y se fija el flujo según sea necesario, por ejemplo si se van a llenar las bolsas con el gas, se usa un flujo bajo (<20 cc/min).
4. Luego se abre la válvula de la bolsa para que se llene la bolsa.

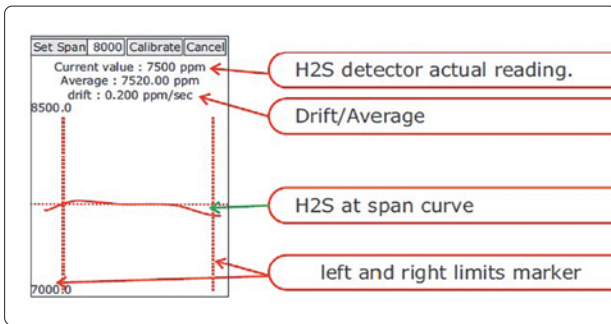


Fig. 26. Pantalla donde se elegirá el valor del span tras su estabilización.

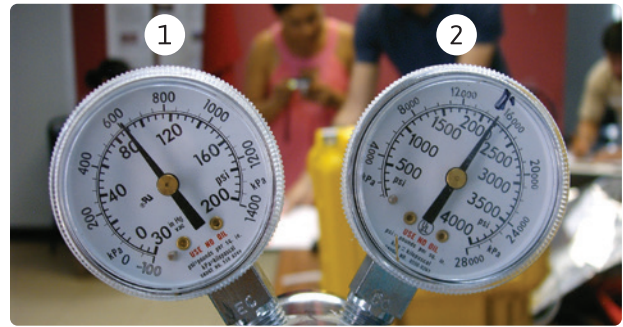


Fig. 27. Vista de las válvulas del controlador de flujo. En el texto se usa como válvula 1 la de la izquierda en la foto y como válvula 2 la de la derecha en la foto.



Fig. 28. Acercamiento de la conexión entre la bolsa y el suelo simulado.



Fig. 29. Conexión entre la bolsa y el suelo simulado.

5. Una vez llena la bolsa se cierra la válvula de la bolsa y la válvula 2 del controlador de flujo.
6. Si ya se terminó de usar (es decir, ya no llenará otra bolsa), se cierra la válvula 1 y luego la válvula principal (la válvula del cilindro).
7. Luego se abre un poco la válvula 2 para liberar la presión y luego la 1 para ver que ya es cero la presión contenida en el controlador de flujo (esto último se realiza sin bolsas conectadas). Es importante esta última rectificación para evitar inconvenientes en el manejo del cilindro.
8. Un detalle importante a considerar es que el controlador de flujo debe resistir el paso de gases corrosivos como el H₂S.

Construcción de la curva de calibración

El paso que sigue es hacer la curva de respuesta específica del equipo. Esto se debe hacer con el fin de poder verificar posteriormente la calibración comparando las curvas obtenidas al inyectar ciertos flujos conocidos de gas y con esto saber si el equipo sigue calibrado o se requiere una calibración. En teoría, se pueden calibrar los sensores, ir al campo y luego hacer la curva de respuesta. Pero es más seguro y preciso si se hace la calibración, luego la curva de respuesta y después se va al campo: se recomienda esto para tener resultados más confiables.

La curva de respuesta se puede hacer para todos los sensores (CO₂, H₂S, CH₄). En caso de que solo se vaya a hacer para un sensor conviene hacerla después de introducir SPAN y ZERO para todos los sensores que se vayan a conectar en

las mediciones de rutina para que el flujómetro ya se encuentre en el estado con el que va a ir al campo.

Básicamente, la calibración consta de los siguientes pasos:

1. Imponer un flujo en cc/min y ver la respuesta del instrumento en ppm/seg.
2. Recalcular el flujo impuesto considerando los diferentes gases de la mezcla y obtener el flujo real en cc/min.
3. Graficar el flujo impuesto real y el flujo obtenido
4. Obtener una ecuación de regresión de un polinomio de segundo orden que los relacione y registrar la ecuación.

Se utiliza una mesa de madera con un orificio en el centro de 10mm (esta superficie o mesa no viene incluida en el equipo). Prestar atención a la entrada por debajo de la mesa, puesto que debe ir conectada a la manguera que viene del cilindro del gas en cuestión pasando por el controlador de masa. El tubo que se conecta es de teflón y debe encontrarse dentro de las refacciones del sensor LI-COR. El diámetro interno del tubo es de 4mm (Figs. 28, 29 y 30).

Con la mesa se pretende simular el rol del suelo durante una medición real. Se coloca un tapete de hule grueso, entre la mesa de madera y la cámara de acumulación para facilitar la adherencia entre superficies y evitar fugas de aire (el tapete tampoco viene incluido en el equipo) (Fig. 31)

Como precaución, el tapete debe evitar polvo en los sensores por medio de un filtro integrado (Fig. 32).

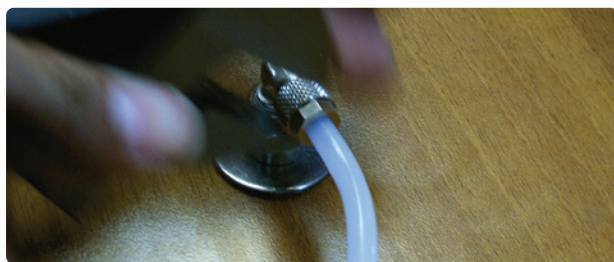


Fig. 30. Conexión entre el suelo simulado y la bolsa..



Fig. 31. Vista del tapete entre el suelo simulado y la cámara de acumulación.

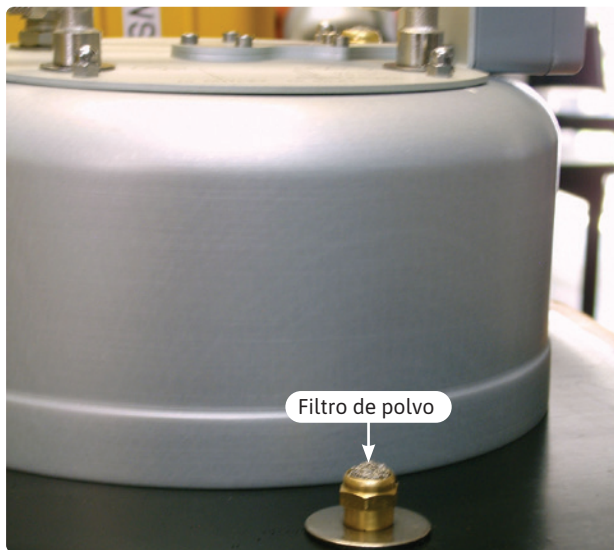


Fig. 32. Vista del filtro de polvo y la cámara de acumulación.



Fig. 33. Ejemplo de conexión fallida (arriba) y de conexión correcta (abajo).



Fig. 34. Vista de las conexiones.



Fig. 35. Mediciones para la curva de calibración.

Prestar atención a que la conexión entre cilindro, controlador de flujo y tubo de teflón no tenga ningún tipo de fuga (Fig. 33)

Finalmente las conexiones quedan de la siguiente manera:

Cilindro→Controlador de Flujo→Controlador de Masa→Mesa→Cámara de Acumulación sobre la mesa (Fig. 27 y 28).

La conexión que sale del controlador de masa hacia la cámara de acumulación va por debajo de la mesa simulando la entrada difusiva del suelo (Fig. 34).

Todo este proceso se hace con la trampa de humedad (de la cámara de acumulación) llena del deshidratante, para ver la respuesta del equipo con la configuración de campo. La curva de calibración es un método para hacer más preciso el cálculo de flujo. Se basa en obtener la respuesta directa del instrumento cuando se le impone un flujo. En resumen se le impone un flujo y se toma el flujo que registra el instrumento, se hacen por lo menos 3 mediciones para cada flujo impuesto. Estas tres mediciones pueden ser útiles para medir la repetibilidad y obtener el coeficiente de variación del instrumento.

Se impone un flujo en cc /min (centímetros cúbicos por minuto) con un controlador de masa resistente a gases corrosivos (el controlador de masa tampoco viene incluido en el equipo, Fig. 35).

Se trata de imponerle flujos en un gran rango de magnitud, para lograrlo, se usan concentraciones muy diferentes, por ejemplo, usando un 2% de CO₂ y luego un 90% o 70%. Otra forma de cubrir un amplio espectro de flujos es utilizar una concentración del 20% o 50%. No importa la concentración del cilindro, sino el flujo que se logre imponer. Luego de cada medición es importante dejar prendida la bomba del flujómetro al menos 30 segundos con la finalidad de limpiar el sistema.

Recalcular el flujo de cada componente.

Una vez hechas las mediciones anteriormente indicadas, se deben recalcular los flujos de cada componente según la mezcla utilizada.

Con la corrección del flujo se tiene, entonces, la posibilidad de usar cualquier mezcla y cantidad de gases para hacer la curva de calibración.

El controlador de masa siempre pide el nombre del gas que se está imponiendo ya que la lectura del flujo en el controlador de masa, depende de la viscosidad del gas, Si se usara un cilindro con solo CO₂ no se tendría que recalcular el flujo, pero eso es muy improbable. En general se usa una mezcla de gases y hay que considerar todos los pasos. Es decir, al elegir el gas principal de la mezcla en el controlador de masa, se introduce un error en la lectura del flujo, Si se usa una mezcla en el cilindro, (por ejemplo CO₂ con N) se debe marcar en el controlador de masa al de mayor concentración como gas principal, pero el flujo impuesto se debe corregir de acuerdo con la viscosidad, peso molecular y concentración de los gases de la mezcla.

Una vez hecho esto se puede obtener el flujo total y real del controlador de masa:

1. Obtener en una tabla las concentraciones, viscosidades, pesos moleculares de los gases involucrados en la mezcla.
2. Obtener todos los flujos impuestos en el controlador de masa que se quieren recalcular.
3. Se utiliza la ecuación siguiente para el cálculo del flujo real.

Se nombran dos variables para cada gas:

$$x_1 = \text{concentración} * \sqrt{\text{pesomolecular}}$$

$$x_2 = \frac{x_1}{\text{viscosidad}}$$

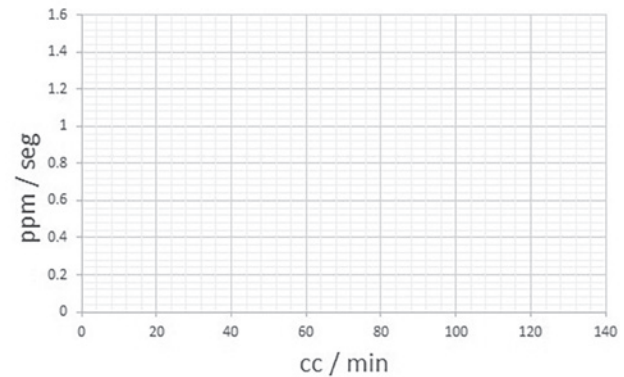


Fig. 36. Vista de los parámetros de la curva de calibración.

Posteriormente ya teniendo estas variables para cada gas dentro de la mezcla, se encuentra la viscosidad total η .

$$\eta_{Total} = \frac{\sum x_2}{\sum x_1}$$

y finalmente se calcula el flujo total como se muestra a continuación:

Se puede resumir el proceso como:

$$Flujo_{real} = Flujo_{impuesto} \frac{\eta_{gasdominante}}{\sum x^i \eta_i}$$

El flujo real calculado hasta este momento es el flujo ligado a la mezcla total, por tanto, para obtener el flujo del gas en cuestión basta hacer una simple regla de 3. Por ejemplo, para una mezcla de N con CO₂ al 2%, se calcula el flujo real de CO₂ de la siguiente manera:

$$Flujo_{CO2} = \frac{2\%_{CO2} Flujo_{real}}{100}$$

Gráfica e interpolación.

Lo que se obtiene en la curva de calibración es, en el eje "y" el flujo obtenido en ppm/seg y en el eje "x", el flujo real impuesto de CO₂ en cc/min. Una vez obtenido esto se hace un ajuste que en general es polinómico de segundo orden.

$$y \frac{ppm}{seg} = ax^2 + bx + c$$

En esta interpolación se fija el cero como tal, es decir, se fuerza el cero en cc/min a ser cero en ppm/seg (Fig. 36).

Una vez hecho esto y teniendo mediciones reales en campo. El procedimiento para obtener el flujo real, es el siguiente: se convierte la pendiente obtenida en ppm /seg a

cc /min según el ajuste de la curva de calibración. Para esto se utiliza la ecuación inversa según sea la interpolación.

Esto es, se considera la respuesta natural del instrumento en el cálculo y luego se procede con la ley del gas ideal considerando volumen, presión y temperatura en cada flujo, como se hace ordinariamente.

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - y)}}{2a}$$

Hay que notar que, dependiendo de la interpolación que se realice, se obtienen 1, 2,3 o más raíces al momento de invertir la fórmula. Cuando se tienen valores negativos éstos se descartan fácilmente y se toman siempre los positivos; si se tiene más de dos valores positivos se trata de recalcular el valor del flujo con cada uno y se elige el que se acerque más al valor.

Uso en el campo

La lista que no hay que olvidar

- Los accesorios básicos de la caja del flujómetro son los siguientes:
 - Libreta de campo (bitácora) y bolígrafos
 - GPS (con baterías y cargador de baterías).
 - Cámara fotográfica (con baterías y cargador de baterías).
 - Baterías extra (6LR61-9V) para ventilador de cámara de acumulación,
 - Desarmador de cruz o navaja con desarmador para abrir el compartimiento del ventilador de la cámara de acumulación.
 - Inversor de corriente para el vehículo (para tener la oportunidad de recargar el equipo en campo)
 - Adaptador de corriente, de acuerdo con el país donde se encuentre (el equipo tiene clavijas europeas)
 - Juego de llaves Allen para fijar en caso de ser necesario la mochila al flujómetro y para asegurar la posición de los sensores. No son la misma medida de llave Allen.
 - Es recomendable también llevar una mochila de campismo con cinturón como alternativa para cargar el equipo, de esta manera irá más protegido el equipo y con mayor soporte el usuario. La mochila con la que viene el equipo lo mantiene al exterior y solo lo sostiene mediante una tuerca. (poner un bullet con esto justo aquí).
 - Esto sólo es con algunos equipos. Adaptadores de la PDA para tener la opción de cargarla con la batería de emergencia que se da con el equipo.
 - Un cable extra para cargar la PDA en caso de extravío o ruptura del que viene con el equipo.

- Filtros de repuesto del flujómetro y la cámara de acumulación.
- Mangueras de repuesto del equipo.
- Para las trampas de humedad del equipo:
- Guantes de latex, tapabocas y algodón.
- Cucharilla de laboratorio o de plástico para rellenar tubos.
- Desarmador largo o aguja de tejer o algo similar para limpiar fácilmente los tubos cuando la sustancia dentro ya se ha humedecido.
- Embudo de boca inferior pequeña para rellenar tubos (ver tubo muestra).
- Perclorato de magnesio debidamente guardado y protegido. O bien, sílica gel o drierita
- Tubos de repuesto vacíos (manguera transparente) y llenos con tapas o ligas y fragmentos de plástico que sirvan como tapas.

Elección de lugares de medición

Los puntos de medición se eligen considerando los siguientes aspectos:

1. Que no haya mucha vegetación.
2. Que no haya mucha humedad.
3. Que no sea sobre un suelo muy rocoso, por ejemplo, no se debe medir sobre un flujo de lava.

Si se tienen estudios geológicos previos en el sitio, es conveniente considerar la geología estructural para saber dónde hay fallas potencialmente activas y cuáles son las direcciones principales del fallamiento local; es decir, se buscan las estructuras de alta permeabilidad ya que tienen una mayor posibilidad de emisión de gases. Otra manera de saberlo es analizando la sismicidad de la zona y comparando la evolución de las profundidades a las que ocurren, con ello se podría tener una idea de las posibles ascensiones gaseosas.

También se puede hacer un estudio de anomalías térmicas con el objeto de obtener una relación entre las zonas de mayor temperatura y las zonas de mayor desgasificación.

Breve Descripción del Método en cada punto

El equipo puede trabajar con sensores de CO₂, H₂S y CH₄. Sin embargo el método de medición es el mismo sin importar que flujo nos interese.

El método de medición consiste en lo siguiente:

1. Ubicar la posición del punto a medir.
2. Encender el flujómetro antes de las mediciones; la celda del espectrómetro IR funciona a una temperatura de 50° y en ocasiones, dependiendo de la batería del equipo y de la temperatura exterior, puede tardar en

- alcanzar la temperatura adecuada; por ello se puede hacer este encendido incluso sin tener las conexiones de las mangueras hechas Si se inician las mediciones y el equipo no está listo, aparecerá un aviso del programa indicándolo. Se sugiere trabajar siempre bajo la misma temperatura para evitar errores en las mediciones.
3. Hacer todas las conexiones entre la cámara de acumulación y el flujómetro. Se enciende la PDA donde se debe encontrar instalado el software Flux Manager. Este software se puede instalar en cualquier dispositivo móvil con sistema operativo Windows Mobile.
 4. Ingresar al software Flux Manager en la PDA; en cuanto se ingresa al software en automático se establece la conexión bluetooth entre los dos dispositivos. Al conectarse se verá en pantalla la lista de sensores y un símbolo verde de play en la esquina superior izquierda.
 5. Si no hay conexión, aparecerá un aviso del programa Flux Manager diciendo que no se encontró el dispositivo. Las causas: falta de batería, mal ubicación del puerto de conexión del equipo, algún problema electrónico interno del equipo. Lo primero que hay que hacer es checar que ambas baterías (de la Palm y del equipo) estén cargadas; luego checar todas las conexiones entre la batería y los sensores. Posteriormente checar la configuración de bluetooth de la PDA y elegir dentro de la lista de dispositivos el nombre del equipo con el que estamos trabajando o darlo de alta si llegase a no estar dado de alta. Luego de esto se vuelve a hacer la conexión.
 6. Una vez conectados los dispositivos, se pueden iniciar las mediciones; se da "clic" en el botón verde de play; en este momento se debe escuchar la bomba del equipo que inicia a funcionar.
 7. Se esperan unos instantes con la cámara de acumulación hacia la atmósfera hasta tener la concentración atmosférica de CO₂ medida en pantalla (~400 ppm), entonces se coloca la cámara de acumulación en el suelo cuidando de que no entre aire al sistema; en el caso de un suelo con cenizas, la cámara se entierra ligeramente. En caso de no poder enterrarla ligeramente, se puede colocar una media llena de arena alrededor de la campana para evitar que haya fugas. Es recomendable no alterar el flujo moviendo mucho la tierra o haciendo un hoyo para la campana.
 8. Encender el ventilador de la cámara al momento de colocarla en el suelo, para homogeneizar el gas que se está midiendo.
 9. Ver en tiempo real, en la pantalla de la PDA, la concentración en ppm y el aumento de la concentración dentro de la campana. Si el flujo es constante, la gráfica se verá como una línea de pendiente positiva constante. En caso de no tener una pendiente positiva constante en pantalla, se puede deber a varias causas:
 - a) Baja carga de la batería en el flujómetro, con lo cual la bomba no trabaja de forma regular y el flujo varía mucho.
 - b) Fugas en el sistema y entradas de aire al sistema. Para evitar esto, checar que las conexiones estén bien hechas; que no haya entrada de aire en el contacto de la cámara de acumulación y el suelo.
 - c) Que el ventilador funcione incorrectamente; checar la batería y que no haya obstáculos en las aspas para que la mezcla permanezca homogénea.
 10. La medición durará alrededor de 1-3 minutos, tiempo en el que se deben marcar las dos líneas verticales al tocar la pantalla, un lapso de tiempo en el cual la pendiente permanezca positiva constante y nos arroje como resultado, en la parte superior de la pantalla, el flujo en ppm/s. Esta operación la hace el programa haciendo una interpolación de mínimos cuadrados; esto quiere decir que mientras mayor sea la aproximación de nuestra curva a una línea recta, el flujo será más parecido al flujo real. En caso contrario, el error asociado a nuestro flujo será mayor. Finalizando esta etapa se registran las curvas de los gases y se obtienen las pendientes directamente en la PDA con las dos líneas.
 11. Guardar el archivo. Al hacer esto, el equipo se detiene automáticamente; la bomba se detiene unos segundos después para limpiar los conductos. Es importante entonces alzar la campana del suelo para que efectivamente se limpie el conducto, de lo contrario al iniciar la siguiente medición tardará más en estabilizarse y hay que esperar entonces que se limpie el conducto. El archivo para guardar el punto de medición pide la siguiente información:

Site: el sitio es la zona de trabajo.

Point: Se numeran los puntos dentro de un mismo sitio para tener control y orden en el registro de la información. El programa completa la numeración automáticamente después de darle el primer punto siempre y cuando uno no se salga del programa.

Elev: Altura del punto. Si el equipo trae GPS integrado, esta información y la subsecuente ya no es necesario incorporarla a la ficha de cada punto.

Lat: Latitud geográfica.

Long: Longitud geográfica.

Note: Espacio libre para hacer anotaciones. Un error dentro del software del equipo hace que si uno coloca una nota en un punto, ésta permanezca para los siguientes

puntos, por tanto hay que prestar atención al anotar detalles particulares de un punto.

Press.: El instrumento registra la presión. Este sensor está en el LI-COR.

Temp: Se anota la temperatura del sensor. El sensor de metano tiene el sensor. Es conveniente obtener a temperatura de forma externa.

Acc. Chamber: Se selecciona la cámara de acumulación utilizada (A, B o C), esto es importante puesto que el volumen utilizado se refleja en el cálculo preliminar del flujo que hace el software Flux Revision.

Se puede obtener directamente la pendiente en cada punto para los tres gases y registrarla en la libreta de campo con el fin de: evitar pérdida de datos en caso de un posible fallo electrónico en la PDA; comparar valores entre puntos y visualizar la geometría de las áreas anómalas y así saber si una medición está mal (por fugas o una mala limpieza del sistema) dados los órdenes de magnitud de las mediciones alrededor de ésta.

Solución de los problemas más comunes en campo.

1. El equipo puede esperar entre medición y medición o ser suspendido dependiendo del tiempo entre mediciones. Si uno se sale de flux manager y la suspende apretando solo un instante el botón de apagado, es muy fácil ingresar de nuevo tocando la pantalla, con lo cual aparecerá el símbolo de un candado y basta con deslizar el dedo suavemente para desbloquearla. En algunos modelos de Palm, el problema está en que si uno no sale del flux manager y la suspende, al tratar de reingresar de nuevo, es muy probable que ya no reaccione al tacto y se traben. La solución más rápida es abrir y sacar y poner la batería. Posteriormente se enciende normalmente y se comienza a trabajar de nuevo.
2. Si se inicia la medición y aparece el letrero ONE SENSOR DOWN o TWO SENSORS DOWN, quiere decir que por algún motivo se pierde la comunicación con éstos o no se tiene suficiente batería en el equipo. Si esto sucede, se puede dar re-scan y es muy probable que a la segunda o primera vez que se reescaneé se encuentren los sensores. En caso de que no sea así quiere decir que la carga de la batería ya está baja y conviene cambiarla.
3. Al inicio hay que esperar la temperatura de 50° para comenzar a trabajar. Si se quiere rastrear la temperatura o verificar el momento en que el equipo está listo, se puede fijar la traza de la temperatura para que aparezca junto a la de los gases que se están midiendo. Esto mismo se puede hacer para las baterías de la PDA y el flujómetro, incluso entre mediciones.
4. Para tener control del rendimiento de las baterías durante el trabajo de campo, se recomienda ver periódicamente, dentro del programa flux manager, en HELP la opción battery status, con lo cual se tiene idea de que tanto tiempo queda para el trabajo. Con esto se evita una mala planeación por falta de tiempo en ciertas zonas de trabajo.
5. En la pantalla van a aparecer avisos cuando la batería de la PDA y el flujómetro se esté acabando, en ambos casos la batería dura más mediciones todavía pese a los avisos, sin embargo en el caso del equipo, la batería se agotará en las próximas 5 mediciones, en el caso de la PDA puede durar más de 20 mediciones extras, el porcentaje de carga de la batería a partir del cual puede apagarse, es ente el 5% y el 11% de batería, dependiendo del modelo.
6. Si la bomba del equipo hace un sonido más lento al encender, la batería se está agotando, es posible que dure una medición más. No conviene forzar el equipo de todos modos, lo mejor es cambiar la batería en cuanto se oiga el cambio de sonido en la presión.
7. Si se agotan los tubos o trampas de humedad de reemplazo, lo mejor es colocar un tubo sin nada, es decir, limpiar uno de los que traemos quitándole todo el deshidratante y colocarlo vacío de modo que el aire pase sin obstrucción. Es mejor hacer esto que dejar una trampa ya humedecida que puede ingresar gotas de agua al sistema.
8. Si se encuentra un flujo negativo lo mejor es checar primero todas las conexiones y posibles lugares de fuga y volver a medir. También conviene esperar unos segundos con la campana al aire para que el sistema se limpie bien. Si hay duda de que el sistema esté midiendo el CO₂, conviene soplarle directo a la campana; se espera una concentración muy alta de CO₂ tras el soplido.
9. Si se encuentra un valor muy alto de flujo se debe de medir otra vez para corroborar el valor y en caso de resultar un punto alto constantemente conviene medir alrededor del punto en todas las direcciones; es decir, cercar o acotar la zona de posibles valores altos para no cometer errores al momento de interpolar los flujos. Es importante que primero se mida un par de veces en el punto donde aparece el valor alto puesto que hay veces que los flujos altos provienen solo de una acumulación en un instante debido a la materia orgánica. De todas formas no hay que olvidar que un valor bajo del flujo es un dato importante para la interpolación posterior, incluso un cero.
10. Respecto al GPS de la PDA, la primera recomendación es que conviene siempre llevar un GPS externo. Muchas veces al empezar a trabajar el primer punto que se mide sale sin dato de GPS, en general es porque tarda un poco en rastrear a los satélites la PDA, si se vuelve a medir esperando un par de minutos seguro ya se

tiene dato de GPS y en caso de que no se tenga se debe tener siempre la opción de un GPS externo.

Procesamiento

Obtención de Datos

Los datos se descargan de la PDA obteniéndolos directamente de la memoria SD integrada en la PDA o sincronizándola con una PC por medio del software Microsoft Active Synk o Windows mobile. Ambos se bajan gratuitamente de la red.

Análisis con Flux Revision

Una vez que se tienen los datos, se usa un programa que se llama Flux Revision para analizar todos los datos y las pendientes elegidas en campo. Este programa viene en el disco de cualquier equipo West System o se puede bajar directamente de su página

<http://www.westsystems.com/downloads.html>

En cuanto se abre el programa, éste pide una carpeta de archivos reconocidos.

Hay diferentes versiones del Flux Revision de acuerdo a los archivos generados por la Palm; en general en el disco de instalación viene sólo la correspondiente al equipo adquirido. Si la versión que se tiene no llegase a reconocer los archivos hay que descargar la versión correcta de la página de internet anteriormente mostrada.

Se abre entonces una pantalla como la mostrada en la Fig. 37:

Se puede elegir el gas a manipular y se mueven las pendientes a elección de cada quien en cada gas.

Cuando se elige "Save to file" automáticamente aparece la hora a la que se guarda y eso es un tipo de control para saber qué archivos ya se han revisado (Figs. 38 y 39). Hay que tener cuidado porque, aunque sólo se modifique la pendiente de un gas para un punto de muestreo, en cuanto se guarda, la fecha aparece en todos los gases; por tanto conviene modificar todos los gases de la medición por cada punto de muestreo de una sola vez.

Una vez revisados todos los datos de los valores medidos solo se da clic a Create para crear un archivo de datos fácil

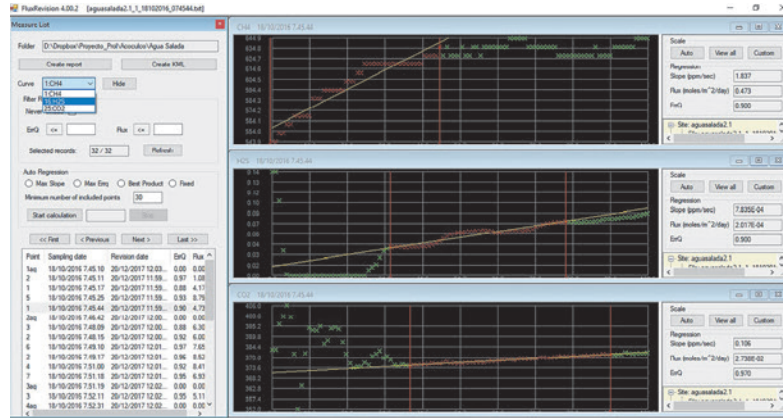


Fig. 37. Pantalla donde se elige el gas en el software flux revision

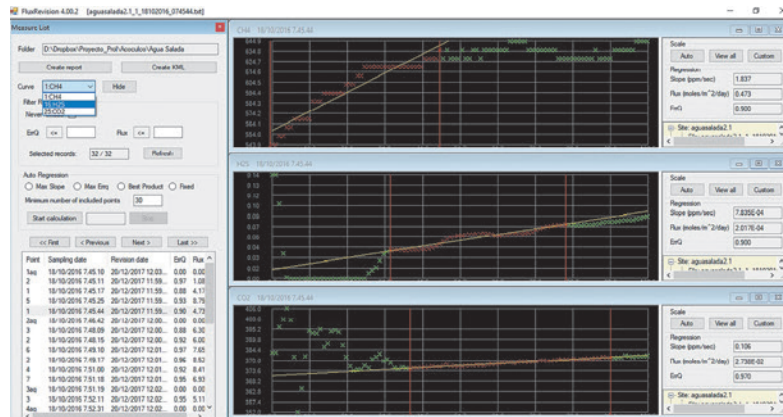


Fig. 38. Vista de la instrucción "Safe to file".

de visualizar en programas como: Excel, Origin, Statistica o algún programa que trabaje con hojas de cálculos y recozca archivos de texto.

En el mismo programa se puede dar "Create archivo KML"; con esto se obtiene un archivo que puede ser leído en Google Earth con las coordenadas de todos los puntos medidos (Fig. 40).

En la hoja de cálculo viene un flujo para cada punto. El programa flux revisión calcula el flujo en mol s⁻¹ m². Esto puede servir como un valor de comparación. Si se anotaron bien la temperatura y la presión en cada punto en el campo, el programa calculará bien el valor. Sin embargo, si no se anotaron bien los valores de temperatura o presión en campo y se quieren cambiar, el flujo calculado por el programa no sirve ni para fines de comparación y hay que cambiar estos valores para cada dato que lo requiera antes de proceder con el cálculo. El cambio de estos valores por los valores correctos se hace directamente en el programa que se haya utilizado para visualizar los datos en una hoja de cálculo.

Cálculo del flujo

Es importante saber que el instrumento toma una medida cada 20 segundos. Por lo tanto, para tener una buena medición, el intervalo de tiempo en donde se observe la pendiente constante debe ser mayor a 20 segundos. Se recomienda medir alrededor de un minuto o más en cada punto para obtener un mejor ajuste lineal.

El cálculo se deriva de la ecuación de gas ideal, donde, reacomodando los términos se obtiene:

$$K = \frac{86400x P x V}{10^6 x R x T_k x A}$$

Donde P es la presión barométrica, R es la constante de los gases, T_k es la temperatura expresada en grados Kelvin, V es el volumen de la cámara, A es el área de la cámara y K es el factor por el cual se debe multiplicar el flujo en ppm/seg para obtener mol/m² seg.

El cálculo del flujo se hace de dos posibles maneras:

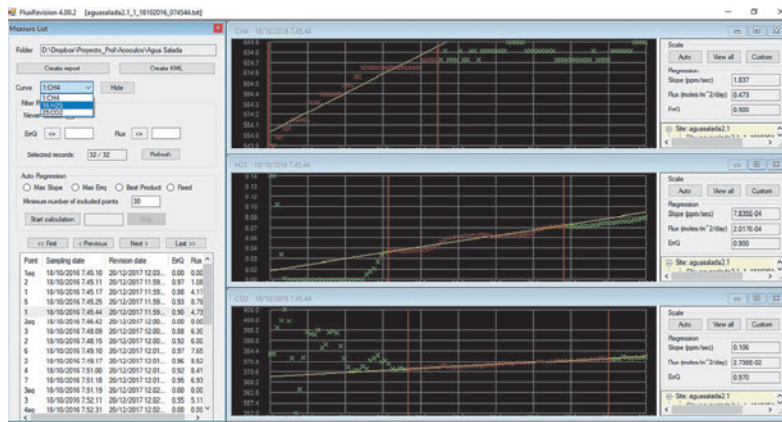


Fig. 39. Vista de la flecha de modificación de cada punto.

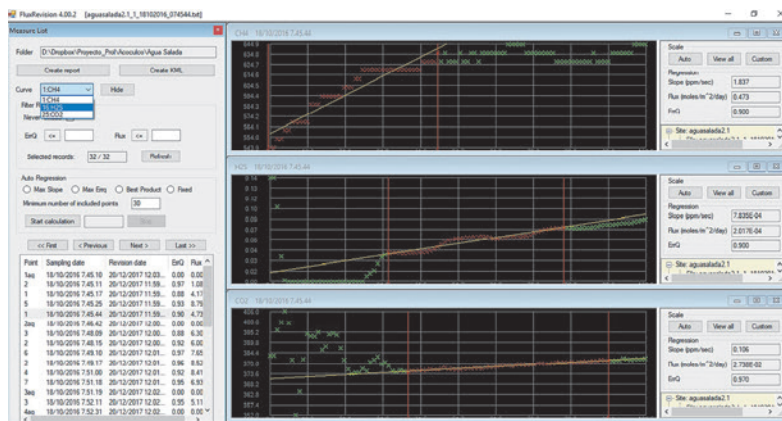


Fig. 40. Vista de la instrucción para realizar el archivo KML.

1. Considerar solo el ACK o el accumulation chamber factor, del cual viene una tabla muy simple en el manual pero útil en el campo. O en caso de no usar el manual para ver el ACK se calcula directo con todas las constantes involucradas en la ley del gas ideal. El ACK es el factor con el que se convierte de ppm/seg a mol/m²seg, posteriormente hay que considerar el peso molecular del gas para transformar a g m⁻² d⁻¹.

Ppm/seg → Fórmula del gas ideal (Temperatura, presión, volumen) → g m⁻² d⁻¹.

2. Esta forma solo contempla un paso intermedio o bien, un paso previo para luego continuar con el cálculo como en el inciso anterior.

Es una forma más precisa de calcular el flujo como ya se dijo en el apartado de curva de calibración. Se considera la respuesta directa del aparato en cc min⁻¹. Por tanto, para cada pendiente que se obtenga en ppm s⁻¹ se debe encontrar la respuesta o reacción del aparato en cc min⁻¹. Esta respuesta del aparato está registrada en la curva de calibración.

ppm s⁻¹ → cc min⁻¹ → Fórmula del gas ideal (Temperatura, presión, volumen) → g m⁻² d⁻¹

La fórmula o ecuación utilizada se obtiene de la gráfica de ppm s⁻¹ vs cc min⁻¹. En general se considera la ecuación inversa, puesto que esta vez tenemos un dato de campo en ppm s⁻¹ y queremos saber a cuanto equivale en cc mi⁻¹.

Posteriormente, se hacen las transformaciones correspondientes para obtener el flujo en mol m⁻² d⁻¹

ppm s⁻¹ → cc min⁻¹

cc min⁻¹ → cc min⁻¹ cm⁻²

cc min⁻¹ cm⁻² → lt min⁻¹ cm⁻²

lt min⁻¹ cm⁻² → mol min⁻¹ cm⁻²

mol cm⁻² d⁻¹ → mol cm⁻² d⁻¹

En estos cálculos se usan temperatura, presión y volumen de la cámara utilizada.

Luego solo restaría hacer la transformación empleando el peso molecular del gas de:

mol m⁻² d⁻¹ → g d⁻¹ m⁻²

En el caso del CO₂ se multiplica por 44.01g que es su peso molecular, en el caso del H₂S por 34.01g y CH₄ por 16.04 g.

Análisis Estadístico

Esta sección no pretende detallar la estadística. Para mayor información del tratamiento estadístico de los datos se recomienda leer las técnicas más utilizadas en artículos sobre:

1. *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*
2. *GSLIB: Geostatistical Software Library and users guide.*
3. *Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil.*

El tratamiento estadístico que se aplica a los datos puede consistir en diferentes técnicas y propósitos dependiendo del objetivo de la investigación. Las técnicas más utilizadas de procesamiento de datos de emisiones difusas en volcanes y zonas geotérmicas, luego de un análisis estadístico exploratorio básico, son:

1. Cálculo directo del flujo total del área. Esto se hace multiplicando el valor medio de todos los datos por el área total de estudio,
2. Aproximación gráfica estadística (GSA; Sinclair, 1974; David, 1977) que permite tener un cálculo del flujo por medio de la separación de familias de flujos basados en el análisis de una gráfica de probabilidad acumulada y el supuesto de la normalidad para las diversas familias de desgasificación, diversas técnicas de interpolación como Krigging.
3. Interpolaciones o Simulaciones para obtención de mapas y flujos totales. La más común es la simulación gaussiana (SGSIM) que permite tener una distribución espacial de los flujos y el cálculo del flujo por medio de un número alto de simulaciones de las variables estadísticas del conjunto de datos (Cardellini et al. 2003).

El procesamiento que a continuación se describe se basa en la suposición de que ya se tienen los flujos en todos los puntos medidos y que las mediciones fueron bien hechas y ya están revisadas.

Herramientas estadísticas

El primer paso es entender el conjunto de datos desde el punto de vista estadístico, esto para evitar resultados erróneos al momento de presentarla en mapas. Por tanto, antes de proceder a hacer los mapas de isoflujos, se deben analizar los datos. Para esto se pueden usar pro-

gramas de análisis estadístico, como Statistica® o Isatis® o el mismo programa Wingslib® que se verá adelante con mayor detalle.

Algunos de las herramientas básicas de análisis recomendados antes de la realización de un mapa son:

1. Obtener media, mediana, máximo, mínimo, cuartiles y desviación estándar de la población y demás estadísticos que nos permitan describir la distribución del conjunto de datos.
2. Histogramas de frecuencia. Se grafican frecuencia vs data; en caso de que no se observe una distribución normal evidente se grafica frecuencia vs log data, esto con el fin de mejor visualización y de entender si se tiene una familia de datos lognormal o no.
3. Box plot. Se puede hacer esta gráfica para ver la distribución de los datos y la distribución gráfica de los cuartiles. Sirve para identificar los valores extremos del conjunto de datos.
4. Curva de probabilidad acumulada. Esto se puede hacer con el objeto de aplicar la técnica de GSA.
5. Variograma experimental y teórico. El variograma muestra la dispersión de los datos respecto a ellos mismos y respecto a su distribución espacial. Es decir, para cada distancia (h), toma la diferencia de valores medidos $\gamma(h)$ y los grafica. Esto es, se pueden observar las relaciones de los datos dadas las distancias entre ellos. En general se observan regiones de valores en los datos, manifestándose con diferentes pendientes en el variograma. Por lo general a cada pendiente se le asocia un tipo de relación entre los datos.
6. Una vez que se obtiene el variograma experimental de los datos, se procede a comparar con el variograma teórico de diversos modelos. Se elegirá el modelo que mejor se ajuste. El ajuste es más importante en valores pequeños de γ , puesto que son menores distancias entre datos y con ellos mayor correlación. Cabe hacer notar que la región del variograma donde la pendiente es casi cero indica a partir de qué punto los datos ya no están correlacionados, por tanto no es tan importante que esta región no ajuste perfectamente en el variograma teórico a elegir.
7. El Variograma teórico arroja parámetros que deben ser utilizados para las simulaciones o interpolaciones de los flujos. Se puede realizar con diversos programas como pueden ser: Surfer®, Wingslib® o Statistica®, entre otros.
8. Modelo y Cross validation. Una vez elegido el modelo de variograma teórico al momento de comparar el variograma experimental y el variograma teórico, se procede a hacer la comprobación o cross validation de ese modelo.
9. En el paso de validación se usa el método de cross validation incorporado en muchos programas. Este

método tiene implementada la graficación de los puntos con cruces; usualmente el tamaño de las cruces es proporcional al valor del flujo, es decir, aquellos con cruces de mayor tamaño son los que tienen mayor flujo.

10. Usualmente se hacen dos gráficos para la validación del modelo. La primera grafica los valores obtenidos en el campo contra los valores obtenidos con el modelo para cada punto; idealmente, todos los puntos deberían de caer en la recta identidad y mientras más puntos estén sobre esta recta o cerca de ésta, el modelo es mejor. La segunda gráfica muestra los intervalos de confianza del modelo, idealmente todos los puntos deberían de caer en la recta con pendiente cero o eje de las x, entonces mientras más cerca están de ésta y no se alejen más de 2.5 unidades, el modelo es bueno.

¿Cómo hacer mapas con Wingslib®?

No siempre se puede hacer un mapa con los datos de campo, se deben analizar previamente y decidir si existen las condiciones para hacerlo y generar un modelo físico posible y no sólo un diseño gráfico que no representa la realidad en el terreno.

En esta sección se describen los pasos para analizar estadísticamente los datos con este programa para obtener un mapa de flujos en la zona de estudio; sin embargo, se debe considerar que seguir los pasos no necesariamente significa obtener un buen mapa, se debe hacer un análisis estadístico serio de lo que se obtenga para decidir si los datos pueden ser sometidos a la simulación gaussiana o no. Este programa es de uso libre y se encuentra en la red para su descarga:

<http://www.staios.com/wingslib/>

Se tienen que bajar el instalador y la carpeta que contiene los ejecutables de Fortran para la versión instalada. Una vez instalado el programa, verificar que se cuenta con un editor de archivos de texto, un compilador de fortran y un lector de archivos PostScript.

Ambos son herramientas del programa y deben darse de alta en las opciones de Wingslib® (Tools/Options), así como también debe darse la dirección de los archivos ejecutables. De no ser así, el programa no efectuará ningún proceso pues no sabrá de donde tomar los ejecutables y no tendrá la ubicación de los lectores para reconocerlos (Fig. 41).

Botones básicos del programa

En la barra superior se despliegan varios menus (Fig. 42).

File: para abrir y cerrar los nuevos proyectos.

Data: para las transformaciones de datos
PostScript: es el formato de salida de mapas y gráficos.
Variogram: para hacer el variograma experimental y teórico, así como la comprobación del mismo.
Kriging: para el proceso de interpolación con Kriging
Simulation: Para la simulación gaussiana
Postprocess: Para hacer el post-proceso de la simulación
Tools: Para configuración del programa
Help: Ayuda del programa

En adelante se usará sólo la palabra inicial del menú para indicar que ahí se encuentra el proceso que se está describiendo.

En la parte central del programa hay un menú de fácil acceso enlistado de arriba hacia abajo en la parte izquierda de la pantalla. Este menú sirve para acceder una vez que ya hemos hecho alguna operación o proceso y lo guardamos; de otra manera no se abrirá nada por medio de ese menú.

Al trabajar con los datos, cuando se da un proceso cualquiera, aparece una ventana donde se ajustan los parámetros de dicho proceso; la barra inferior de estas ventanas

Default parameters (Fig. 43) es común a todos y contiene lo siguiente:

1. El primer botón de izquierda a derecha (folder): es para abrir un archivo de parámetros de otra ubicación.
2. El segundo botón es para guardar el archivo.
3. El tercer botón es para guardar como el archivo en caso de que no queramos sobre-escribir el archivo; que es lo que hace por default.
4. El cuarto botón es para darle inicio al proceso.
5. El quinto botón es para ver los resultados, dependiendo del proceso, el resultado será un archivo de texto que se abrirá en el editor que le hayamos dado en las opciones o un archivo PostScript que se abrirá en el programa que le hayamos dado como lector de este tipo de archivos.
6. El sexto botón es para insertar y ver comentarios.
7. El séptimo botón es para cerrar la ventana.
8. El octavo y último es para dudas y ayuda.

Archivos de datos

Para iniciar se deben tener los datos de los valores de flujos ya transformados a $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ y las coordenadas de los mismos. Se deben poner en formato GeoEAS; este es un

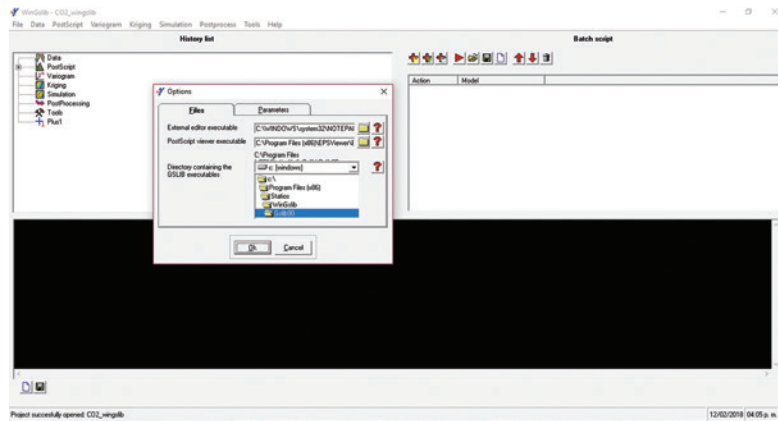


Fig. 41. Vista de la pantalla de opciones para el programa wingslib..

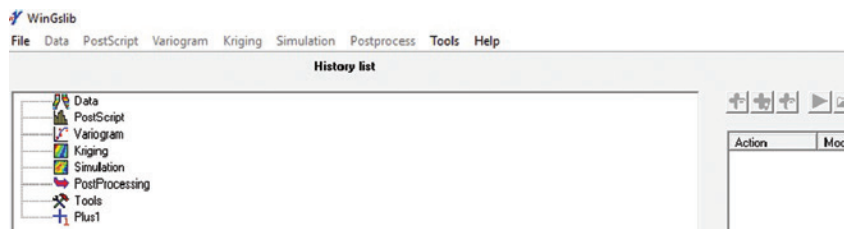


Fig. 42. Vista del menú básico, tanto horizontal como vertical.

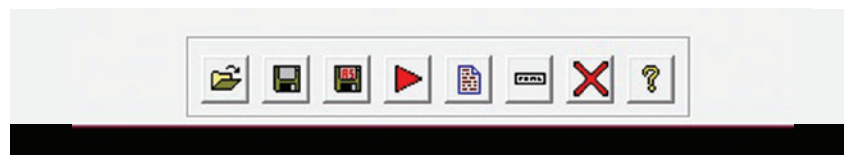


Fig. 43. Vista de los parámetros por default en todas las ventanas.

clusterco: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

clusterco.dat

4

POINT

UTM LONGITUDE

UTM LATITUDE

Flux CO2

1	265655.4688	2260553.25	21.1112
2	265655	2260565	27.0424
3	265668.5313	2260585	8.3028
4	265677.0938	2260606.25	6.468
5	265689.7188	2260629.5	0.405724
6	265703.5	2260667.5	29.9948
7	265714.5625	2260682.75	8.3732
8	265727.4375	2260701	0
9	265738.5313	2260726.5	0.239008
10	265747.3125	2260749.75	19.3908
11	265754.9375	2260779.75	9.7416
12	265755	2260815.5	6.7496
13	265756.7188	2260840.25	17.8684
14	265757.7188	2260876	1.6874
15	265763.6563	2260906	0.48972
16	265768.75	2260927.75	15.7872
17	265783.0938	2260946	16.6716
18	265774.375	2260971.25	16.0248
19	265770.8438	2260997	9.7548

Fig. 44. Muestra de un archivo de datos en formato GeoEAS.

archivo de datos (.dat) que tiene en las primeras filas el nombre del archivo, el número de columnas y el nombre de cada una de las columnas, posteriormente todo el archivo de datos (Fig. 44).

Para iniciar, se genera un proyecto de trabajo.

File/New Project

El programa pregunta la ubicación del proyecto; la elegimos nosotros. Es importante que la recordemos y que sea confiable y fija, puesto que todos los archivos quedarán guardados en esta dirección y si llegamos a copiar después nuestro proyecto a otra ubicación, habrá que cambiar en todos los procesos que hagamos la nueva dirección para el proyecto. Por ejemplo:

Documentos/Proyecto Nuevo

Dentro de la ubicación que se le de al nuevo proyecto el programa creará tres carpetas (**Data**, **Save** y **Parfiles**), y quedarán de la siguiente manera:

- › Documentos/Proyecto Nuevo/Data
- › Documentos/Proyecto Nuevo/Save
- › Documentos/Proyecto Nuevo/Parfiles

Todos los archivos de salida (.out) del programa se guardaran en Save. Todos los archivos de parámetros (.par), son aquellos en donde se meterán los parámetros de los procesos; se crean en automático al llenar las opciones de los procesos por medio de la interfaz. Si se quieren probar

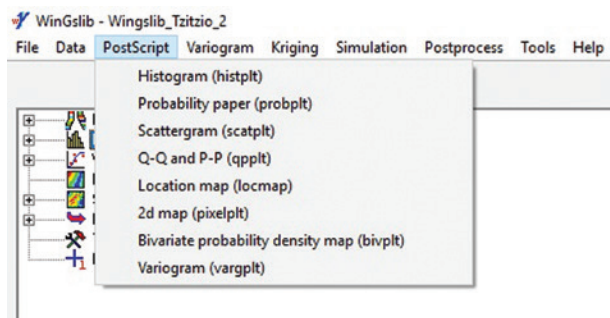


Fig. 45. Vista de las opciones en el menu PostScript.

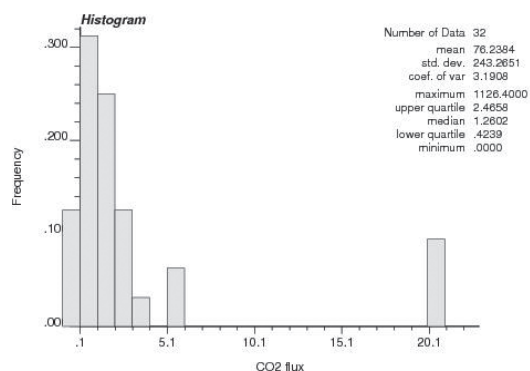


Fig. 46. Vista de un histograma obtenido por el programa.

diferentes parámetros para un mismo proceso se pueden guardar con nombre diferentes, se guardan en **Parfiles**. Y los archivos de datos y de inicio se guardan en la carpeta **Data**.

Se debe de guardar el archivo de datos en la carpeta **Data** con el mismo nombre que colocamos en la primera fila del programa. Es importante guardarlo con la terminación **.dat**.

› Documentos/Proyecto Nuevo/Data/datos.dat

Con este archivo guardado se puede hacer, por ejemplo: un histograma, un mapa de ubicación o una gráfica de probabilidad acumulada de los datos para iniciar a analizarlos:

Histograma

› PostScript/Histogram

Con el archivo datos.dat se realiza un histograma para visualización de los datos (Figs. 45 y 46).

Mapa de ubicación

› PostScript/Location map

Con el archivo datos.dat de entrada se puede realizar un **post map** para ver la ubicación de los datos junto con el flujo de cada uno de ellos (Fig. 47). En esta función se deben de meter explícitamente en el cuadro de diálogo las coordenadas límite de la zona de estudio.

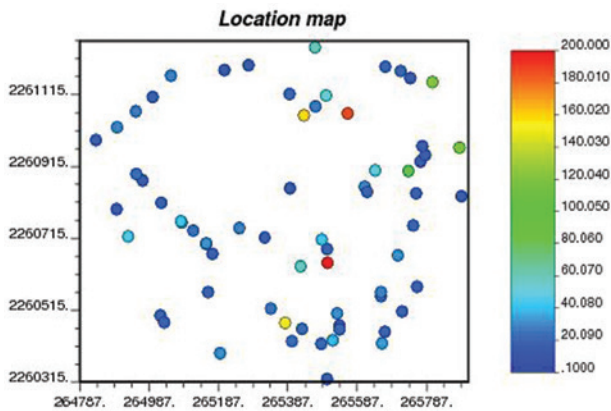


Fig. 47. Mapa de ubicación con los flujos obtenidos en campo.

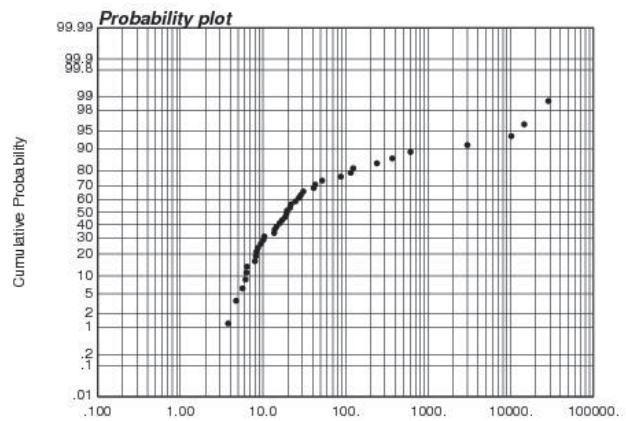


Fig. 48. Gráfica de probabilidad acumulada obtenida con el programa.

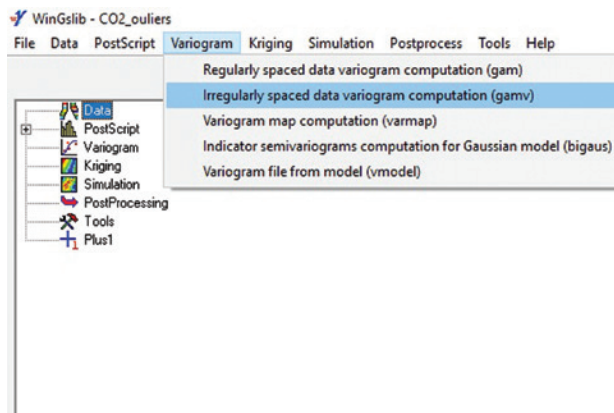


Fig. 49. Elección del tipo de variograma.

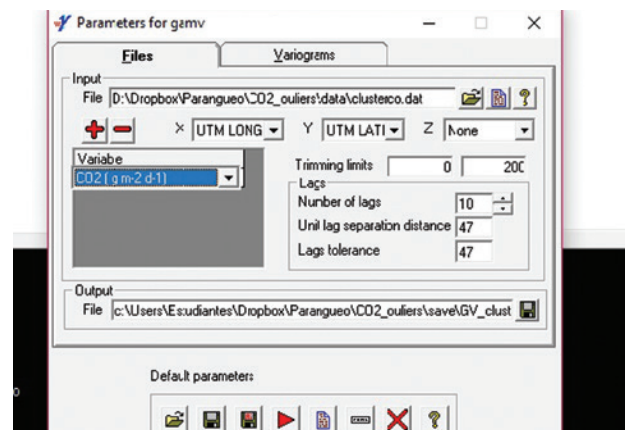


Fig. 50. Vista de la pantalla del variograma irregularmente espaciado.

Gráfica de probabilidad acumulada
 > PostScript/Probability paper

Con el archivo datos.dat se realiza un gráfico para ver los puntos de inflexión de la curva y tener una idea de las familias de datos que se tienen. No se detalla la técnica GSA, sólo se hace notar que con esta gráfica se puede desarrollar ese análisis (Fig. 48).

Transformación "Normal Score"
 > Data/Normal scores transformation

Con el archivo datos.dat de entrada se realiza una transformación de los datos para tenerlos en una distribución normal; requerida forzosamente para realizar la simulación gaussiana.

El archivo de salida se guarda por default en

> Documentos/Proyecto
 Nuevo/save/NS_datos.out

Estas tres herramientas estadísticas sirven para conocer la distribución general de los datos sin considerar la posible

correlación espacial; así como obtener en un programa estadístico o que maneje hojas de cálculo los valores de: media, varianza, mediana, valor máximo, valor mínimo, los cuartiles, la gráfica box plot, entre otros.

Para iniciar a conocer la distribución general de los datos desde el punto de vista espacial. La herramienta que se propone es el variograma.

Variograma Experimental y Teórico

Para iniciar, se construirá el variograma experimental (Figs. 49 y 50).

> Variograma/Space Irregularly

En el caso en que los datos se encuentren irregularmente espaciados se obtiene una ventana con dos pestañas. En la primera pestaña se ajusta el archivo de entrada, el archivo de salida, las variables espaciales y la variable a modelar. Así como los principales parámetros del variograma, que son número de "lags", ancho de "lag" y la tolerancia.

En la segunda pestaña se ajustan el tipo de variograma y las direcciones de búsqueda y de correlación.

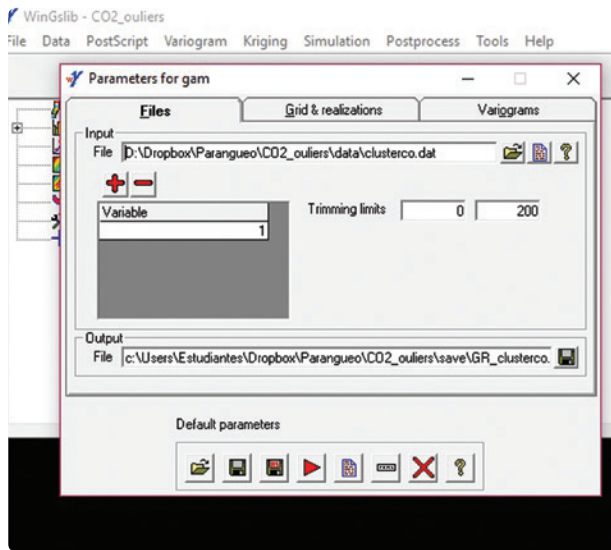


Fig. 51. Vista del variograma regularmente espaciado.

Si es el caso que los datos están espaciados regularmente entonces se le da

› Variograma/ Space Regularly.

Cuando los datos están regularmente espaciados la ventana del variograma tiene tres pestañas; en una se ajusta el archivo de entrada, el archivo de salida (var.out) y la variable. En la pestaña de grid se ponen los datos del grid sobre el cual se trabajó (Fig. 51).

En la pestaña de variograma se colocan los parámetros para hacer el variograma experimental. En este caso depende de los datos propios los parámetros que se anoten.

Se hace clic en play. El archivo de salida es un archivo de datos, podemos abrirlo para verlos, pero se sugiere verlo gráficamente.

Para ver gráficamente el variograma; se debe ir al menú:

› PostScript/Variogram

En esta opción se abre la ventana para graficarlo. Hay que elegir el variograma a graficar y se le puede decir que se grafique con línea continua, con puntos, etc. También se pueden editar los colores; saber estas opciones es útil para cuando se quiera hacer la comparación con el modelo teórico del variograma.

Se da clic en play.

Viendo los resultados y lo que se obtiene gráficamente en el variograma, se hacen las pruebas necesarias hasta obtener un variograma que represente una correlación entre los datos.

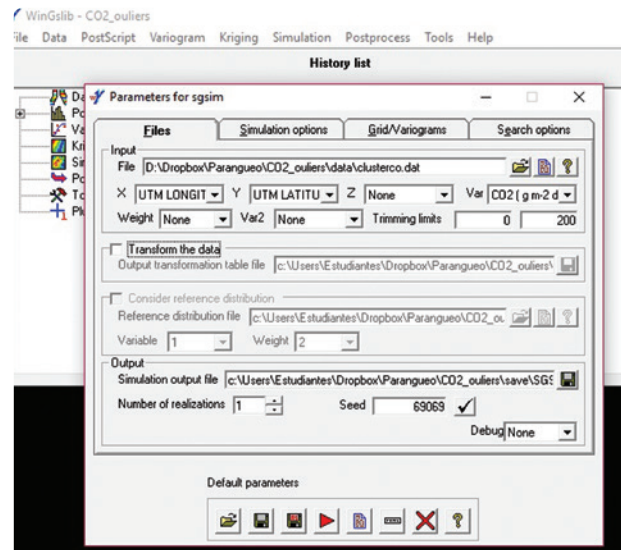


Fig. 52. Pantalla principal de la simulación gaussiana.

Posteriormente se abre el variograma teórico

› Variogram/Variogram file from model

Se abre la ventana y vendrán por default las opciones del último variograma realizado experimentalmente; de no ser así, hay que poner los parámetros del variograma experimental con el que ya estuvimos satisfechos. Hacer clic en play.

Una vez más, el archivo resultante es un archivo de datos, para verlo gráficamente se va a la opción en PostScript y en la columna donde ya teníamos el variograma experimental se puede aumentar la gráfica de otro variograma. Es en este menú donde se deben cambiar las opciones de gráficas para ambos, puesto que debemos identificar el experimental del teórico.

Simulación gaussiana

Una vez hecho el variograma, y con el objetivo de generar un mapa de distribución de flujos y obtener el flujo total en el área de estudio, se puede hacer una simulación gaussiana con los datos.

Para hacer la simulación gaussiana se va al siguiente menú:

› Simulation/Sequential Gaussian

La pantalla para hacer la simulación tiene varias pestañas (Fig. 52):

- Files
- Simulation options
- Grid/Variograms

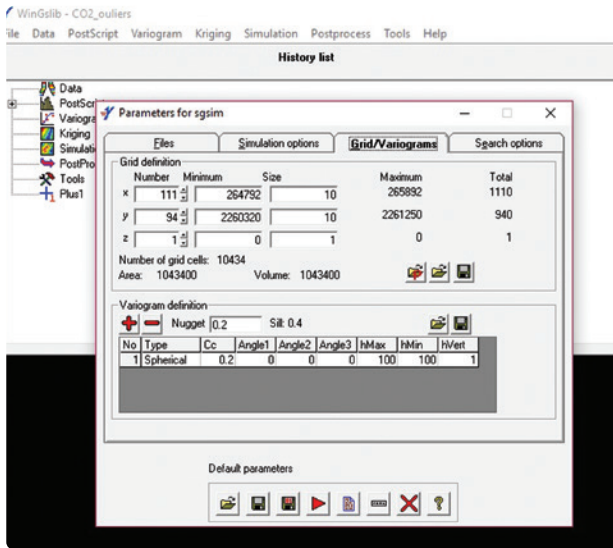


Fig. 53. Pestaña de ajustes del grid para la simulación.

- Search options

En la pestaña de Files están las opciones para el archivo de entrada y las variables. Se dan las opciones de las coordenadas “X” y “Y” en los espacios correspondientes, así como la variable a simular en el espacio de la variable; se nota que la variable debe ser la del archivo de datos transformados.

NS_data.out

En la opción de Number of realizations es donde se deben de poner el número de simulaciones que queremos que haga el programa; se recomiendan hacer más de 100 simulaciones.

El número Seed, es un número aleatorio impar que le sirve para hacer las simulaciones, pero no tiene mayor importancia; puede dejarse el que viene por default.

Se le debe desmarcar la opción Transform the data; pues que no se necesita.

Luego de indicar dónde se encuentra el archivo debemos de ir a ajustar las opciones del grid o la rejilla que queremos para la simulación. Para esto vamos a la pestaña Grid/Variograms (Fig. 53)

Previamente, en otro programa (puede ser surfer, origin, Excel) se deben de anotar los valores máximos y mínimos de las coordenadas.

En los ajustes del grid, se colocan los valores mínimos de X y Y de nuestra zona de estudio, el espaciamiento entre los puntos y el número de puntos; con estos datos se calculan

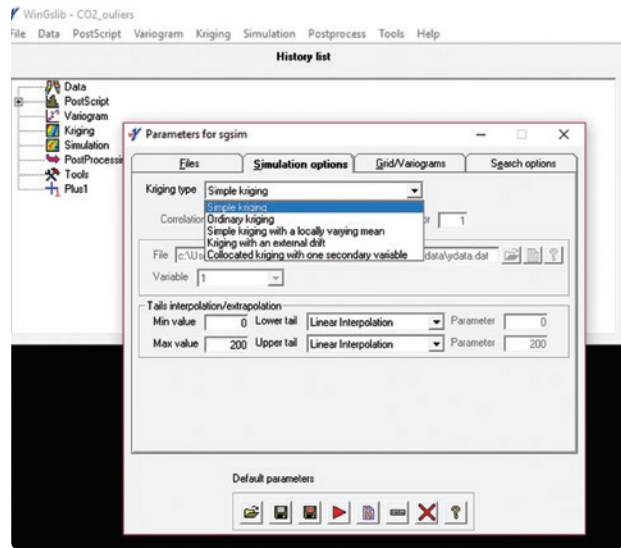


Fig. 54. Elección del método de interpolación; en este caso, Simple Krigging.

automáticamente los valores máximos y así acotar hasta tener el área que se midió realmente y se tienen datos.

En esta misma pestaña estarán por default los valores del último variograma realizado; de no ser éste el último que se modeló para los datos, se deben colocar los valores que corresponden; por ello conviene tener abierta la imagen y la ventana con los parámetros del variograma teórico.

En la pestaña Simulation options se elige Simple Krigging como método de interpolación; luego en la parte inferior se colocan los valores mínimo y máximo de los datos; en el caso de los valores mínimos se elige interpolación lineal, en el caso de los valores máximos se elige interpolación hiperbólica (Fig. 54).

En la pestaña Search Options se dan las opciones de búsqueda de los valores; es decir, cuántos valores previos se desea considerar, cuántos valores usar para la simulación y escribir nuevamente las hMin, hMax y la hVert de las opciones del variograma. Usualmente el programa pone en automático los valores del último variograma teórico realizado; por lo tanto, si trabajamos en una misma sesión nuestro proyecto se tienen los datos del variograma del paso anterior.

Una vez anotados todos los parámetros se hace clic en play e inicia la simulación.

Post Proceso

Una vez realizadas las simulaciones (por lo general se realizan alrededor de 100) se necesita obtener un promedio de éstas para obtener solo un valor de flujo en cada nodo del grid utilizado en la simulación.

Para obtener esto se debe ir a la opción de postproceso dentro del programa. La ruta es la siguiente: (Fig. 55):

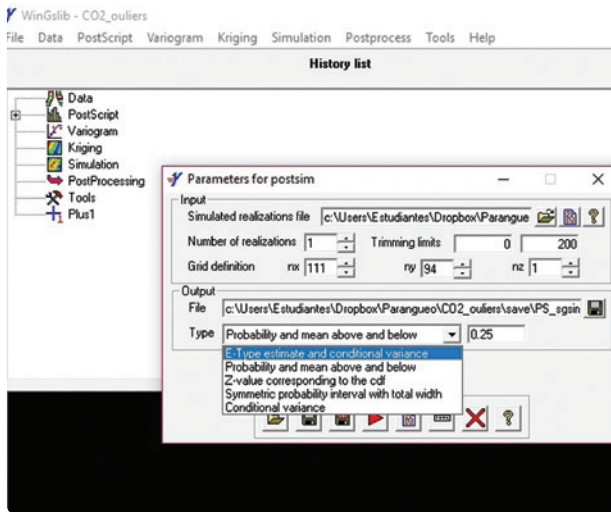


Fig. 55. Elección del tipo de variable del post-proceso de la simulación.

› Postprocess/Processing of multiple simulations

En esta opción se abre una ventana donde se deben de colocar los parámetros principales del grid.

En las opciones de salida, se encuentra el nombre del archivo de salida y el tipo de variable que queremos tener al final. Esto depende del estudio que se esté haciendo y de lo que se desea analizar; la más usual es E-type; lo cual arrojará también la varianza condicional para cada valor. Hay que cuidar que el archivo de entrada para este archivo, sea el archivo de salida del proceso de simulación.

Posteriormente se abre esta opción:

› Postprocess/Add coordinates

Y ahí se colocan nuevamente los parámetros del grid utilizados; puesto que este proceso añadirá las coordenadas a los puntos simulados.

Nuevamente hay que cuidar que el archivo de entrada para este archivo, sea el archivo de salida del post proceso de simulación.

Posteriormente hay que transformar los datos nuevamente; esto se hace con:

› Data/Normal Scores Back Transformation

Hay que cuidar que el archivo de entrada de este proceso sea el archivo de salida de Add coordinates. Se elige como variable E-type. La transformación inversa funcionará siempre y cuando se pongan los valores mínimos y máximos de la transformación tal cual están en la tabla de transformación que el programa genera automáticamente. Si no se escriben estos dos valores tal cual están, el programa arrojará un error pero no explicará cuál es el error.

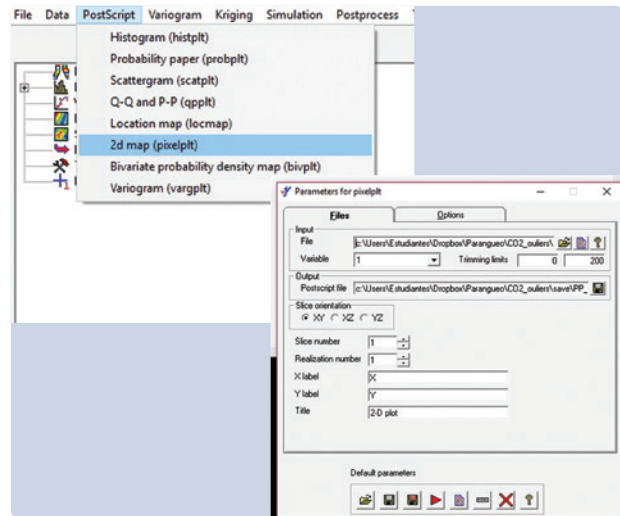


Fig. 56. Elección de la creación de un mapa luego de la simulación.

Primera visualización del mapa en Wingslib®

Se puede hacer una primera visualización del mapa directamente en Wingslib® (Fig. 56)

› PostScript/2d map

Realización del mapa en Surfer®

Utilizando el archivo final que resultó del post proceso, se puede hacer una visualización en Surfer®. Hay dos posibles caminos:

Construcción de un grid Surfer® directamente

Se hace un archivo de texto (puede ser en el editor de texto que se ha estado usando con Wingslib®) con el último archivo que tiene las coordenadas y las variables E-type y varianza.

El archivo de texto se puede hacer cambiando el nombre al archivo y poniéndole terminación .txt o importándolo en alguno de los editores antes mencionados y guardándolo como archivo de texto. Incluso, dependiendo de la versión de Surfer® con que se cuente, se pueden abrir los datos directamente desde una hoja Excel; en cuyo caso, basta con importar el último archivo de la simulación como un documento Excel.

Posteriormente, se abre Surfer® y se busca datos/grid. Esta instrucción es para que haga un grid con el archivo de texto proporcionado.

Al momento de la instrucción se pregunta ¿qué interpolación utilizar para hacer el grid?. Se debe elegir “vecinos cercanos”, pues de esta manera no se afecta mucho el trabajo hecho con la simulación.

Una vez hecho el grid se procede a abrirlo con la opción image map; esto es, se visualiza el grid como mapa.

Construir un grid de Surfer® indirectamente

Se hace uso del software Origin® (quizá haya algún otro que lo permita hacer).

Se deben tener los datos de las coordenadas y los datos del flujo como E-type. Se abre importándolo como ASCII en una hoja de cálculo en el programa Origin® y se da la instrucción

› Worksheet/convertmatrix/XYZ grid

La instrucción puede estar en un menú diverso de acuerdo a la versión de Origin® que se tenga. Lo importante es saber que esta instrucción va a construir una matriz, con columnas y filas de acuerdo a las coordenadas que se tenían inicialmente. Este archivo se exporta como ASCII, se abre en un editor de texto, puede ser el mismo que se utilizó en Wingslib®, y se edita poniendo en las primeras líneas la siguiente información:

```
DSAA
# filas (x) #columnas (y)
Valor Mínimo (x) Valor máximo (x)
Valor Mínimo (y) Valor máximo (y)
Valor Mínimo (flujo) Valor máximo (flujo)
```

Esto se podría ver así por ejemplo:

```
DSAA
50      60
766170  766648
4078385 4078892
0.1     75.65227
```

Debajo de estas filas estará la información original, es decir, la matriz de los flujos de CO₂ representados con la variable E-type resultado de la simulación. Con esta adición se puede construir un grid que el programa Surfer® reconoce. Para terminar, este archivo se debe guardar en formato .grd

Finalmente, se abre el archivo Surfer® con la opción Image map y se le dan las características que se requieran al mapa.

Conclusiones

El mantenimiento y correcta calibración del equipo de medición de flujos de CO₂ determina la posibilidad de medir los valores reales de los flujos de CO₂.

El procesamiento estadístico de los datos de flujos de CO₂ determina la calidad y veracidad de los resultados que se obtengan (mapas y flujos totales).

Las mediciones de flujos de CO₂ arrojan información sobre las zonas de mayor permeabilidad en el área de estudio. En el caso de un sistema volcánico las zonas de mayor desgasificación pueden ser monitoreadas constantemente y sus variaciones pueden ser asociadas a cambios profundos en la componente magmática (para corroborar este tipo de relación se sugiere complementar con muestreo directo y análisis isotópico).

En el caso de la exploración geotérmica este tipo de estudios ayudan a delimitar zonas de alta permeabilidad y la extensión de la anomalía geotermal (al final se dejan lecturas sugeridas para ambos tipos de estudios).

Agradecimientos

Se agradecen las explicaciones y aclaraciones de la técnica del Dr. Salvatore Inguaggiato, del INGV, Palermo, Italia y del Dr. Carlo Cardellini de la Universidad de Perugia, Italia.

Se agradecen todas las correcciones y sugerencias de los dos revisores, uno anónimo y el otro, el Dr. Peter Schaaf. Sus comentarios enriquecieron y mejoraron ampliamente este manual.

Se agradece la comunicación, apoyo y guía de la maestra Andrea Rostán Robledo durante todo el proceso editorial.

Referencias

- Baubron, J.C., P. Allard and J.P. Toutain (1990). Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature* pp. 344, 51–53.
- Cardellini, C., G. Chiodini, F. Frondini, (2003). Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: mapping and quantification of gas release. *J. Geophys. Res.* 108 (B9) 2425.
- Cartagena, R., R. Olmos, D. López, T. Soriano, F. Barahona, P. Hernández, N. Pérez, (2004) Soil degassing of carbon dioxide, radon, and mercury at San Miguel volcano, El Salvador. Geological Society of America. *Special Paper* 375-15.
- Chiodini G., R. Cioni, M. Guidi, B. Raco, L. Marini. (1998) Soil CO₂ measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*. Vol 13 No. 5 pp. 543-552.
- Chiodini, G., F. Frondini, C. Cardellini, D. Granieri, L. Marini, G. Ventura, (2001) CO₂ degassing and energy release at Solftara volcano, Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research* 106, 16,213 – 16,221.
- David, M., (1977). Geostatistical ore reserve estimation. *Elsevier Scientific Pub., Co., New York* pp. 364.

- Doménech, X.(2000). Química atmosférica, origen y efectos de la contaminación. *Editorial Miraguano España*, pp. 174.
- Giammanco S., S. Gurrieri y M. Valenza.(1997). Soil CO₂ degassing along tectonic structures of Mount Etna (Sicily): the Pernicana fault. *Applied Geochemistry*, Vol 12. Pp. 429-436.
- Inguaggiato S., M.P. Jácome Paz, A. Mazot, H. Delgado Granados, C. Inguaggiato, F. Vita (2013) CO₂ output discharged from Stromboli Island (Italy). *Chem. Geol.*
- López, D., L. Ransom, N. Pérez, P. Hernández, J. Monterrosa (2004). Dynamics of diffuse degassing at Ilopango Caldera, El Salvador. *Geological Society of America. Special Paper* 375.
- Mazot A., Y. Taran (2009), CO₂ flux from volcanic lake of El Chichón (Mexico). *Geofísica Internacional* 48 (1) pp. 73-83.
- Pérez N. M., G. D. Padilla, E. Padrón, P. A. Hernández, G. V. Melián, J. Barrancos, S. Dionis, D. Nolasco, F. Rodríguez, D. Calvo, and I. Hernández (2012) Precursory diffuse CO₂ and H₂S emission signatures of the 2011–2012 *El Hierro submarine eruption, Canary Islands, Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2012GL052410.
- Rogie, J. D., D. M. Kerrick, M. L. Sorey, G. Chiodini, D. L. Galloway (2001) Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California. *Earth and Planetary Science Letters* 188 535 - 541.
- Sagarra, D. H. Tecnologías para medición de ácido sulfhídrico. *Field Application Engineer*. Flowmeet. Argentina. www.flowmeet.com - info@flowmeet.com
- Salazar J. M. L., P. Hernández, N. M. Pérez, G. Melián, J. Álvarez, F. Segura, K. Notsu (2001) Diffuse emission of carbon dioxide from Cerro Negro volcano, Nicaragua, Central America. *Geophysical Research Letters*. 28 4275 - 4278
- Sinclair, A. J., (1974). Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs. *J. Geochem. Explor.* 3, 129–149.
- different sources feeding soil CO₂ degassing in volcanic-hydrothermal areas. *Earth an Planetary Science Letters* 274 pp. 372-379.
- Deutsch, C. V., A. G. Journel (1998) GSLIB: Geostatistical Software Library and users guide, 2nd edn. *Oxford University Press, New York*, pp. 369.
- Hernández, P. A., K. Notsu, J. M. Salazar, T. Mori, G. Natale, H. Okada, G. Virgili, Y. Shimoike, M. Sato, and N. M. Pérez (2001a) Carbon dioxide degassing by advective flow from Usu volcano, Japan. *Science*, 292: 83-86.
- Inguaggiato S., L. Calderone, C. Inguaggiato, S. Morici, and F. Vita, (2011) Dissolved CO₂ in natural waters: development of an automated monitoring system and rst application to Stromboli volcano (Italy). *Annals of Geophysics*, 54, 2, 2011; doi:10.4401/ag-5180.
- Inguaggiato, S., A. Mazot, I. S. Diliberto, C. Inguaggiato, P. Madonia, D. Rouwet, F. Vita (2012) Total CO₂ output from Vulcano island (Aeolian Islands, Italy) *Geochemistry, Geophys.*
- Jácome Paz, M.P., González – Romo I.A., Prol-Ledesma R.M., Pérez-Zarate D., Rodríguez A, Estrada – Murillo A. 2020. Multivariate analysis of Temporal variations of diffuse degassing and correlation with main faults in Agua Caliente - Tzitzio, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106808> Vol 394 No 1.
- Jácome Paz, M.P., C. Inguaggiato., G. Levresse., P. Robidoux., H. Delgado Granados., F. Tassi. Total CO₂ output and carbon origin discharged from Rincón de Parangueo Maar (Mexico). 2020. *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106558>
- Jácome Paz, M.P., S. Inguaggiato, Y. Taran, F. Vita and Giovannella Pecoraino. (2016) Carbon dioxide emissions from Specchio di Venere, Pantelleria, Italy - *Bull Volcanol.* 78:29.
- Jácome Paz, M.P., Y. Taran, S. Inguaggiato and N. Collard. (2016). CO₂ flux and chemistry of El Chichón crater lake (Mexico) in the period 2013-2015: Evidence for the enhanced volcano activity. *Geophys. Res. Lett.*, 43 127 – 134.
- Kanemasu, E.T., W.L. Powers and, J.W. Sij. (1974). Field chamber measurements of CO₂ flux from soil surface. *Soil Sci.* 118, 233-237.
- Kimball, B.A., H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair. (1983). Canopy gas exchange: Gas exchange with soil. In: *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. American Society of Agronomy*. Madison, WI. pp. 215-226.
- Lamberti, M. C., Vigide, N., Venturi, S., Agosto, M., Yakupsky, D., Winocur, D., Barcelona, H., Velez, M.L., Cardellini, C., Tassi, F., 2019. Structural architecture releasing deep-sourced carbon dioxide diffuse degassing at the Caviahue-Copahue Volcanic Complex. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 374, 131 – 141.

Lecturas Recomendadas

- Allard, P., J. Carbonelle, D. Dajlevic, J. Le Bronec, P. Morel, M. C. Robe, J. M. Maurenas, R. Faivre-Pierret, D. Martin, J. C. Sabroux and P. Zettwoog (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature* 351, 387–391.
- Camarda, M., S. Gurrieri, M. Valenza. 2009. Effects of soil gas permeability and recirculation flux on soil CO₂ flux measurements performed using a closed dynamic accumulation chamber. *Chemical Geology* 265. Pp. 387-393.
- Chiodini, G., S. Caliro, C. Cardellini, R. Avino, D. Granieri, A. Schmidt (2008) Carbon isotopic composition of soil CO₂ efflux, a powerful method to discriminate

"Uso del flujómetro de West System® y elaboración de mapas con Wingslib®"
editado por la Unidad de Apoyo Editorial.