

## *Estado de los Volcanes 2012 Resumen Anual Oficial*



*Volcán Turrialba el 18 de enero 2012: En el centro, la boca 2012 con flamas por la combustión de gases magmáticos altamente oxidantes (Foto: J.Pacheco). A la derecha, emisión de cenizas a las 4:30pm el mismo día (Foto: G.Avard). A la izquierda, incandescencia en la boca 2012 (Foto: G.Avard 2-2-2012, 8pm).*

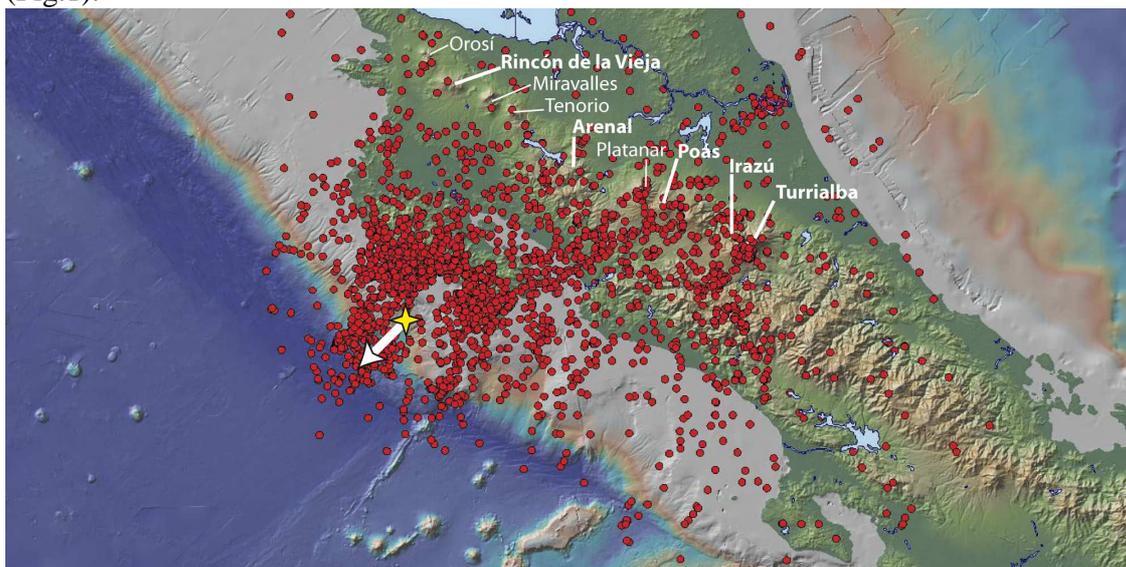
Geoffroy Avard, Javier Pacheco, María Martínez, Rodolfo van der Laat, Efraín Menjivar,  
Enrique Hernández, Tomás Marino, Wendy Sáenz, Jorge Brenes, Alejandro Agüero,  
Jackeline Soto, Jesús Martínez

**Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica  
OVSICORI-UNA**

## ***I\_ Introducción***

El 5 de setiembre del 2012, a las 8:42 a.m., ocurrió un terremoto de magnitud  $M_w = 7.6$ , 20 km al sur de Sámara, en la Península de Nicoya, Guanacaste. La dislocación máxima de la falla fue de 2.5 m con un levantamiento máximo de unos 60 cm en Playa San Juanillo (informe del 11 de setiembre del 2012 del OVSICORI).

El deslizamiento en la falla continúa hasta el fin del mes de setiembre como movimiento postsísmico, con sismos lentos, relajación viscoelástica y replicas ( $> 2500$  durante los 10 días posteriores al sismo de Nicoya). La sismicidad se extendió por casi todo el país (Fig.1).



*Figura 1: Sismicidad durante setiembre del 2012 y ubicación de los volcanes principales. Estrella amarilla: epicentro del sismo de Nicoya del 5 de setiembre ( $M_w = 7.6$ ). Flecha blanca: dirección del deslizamiento por el terremoto de Nicoya. (mapa: Walter Jiménez Urrutia, Evelyn Núñez, y Floribeth Vega del grupo de sismología del OVSICORI-UNA).*

En lo que concierne a los volcanes, el sismo de Nicoya generó una gran actividad sísmica especialmente en los complejos volcánicos Irazú-Turrialba y en el volcán Poás así como una actividad sísmica anormal en los volcanes Miravalles, Tenorio, y Platanar-Porvenir principalmente. Aunque no se notaron cambios importantes en la actividad volcánica superficial, la actividad sísmica elevada se observó por un periodo de varios semanas.

El efecto más relevante observado en los volcanes fue la activación de fallas tectónicas asociadas a los volcanes, tanto en Costa Rica, como en Nicaragua. La actividad volcano-tectónica se disparó con el sismo de Nicoya generando enjambres sísmicos ubicados en las cercanías de la mayoría de los volcanes activos y de algunos en reposo. Sin embargo, no se notaron cambios significativos en la sismicidad volcánica propiamente o en manifestaciones externas (erupciones freáticas, emanación inusual de gas, etc) en ninguno de los volcanes activos de Costa Rica. Cambios importantes sí se produjeron en algunos volcanes de Nicaragua (San Cristóbal, Telica, Apoyeque), sin embargo, aunque existe una relación causal, no se puede atribuir estos cambios directamente al sismo de Nicoya, ya que estos volcanes habían estado presentado actividad de manera intermitente en los últimos años. Los cambios que puedan sufrir los volcanes por la ocurrencia de un

gran sismo cercano se deben a cambios en el estado de esfuerzos, ya sea estático o dinámico. El paso de las ondas sísmicas inducen cambios dinámicos, mientras la deformación debido a la dislocación de la falla produce cambios estáticos. En ambos casos, el sistema volcánico responde con un retraso, dada la naturaleza viscoelástica del medio o las constantes de difusión de los diversos fluidos involucrados (*Brodsky et al., 2003*). Por supuesto, para que ocurra una reacción, debe existir un cuerpo magmático saturado de gases en una cámara magmática superficial. Por lo tanto, solo aquellos volcanes que habían estado presentando algún tipo de actividad magmática reaccionarían ante un gran sismo cercano o lejano de gran magnitud (*Cannata et al., 2010*).

## II\_ Volcán Turrialba

### II\_1 V.Turrialba: Resumen de los eventos principales durante el año 2012

El 12 de enero del 2012 a las 3 p.m., el volcán Turrialba emitió cenizas durante algunas horas debido a la apertura de una boca, la Boca 2012, ubicada en la pared interna suroeste del Cráter Central (Fig.2a). Al día siguiente la boca tenía un conducto superficial de menos de 1m de diámetro. El 18 de enero del 2012 a las 3 p.m., la misma boca emitió cenizas de nuevo por algunas horas (Fig.2b), aumentando el diámetro del conducto a ~3m. Desde esta fecha al presente, la Boca 2012 contribuye activamente a la formación de la pluma volcánica del Turrialba que, en ocasiones, viaja largas distancias hasta alcanzar territorios como Nicaragua o los Océanos Pacífico y Atlántico. Los gases que expulsa la Boca 2012 alcanzan temperaturas de alrededor de 800°C.

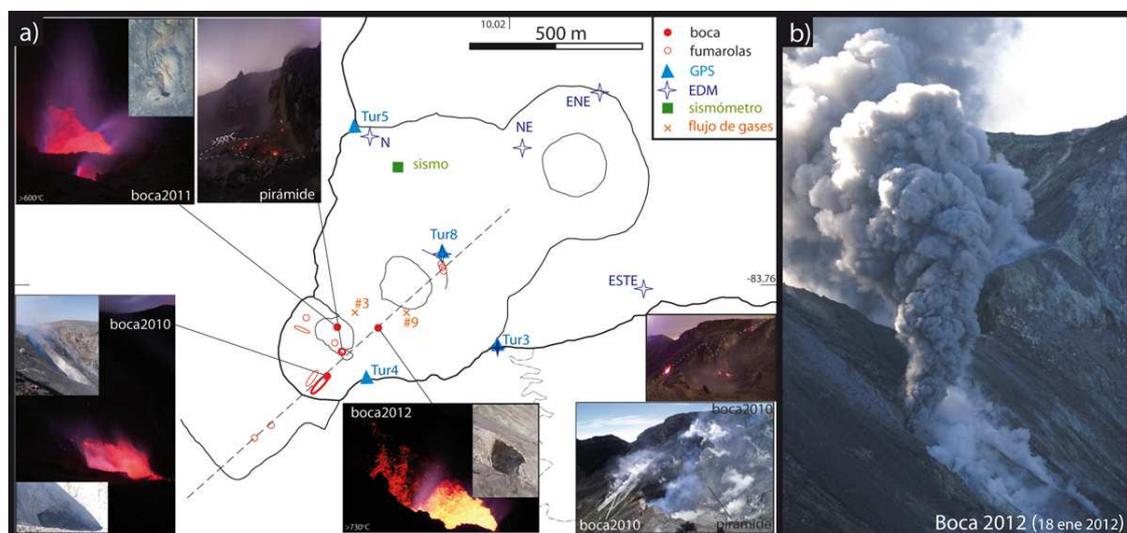


Figura 2: a) Mapa de los cráteres sumitales del volcán Turrialba y ubicación de las anomalías térmicas principales, particularmente las bocas activas (Boca 2010, Boca 2011 y, Boca 2012). b) Segunda emisión de ceniza el 18 de enero del 2012 que aumentó el diámetro de la Boca 2012 una semana después de su apertura. (Fotos: G.Avard)

## II\_2 V.Turrialba: Actividad Sísmica

En el 2012, la actividad sísmica en el volcán Turrialba estuvo dominada por sismicidad superficial relacionada con la actividad hidrotermal e interacción agua-gas-roca (movimiento de fluidos en el acuífero subterráneo del volcán, fracturación de la roca por inyección de fluidos calientes y presurizados). Es interesante contrastar la sismicidad volcano-tectónica en el Turrialba con la del volcán Irazú (Fig.3). Mientras que la sismicidad en el Irazú se ubica en todo el edificio volcánico, con profundidades entre el nivel del mar y 5 km de profundidad, la sismicidad volcano-tectónica en el Turrialba se concentra en la región cuspidal del volcán, con poca sismicidad en fallas aledañas. La sismicidad en el volcán Irazú, probablemente está relacionada con sistemas de falla que se activan por variaciones en los esfuerzos locales y regionales, mientras que la sismicidad en el volcán Turrialba se relaciona con fracturas en la roca por inyección de fluidos, es decir hidrofracturamiento por la interacción agua-gas-roca, producto de la desgasificación de un cuerpo magmático cercano a la superficie.

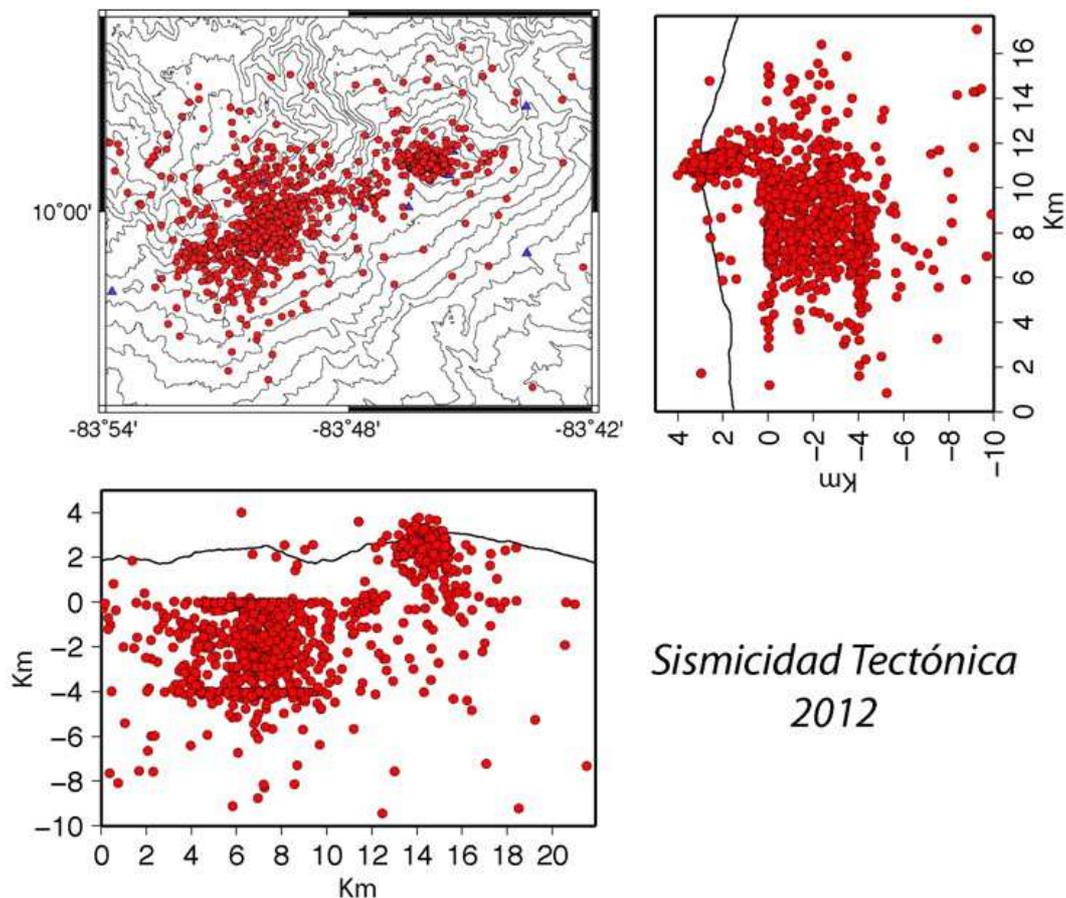


Figura 3: Sismicidad registrada entre los volcanes Irazú y Turrialba durante el año 2012.

Por otro lado, la sismicidad volcánica en general se mantuvo con una actividad mucho menor a la mostrada en los años previos 2011 y principalmente el 2010. La Figura 4 muestra el número de sismos diarios contabilizados desde enero hasta diciembre, 2012. Luego del leve incremento en la actividad sísmica en enero, después de la apertura del boquete en la pared interna suroeste del Cráter Central, la actividad disminuye hasta

mediados de marzo cuando se registra un enjambre de sismos volcánicos superficiales y de muy baja amplitud, lograndose contabilizar hasta 280 el día 15 de marzo. Esta actividad solo dura 4 días y vuelve a decaer a menos de 100 eventos diarios para el 18 de marzo. Valores de sismicidad de menos de 50 eventos diarios se mantienen por casi todo el año hasta inicios de setiembre, cuando se nota un incremento paulatino que alcanza valores máximos entre mediados de octubre y la primera quincena de noviembre cuando se contabilizan más de 100 sismos diarios, para luego caer a valores de menos de 50 sismos diarios para finales de noviembre y valores de un dígito a finales de diciembre (Fig.4).

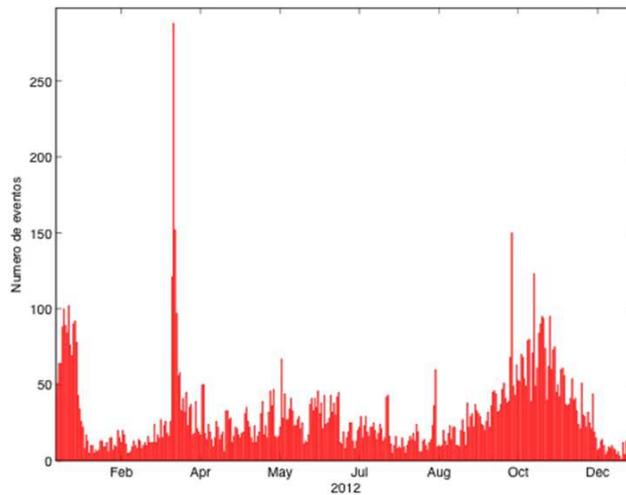


Figura 4: Número de sismos volcánicos registrados diariamente en el volcán Turrialba en el año 2012.

### II\_3 V.Turrialba: Deformación

Una red de mediciones electrónicas de distancia en la cumbre del volcán Turrialba (Fig.5a) nos permite monitorear la deformación cortical del edificio volcánico, cumbre y cráteres.

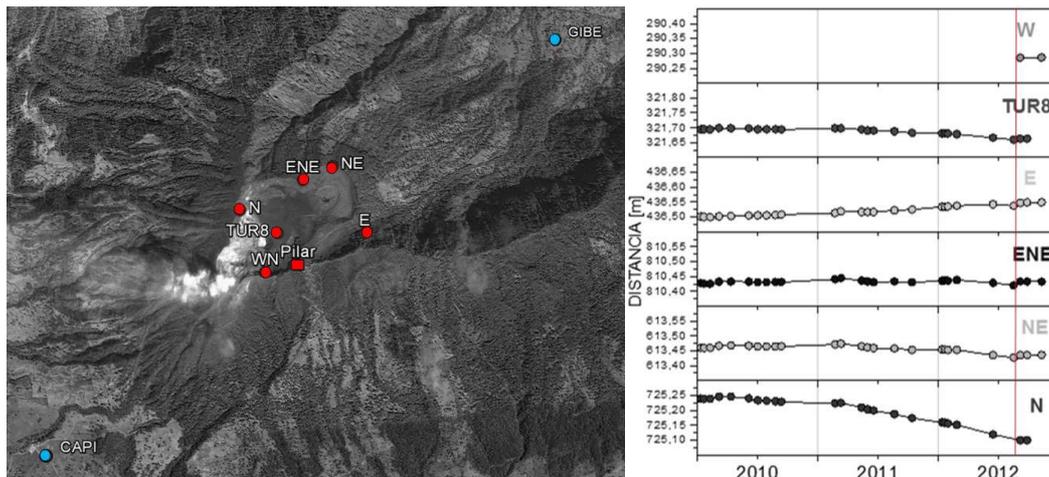


Figura 5: a) Red geodésica del volcán Turrialba, año 2012. Círculos rojos representan, reflectores de la red EDM medidos desde el monumento Pilar. Estaciones color cian, son estaciones GPS permanentes (CAPI y GIBE). b) Longitudes de las líneas EDM de la red mostrada en la Fig.5a, durante el período 2010-2012. La línea roja representa el terremoto del 5 de setiembre. Nótese en el año 2012 la contracción general en las distancias

Para el año 2012 se ha registrado una tendencia de contracción general en las distancias de la red de la cima del volcán Turrialba. El cambio más significativo, es de 7 cm/año, y lo muestra la línea al reflector N (Ver Fig.5b y red en Fig.5a). El reflector NE presenta 3.6 cm/año, mientras TUR8 presenta 3 cm/año. Los reflectores ENE y E presentan magnitudes de contracción bajo 2 cm/año. La línea roja representa el terremoto del 5 de setiembre donde se presentó una expansión en las líneas (Estado de los volcanes setiembre 2012).

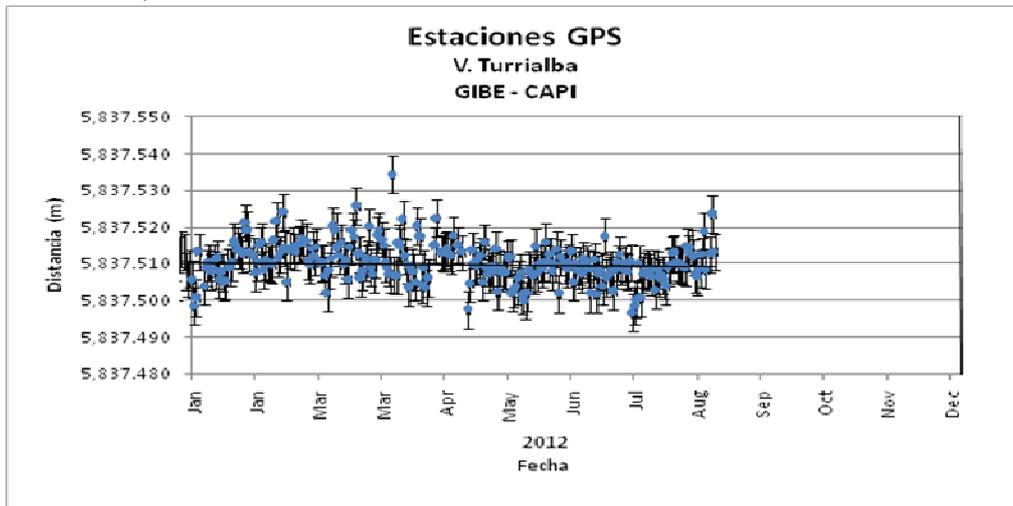


Figura 6: Gráfico de la distancia geométrica entre las estaciones GPS permanentes CAPI-GIBE para el año 2012.

La línea base de GPS entre los instrumentos CAPI y GIBE muestra cambios que oscilan en el rango de 2 cm, durante el período 2012. Un pequeño porcentaje de las observaciones están fuera de ese rango atribuible a los cambios en la ionosfera y cantidad de agua en el ambiente debido a la época lluviosa y seca. Observando la Figura 6. La tendencia general es de contracción, con magnitud que no es significativa (2 mm), ya que es menor a la exactitud de los datos ( $\pm 5$  mm). En general, tomando en cuenta los resultados de la red EDM de la cima y la longitud de la línea base de GPS CAPI-GIBE, se puede afirmar que no ha habido, durante el período 2012 inyecciones magmáticas profundas. Durante el 2012, se realizaron campañas GPS como parte de una práctica universitaria en donde se determinó que el mayor desplazamiento encontrado, se ubicó en el punto Pilar, específicamente en la componente Este (9cm).

#### II\_4 V.Turrialba: Actividad Magmática-hidrotermal

La apertura de la Boca 2012 no se asocia con actividad magmática nueva. Consideramos que la formación de la misma, al igual que la bocas 2010 y 2011, corresponde a la apertura de conductos o grietas superficiales a través del sistema hidrotermal somero que subyace debajo de la región ocupada por el Cráter Oeste debido a presurización del mismo. La similitud de las temperaturas de las plumas de gases emitidas a través de las 3 bocas fumarólicas en cuestión, Boca 2010 (temperatura estimada  $\sim 600^{\circ}\text{C}$ ), Boca 2011 (temperatura medida directamente con termocupla entre  $580$  y  $620^{\circ}\text{C}$ ), y Boca 2012 (entre  $750$  y  $805^{\circ}\text{C}$ , Fig.7) sugiere que estas bocas fumarólicas son parte de una red de grietas alimentadas por la misma fuente magmática de calor y volátiles.

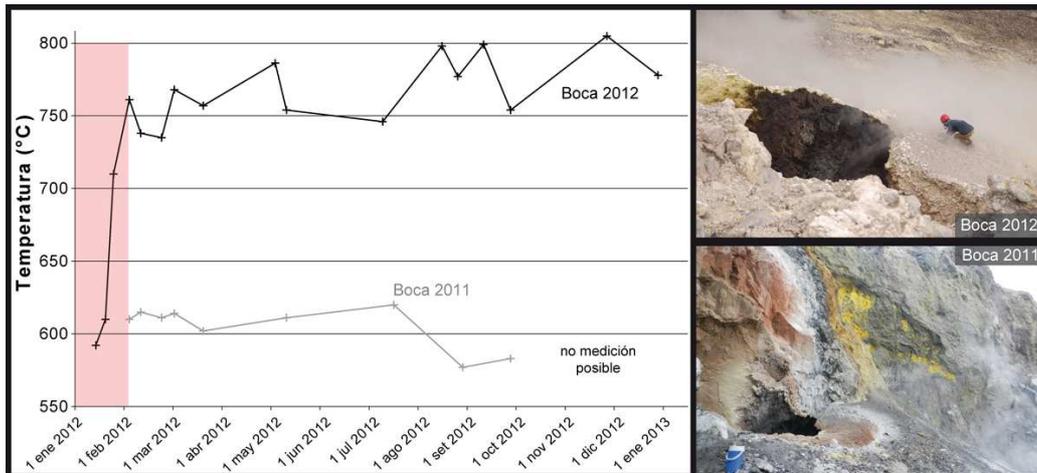


Figura 7: Evolución de la temperatura de las Bocas 2011 y 2012 medidas gracias a un termocuple. El acceso a la Boca 2012 fue difícil en enero 2012 lo que afectó las mediciones y el acceso a la Boca 2011 no fue posible a la fin de 2012 por razones climáticas (Fotos: C.Muller y G.Avard).

Desde mayo del 2012 hemos puesto a funcionar de nuevo una estación mini DOAS permanente del proyecto NOVAC en la Escuela La Central ~2.2 km al suroeste del Cráter Oeste que nos permite medir la concentración del  $\text{SO}_2$  en la pluma del volcán. Considerando las características del viento, podemos estimar el flujo de este gas magmático (Fig.8a) con una incertidumbre importante (hasta por un factor de 2). Sin embargo, el orden de magnitud de las mediciones realizadas con el miniDoas se comparan muy bien con mediciones satelitales obtenidas con instrumentos OMI a bordo del satélite AURA de la NASA (Fig.8b). En el 2012, tanto el miniDoas como los datos satelitales mostraron un flujo de  $\text{SO}_2$  bastante estable, con valores fluctuando entre  $300 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  en mayo y  $800 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  en julio y noviembre (para mini-DOAS) y entre los  $20$  y  $580 \text{ td}^{-1}$  (para el OMI-AURA), lo que representa un flujo de  $\text{SO}_2$  bastante bajo en comparación con los flujos medidos en el período 2009-2010 que alcanzaron hasta  $4000 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{SO}_2$ .

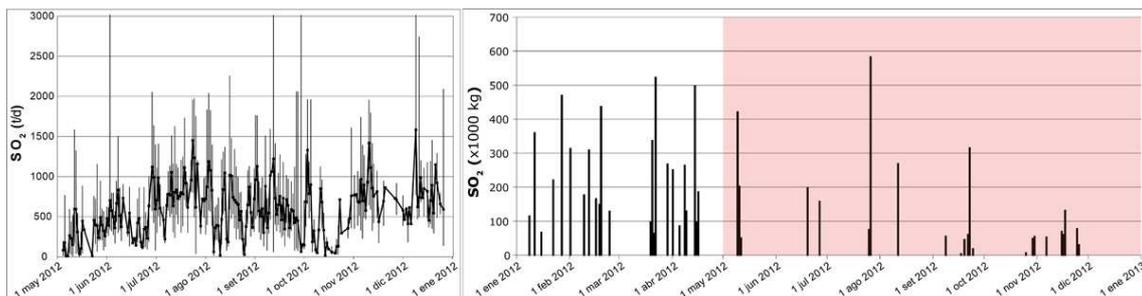


Figura 8: a) Flujo diario de  $\text{SO}_2$  medido por una estación mini DOAS ubicada en La Central. b) Masa de dióxido de azufre,  $\text{SO}_2$ , emitida por el volcán Turrialba inferida del análisis de imágenes satelitales del OMI-AURA de la NASA entre octubre 2008 y el 31 de diciembre del 2012. Los datos de masa de  $\text{SO}_2$  corresponden al total de  $\text{SO}_2$  detectado por el instrumento OMI del satélite AURA en la región de América Central de modo que la información no está corregida respecto al nivel "de fondo" de  $\text{SO}_2$ . Estos datos corresponden a mediciones hechas cuando el satélite sobrevuela sobre el istmo centroamericano entre las 18:00-19:00 UTC. Fuente: <http://so2.gsfc.nasa/>.

## II\_5 V.Turrialba: Actividad hidrotermal

La actividad hidrotermal corresponde a la actividad debida a la circulación de fluidos de origen principalmente meteórico que interaccionan con el calor y los gases generados por un cuerpo magmático subyacente. El movimiento de fluidos a través del sistema de grietas del sistema hidrotermal superficial genera vibraciones y fracturación de la roca originando así gran parte de la actividad sísmica del volcán en 2012 (Figs. 3 y 4). El sistema hidrotermal captura y transporta parte del calor y del flujo de volátiles magmáticos hasta la superficie a través de un proceso de circulación, y además juega un papel muy importante como amortiguador de fluctuaciones rápidas de composición y de flujo de calor que puede presentar la actividad magmática. La repetición sucesiva de mediciones del flujo de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  que difunden a través de la superficie del suelo, a lo largo de un perfil entre el Cráter Oeste y el Cráter Central mostró un aumento en el flujo de estos gases en este sector antes de la apertura de la Boca 2012 (Fig.9). Este aumento en el flujo de gases fue seguido por una disminución abrupta en 2 eventos de emisión de cenizas no juveniles, una el 12 y otra el 18 de enero del 2012. Luego de la apertura de la Boca 2012, el nivel de difusión de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  a través del suelo se ha mantenido entre estable y con una tendencia a disminuir. Estas observaciones coinciden con una disminución en la transferencia de volátiles magmáticos hacia la atmósfera de acuerdo a las mediciones de flujo de  $\text{SO}_2$  a través de la pluma volcánica (Fig.8). Así, en forma general podemos pensar en que el cuerpo magmático que fue intruido a niveles superiores posiblemente en algún momento entre los años 2001-2007 (Vaselli *et al.*, 2010) se ha ido cristalizando y empobreciendo en volátiles.

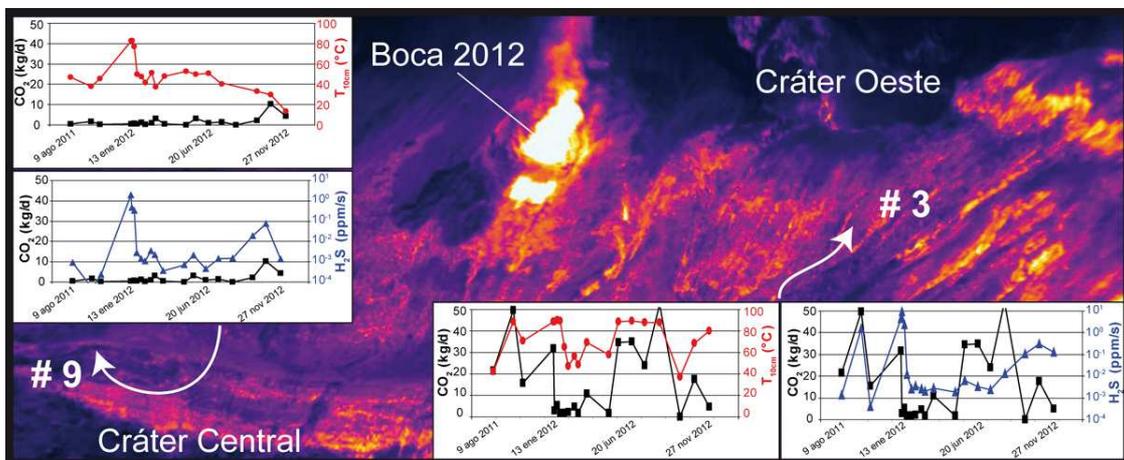


Figura 9: Termograma de la pared oeste del Cráter Central el 27 de octubre del 2012 y flujo de  $\text{CO}_2$  (en negro), de  $\text{H}_2\text{S}$  (en azul) y temperatura a 10 cm de profundidad (en rojo) para los puntos de mediciones 3 y 9 (Fig.2) (Imagen: G.Avard)

## II\_6 V.Turrialba: Afectación Ambiental y erosión

### II\_6.1 Afectación ambiental

La persistente lluvia y niebla ácidas combinadas con la interacción directa con los gases volcánicos continúan afectando la vegetación natural y exótica, el suelo, y la infraestructura en las cercanías del volcán. En el transcurso del año 2012 no se notó ninguna recuperación del bosque en los sectores más afectados por los vientos predominantes (sectore suroeste-norte, Fig.10).



Figura 10: Volcán Turrialba el 26 de agosto del 2012. La vegetación en la cima y los flancos (zona 1) del volcán muestran efectos severos como la necrosis (muerte del tejido vegetal), por otro lado los pastos (zona 2) usados para el ganado lechero muestran clorosis (amarillamiento del tejido vegetal). Es interesante observar que parte de la vegetación nativa como los grandes árboles de *Quercus sp* muestran resistencia a la acidificación del medio (Fotos: G.Avard).

En los años 2011 y 2012 la depositación ácida tanto húmeda como seca recolectada en varias estaciones de muestreo alrededor del volcán Turrialba ha mostrado valores de pH con una clara tendencia a aumentar lo que indica que la depositación total está siendo gradualmente menos ácida (Fig.11). La implicación más importante de esta tendencia general es que el flujo de volátiles magmáticos hacia la atmósfera se ha reducido sustancialmente en los 2 últimos años en comparación con el alto nivel de emisión que se observó en los años 2009 y 2010. Sin embargo el volcán continuará con un nivel importante de desgasificación magmática durante los próximos años hasta que el cuerpo magmático superficial se enfrí lo suficiente como para que impere otra vez un régimen de carácter más hidrotermal como el que existía antes del período 2005-2007 cuando el volcán despertó.

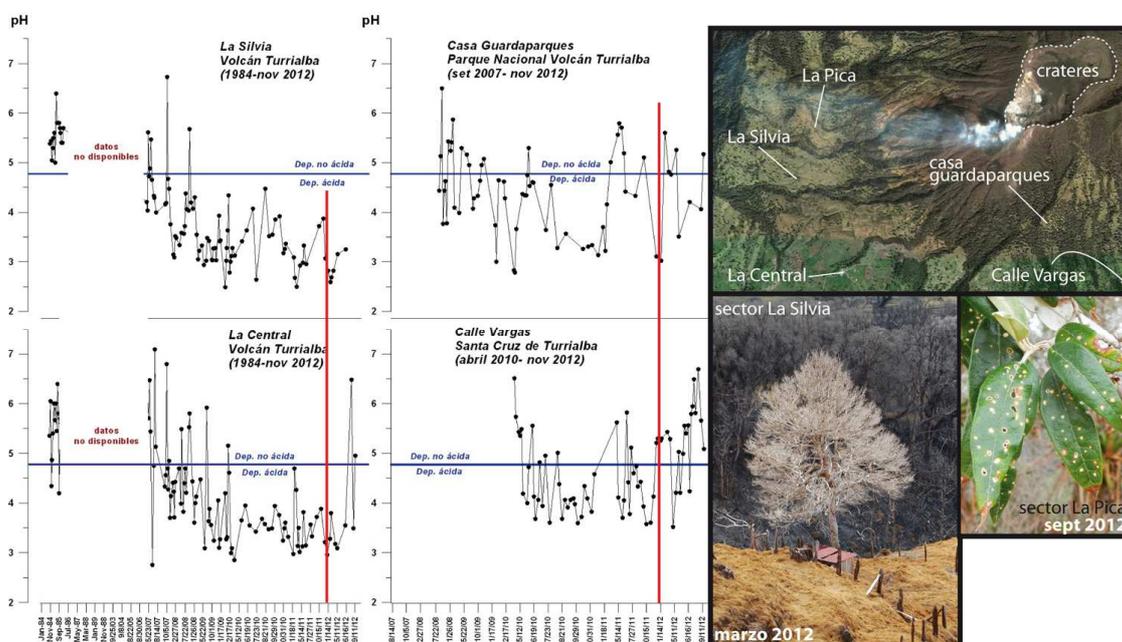


Figura 11: pH (nivel de acidez) de la depositación total (húmeda + seca) recolectada en las estaciones de muestreo La Silvia (2.6 km W de la cima), La Central (2.2 km SW de la cima), Casa Guardaparques y Calle Vargas en las inmediaciones del volcán Turrialba. Valores de  $pH \leq 5.6$  corresponden a depositación ácida (línea azul). Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica "Dr. Eduardo Malavassi Rojas" del OVSICORI-UNA.

## II\_6.2 Cambios por el proceso de erosión

La actividad hidrotermal modifica la mineralogía y disminuye la cohesión de las rocas en contacto con los fluidos. Así resulta una alteración e inestabilidad importante de las paredes del edificio volcánico que puede desencadenar colapsos gravitacionales y derrumbes, así como fuerte erosión durante eventos lluviosos. Esto se notó particularmente después de las tormentas de 15 de agosto y de noviembre del 2012 las cuales produjeron el transporte de material rocoso grueso y fino desde la pared interior norte del Cráter Central hacia el fondo del cráter, así como el aumento del tamaño de algunas grietas al oeste y noroeste del Cráter Central.

## **III\_ Volcán Irazú**

### *III\_1 V.Irazú: Resumen de los eventos principales durante el año 2012*

El volcán Irazú no presentó cambios particulares en el nivel de desgasificación fumarólica ni en la geoquímica de las fuentes termales del sector noreste durante el año 2012 a excepción del registro de mayor actividad sismo-tectónica en los días que sucedieron al sismo de Nicoya del 5 de setiembre del 2012. El lago en el Cráter Principal mostró fluctuaciones en su nivel alcanzando un nivel mínimo a finales del año, aunque en general el nivel se mantuvo muy bajo.

### *III\_2 V.Irazú: Actividad Sísmica*

El volcán Irazú sigue mostrando gran actividad sismo-tectónica que podría ser reflejo de cambios en los esfuerzos locales y regionales. La mayor actividad sísmica se registró casi inmediatamente después del sismo de Nicoya del 5 de setiembre, 2012 (Mw 7.4). En la Figura 3 se muestran los sismos volcano-tectónicos localizados durante el 2012. La red sísmica actual no permite la precisión en las localizaciones como para asociar los sismos a los diversos sistemas de fallas identificadas en el macizo volcánico. Los sismos se distribuyen por todo el macizo de manera casi uniforme, pero principalmente bajo la cima del volcán, entre la superficie y 5 km de profundidad.

Aunque se registra actividad sísmica casi todo el año en el volcán Irazú, la Figura 12 muestra 3 períodos en los cuales la actividad fue mayor; 9 de enero, 27-28 de junio y del 5 al 8 de setiembre. Los sismos de enero se localizaron hacia el sureste del Cráter Principal, los de junio hacia el norte y noroeste del cráter y los de setiembre se ubican preferentemente bajo la zona sumital del volcán.

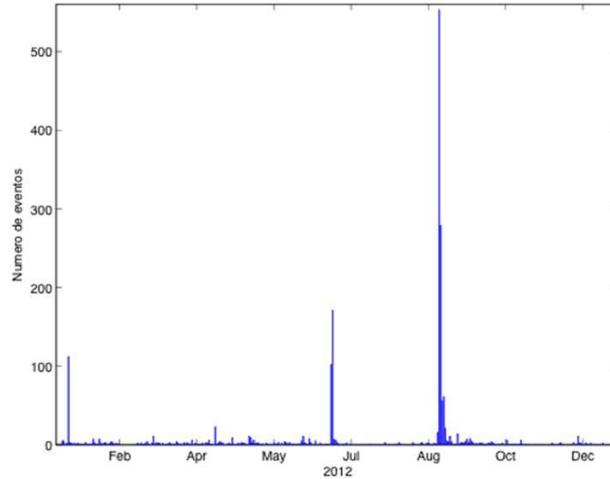


Figura 12: Número de sismos volcano-tectónicos diarios registrados en el volcán Irazú

La actividad sísmica volcánica estuvo dominada por sismos tipo LP. Esta sismicidad mostró una periodicidad bastante estable hasta el mes de setiembre del 2012, a partir del cual se aprecia un incremento en el número de sismos volcánicos. Estos sismos son del tipo LP con frecuencia dominante de 1.56 Hz, pero de variable amplitud (Fig.13). Las amplitudes registradas en la estación sísmica VIRE varían entre 1 y 30 micrones, mientras los intervalos de tiempo entre los eventos varió de alrededor de 30 horas entre junio y setiembre a alrededor de 15 horas a finales de noviembre y diciembre. Esta variación indica un incremento paulatino de la actividad hidrotermal, probablemente asociada al sismo de Nicoya del 5 de setiembre. La actividad sismo-tectónica alrededor del Irazú, asociada con este sismo de Nicoya, pudo abrir nuevas grietas en profundidad por donde asciende mayor calor hacia el sistema hidrotermal.

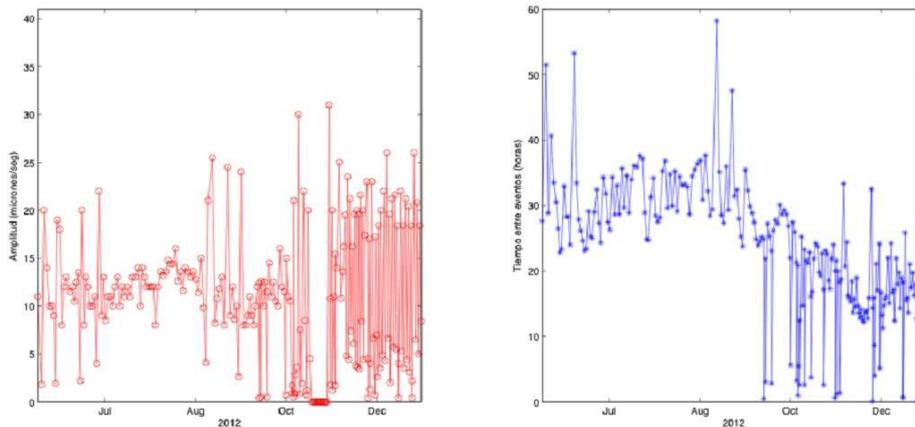


Figura 13: A) Variación de la amplitud en micrones de los sismos volcánicos en el Irazú con el tiempo. B) Variación de la frecuencia con que se producen los sismos volcánicos con el tiempo

### III\_3 V.Irazú: Deformación

Las deformaciones de las líneas EDM para los reflectores en el año 2012 (Fig.14a), presentan (Fig.14b) una tendencia general de contracción en el orden de milímetros (5 a 3

mm). Contrario a la tendencia observada desde mitad del año 2008 a finales 2011, donde se apreciaba una inflación.

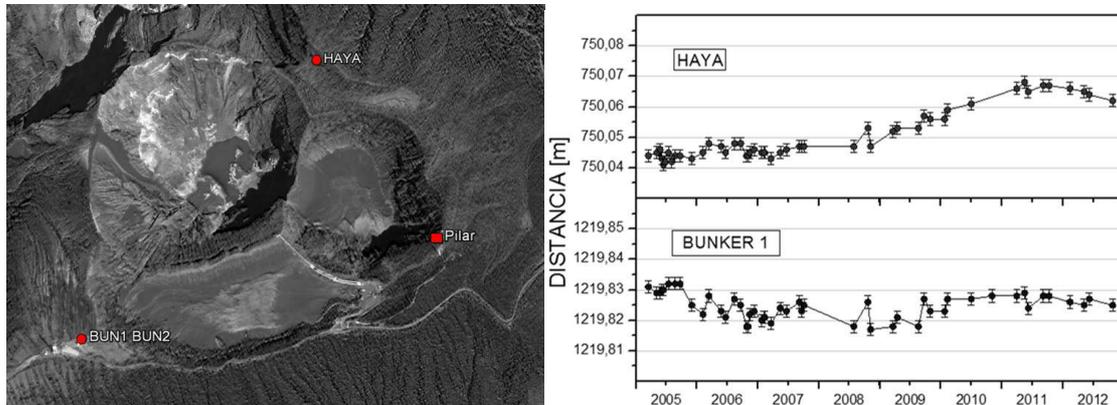


Figura 14: a) Reflectores de la red EDM Irazú 2012 (BUN1, BUN2, HAYA), medidos desde el monumento Pilar. b) Longitud de las líneas EDM, observadas desde el Pilar en la cima del volcán Irazú, a los reflectores HAYA y BUN1. Estos sitios corresponden con los puntos mostrados en a)

### III\_4 V.Irazú: Actividad Magmática-hidrotermal

#### III\_4.1 V.Irazú: Lago cratérico del Cráter Principal

En el transcurso del año 2012 el lago cratérico en el Cráter Principal del Irazú mostró un nivel muy bajo. En diciembre del 2012 el lago consistía en apenas un espejo de agua (Fig.15). El déficit de lluvias registrado en forma general durante gran parte del año 2012 en Costa Rica influyó significativamente en el bajo nivel del lago. La actividad tectónica en la región donde se ubica el macizo del Irazú podría también estar jugando un papel determinante en la estabilidad del lago cratérico.

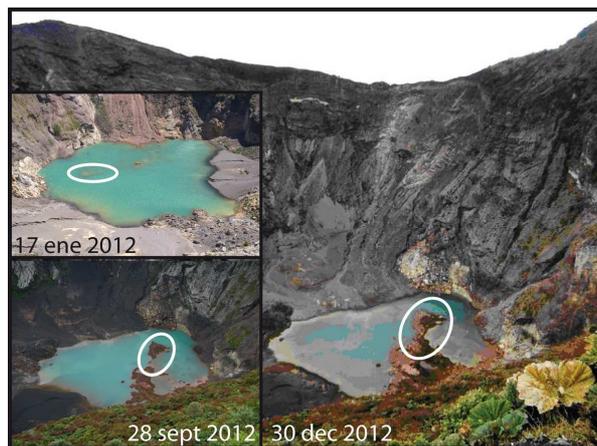


Figura 15: Evolución del lago en el Cráter Principal del Volcán Irazú (Foto del 30 de diciembre del 2012: cortesía de Alejandra Muñoz Chacón, otras fotos: G.Avard)

#### III\_4.2 V.Irazú: Fumarolas y Fuentes Termales

En el presente, el volcán Irazú solo manifiesta actividad hidrotermal secundaria tal como desgasificación fumarólica tenue de baja temperatura (<90°C) con depositación de azufre y otros minerales, y la presencia de fuentes termales. El monitoreo irregular de

parámetros físico-químicos como la acidez (pH), conductividad eléctrica, y la temperatura de las fuentes termales al noreste del macizo no indica cambios significativos en el sistema hidrotermal que alimenta esas aguas superficiales. Las fuentes termales Río Aguacaliente y Quebrada Gata A muestran en general una composición, temperatura, y acidez (pH) estable con fluctuaciones menores (Fig.16) debidas posiblemente a la influencia de factores externos meteorológicos. Río Aguacaliente tiene características que sugieren que se trata de aguas que circulan en niveles más profundos que las aguas de la Quebrada Gata.

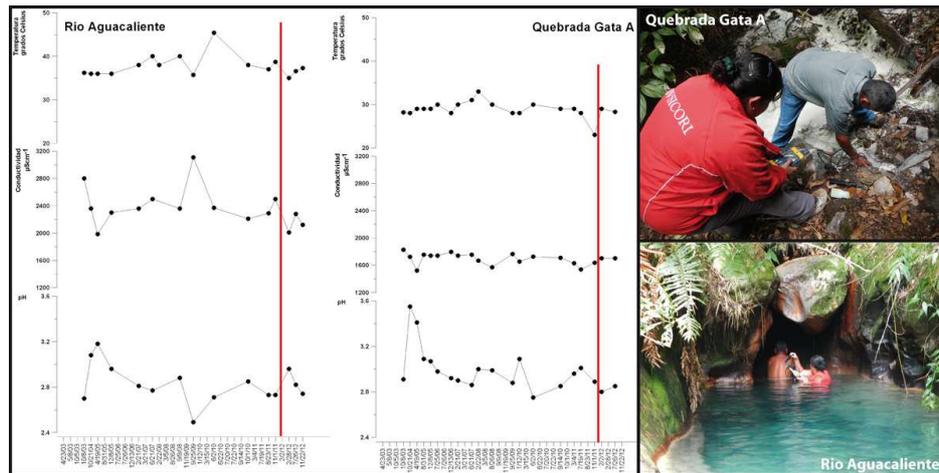


Figura 16: Parámetros geoquímicos monitoreados en las fuentes termales del volcán Irazú Río Aguacaliente y Quebrada Gata A, período 2003-2012. La línea roja indica el inicio del año 2012. Datos: Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Programa de Vigilancia Volcánica del OVSICORI-UNA.

## IV\_ Volcán Poás

### IV\_1 V.Poás: Resumen de los eventos principales durante el año 2012

El volcán Poás presentó temperaturas anormalmente altas en el criptodomo entre junio y octubre del 2011 (700 a 890°C), con incandescencia visible durante el día entre julio y setiembre del 2011. Luego de alcanzarse temperaturas máximas en agosto del 2011, el aporte de calor en el criptodomo disminuyó en forma sostenida a lo largo del año 2012. Erupciones freáticas esporádicas se presentaron a lo largo del 2012 aunque se observó una pausa entre el 4 de agosto y el 17 de octubre del 2012 seguida por varias erupciones freáticas energéticas entre el 18 y el 27 de octubre. Varias celdas de convección muy activas se observaron en la superficie del lago desde mayo del 2011 hasta finales del 2012.

### IV\_2 V.Poás: Actividad Sísmica

La actividad sísmico-volcánica está dominada por sismos pequeños y superficiales de baja frecuencia (sismos LP) y erupciones freáticas en el lago (Fig.17a). Estas últimas

consistieron en burbujas de gas que revientan en la superficie del lago hasta grandes erupciones freáticas que arrojaron material rocoso grueso y fino, agua, y vapores desde el fondo del lago.

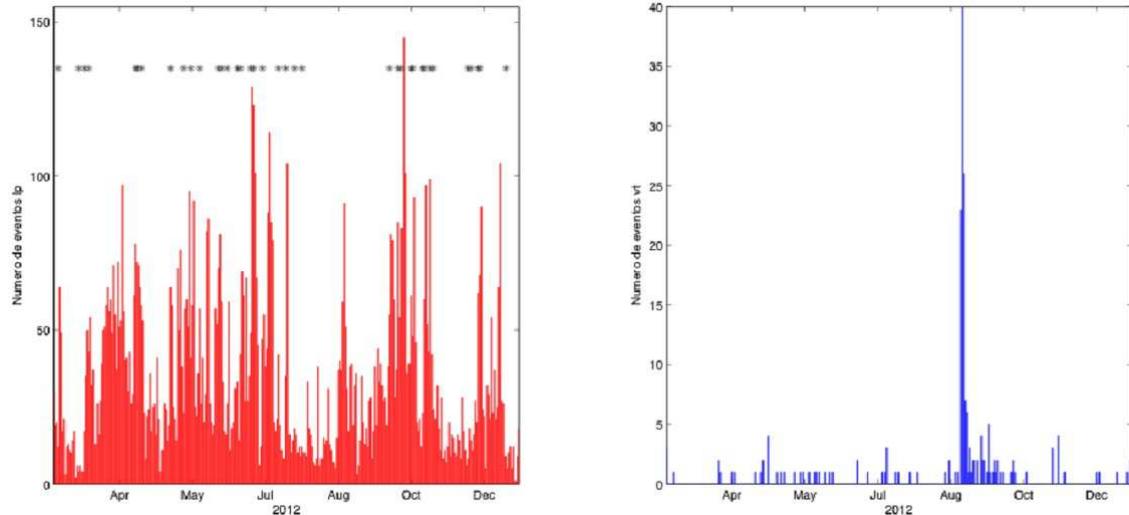


Figura 17: a) Sismicidad volcánica: número de sismos volcánicos diarios, asteriscos representan erupciones freáticas. b) Número de sismos volcano-tectónicos ocurridos por día.

La actividad sísmica volcano-tectónica se mantiene baja en el volcán Poás, la mayoría de estos sismos tectónicos se asocian a la falla que produjo el sismo de Cinchona del 8 de enero del 2009. Alguna sismicidad tectónica se registra esporádicamente bajo el cráter activo del volcán, a profundidades muy someras, lo que indica una asociación con la actividad hidrotermal. La mayor actividad se presentó entre el 5 y el 7 de setiembre (Fig.17b), luego del sismo de Nicoya del 5 de setiembre 2012 (Mw 7.4), por lo que se puede inferir que esta sismicidad fue disparada por el sismo de Nicoya.

Las erupciones freáticas alcanzaron mayor número y amplitud durante el mes de octubre, especialmente entre el 18 y el 27 de octubre (Fig.18). Para enero 2012 no se tienen datos sísmicos y en setiembre los sismógrafos no registraron erupciones freáticas.

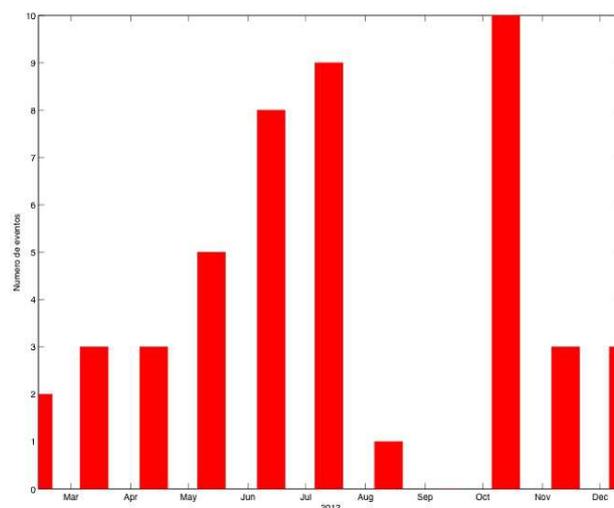


Figura 18: Número de erupciones freáticas por mes durante el 2012.

#### IV\_3 V.Poás: Deformación

La tendencia general en todas las distancias es de contracción, afectadas solamente por el evento de Nicoya; posterior a esto, la tendencia que traía continua como se aprecia en los reflectores S y N (Fig.19b). El cambio que se observa en la línea roja es el desplazamiento que se le atribuye al terremoto de Nicoya, del 5 de setiembre de 2012 en magnitudes que van de 1 a 3 cm de expansión.

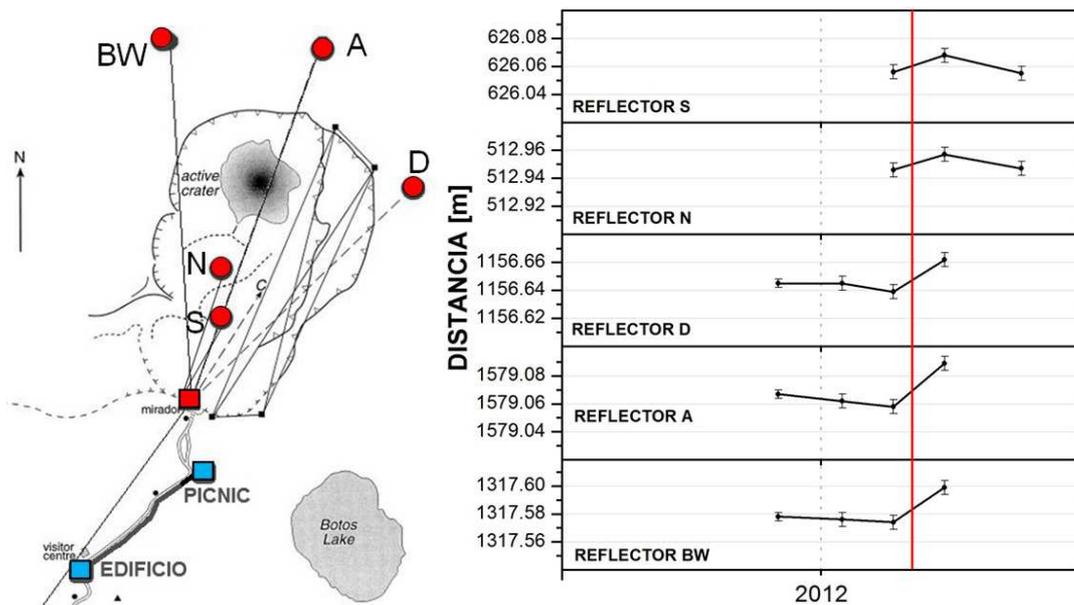


Figura 19: a) Red de geodésica del volcán Poás. Puntos rojos, representan los reflectores EDM medidos desde el monumento Pilar, cuadro rojo. Los cuadros celeste representas hitos de nivelación geométrica. b) Longitud de las líneas EDM, observadas desde el monumento Pilar en la cima del volcán Poás, a los reflectores S, N, D, A y BW. Obsérvese la tendencia hasta el 5 setiembre 2012 de contracción. Los reflectores S y N, después de tal fecha, regresan a la tendencia mencionada. .

Las mediciones de la línea de nivelación geométrica Picnic-Edificio durante el 2012 se muestran acorde a la tendencia generalizada de deflación de 1.6  $\mu\text{rad}/\text{año}$  (Fig.20), tal como se observa en la línea verde de mejor ajuste en la Figura 20 Se explica esta tendencia como la respuesta en superficie a la liberación de gas y vapor desde la cámara magmática que ha presentado el volcán en forma permanente y continua.

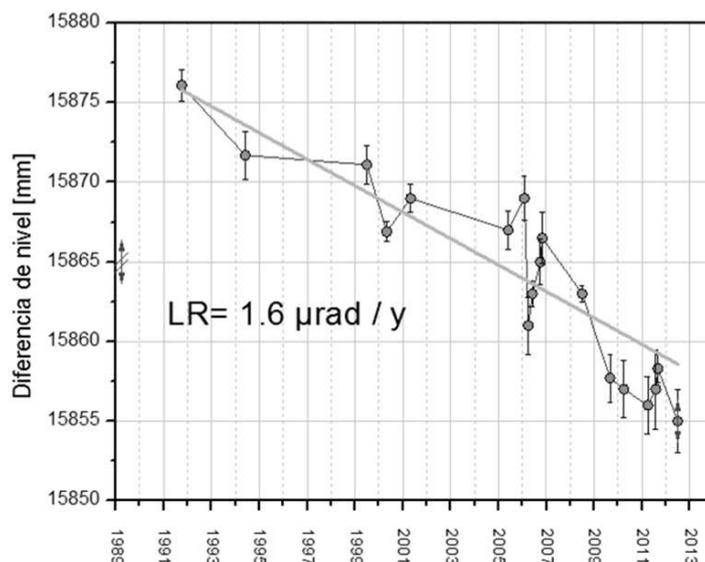


Figura 20: Diferencia de nivel de la línea Picnic-Edificio, mostrada en el mapa de la Fig.19a. Se muestra una clara tendencia de deflación de 1.6  $\mu$ rad/año, desde 1991 al presente.

#### IV\_4 V.Poás: Actividad Magmática-hidrotermal

##### IV\_4.1 V.Poás: Fumarolas del criptodomo

La temperatura de las fumarolas en el criptodomo disminuyó de forma gradual a lo largo del año 2012, desde alrededor de 700°C hasta alrededor de 100°C (Fig.21), así como el vigor de las fumarolas. Estos cambios en el criptodomo indica una disminución drástica del transporte de fluidos y calor desde el sistema magmático-hidrotermal hacia la superficie.

El criptodomo es una estructura que se encuentra justo en el borde sur del lago ultraácido del Poás y es uno de los sitios más importantes dentro del cráter activo donde se ha presentado histórica y frecuentemente desgasificación fumarólica intensa. El criptodomo registró entre finales de los años 70's y hasta diciembre de 1980 temperaturas alrededor de los 83°C. Posteriormente, entre 1981-1983 altas temperaturas (730-1020°C), alcanzando un máximo de 1000-1020 °C entre abril-junio de 1981. Más tarde entre 1984-1988 las temperaturas fueron más bajas, entre 275-690°C. Entre 1989-y principios del 2008 las fumarolas del domo presentaron una temperatura estable alrededor de 93°C (Martínez *et al.*, 2000; Martínez, 2008). Sin embargo, desde mayo 2008 hasta febrero 2012, las fumarolas muestran un flujo fuerte de vapor y volátiles magmáticos así como un aumento progresivo y marcado en la temperatura, desde los 109°C hasta casi 900°C. Algunas observaciones respecto al calentamiento del criptodomo que consideramos interesantes de anotar son: 1) El mismo se da luego de casi 20 años de presentar fumarolas de baja temperatura (<93°C), 2) El calentamiento se empieza a observar 2 años después de que inició el actual periodo de actividad freática en el lago ácido que comenzó en marzo 2006 y continua hasta el presente, y 3) El calentamiento del criptodomo empieza 8 meses **antes** del Sismo de Cinchona del 8 de enero del 2009.

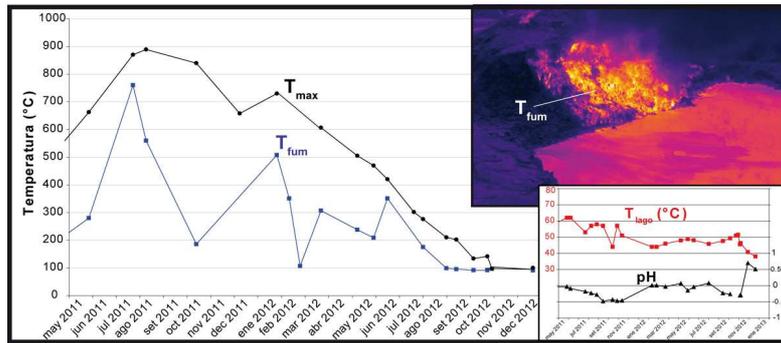


Figura 21: Evolución de la temperatura de las fumarolas del criptodomo desde mayo del 2011. En la figura insertada se muestra la temperatura y pH del lago ultraácido para el mismo periodo.

#### IV\_4.2 V.Poás: Lago ultraácido

El volcán Poás se encuentra actualmente en un ciclo de actividad freática esporádica que inició en marzo del 2005 con vigorosa actividad convectiva en el lago ultraácido culminando con la ocurrencia de las primeras erupciones freáticas en marzo del 2006.

Al menos 44-47 erupciones freáticas fueron observadas y verificadas en el año 2012 tanto por los funcionarios del Parque Nacional Volcán Poás como a través de los registros sísmicos (Fig.22). En el lago se observaron en ocasiones grandes burbujas de fluido (gas+líquido) así como erupciones freáticas de moderada energía (<500m de altura). Las erupciones freáticas alcanzaron mayor número y amplitud durante el mes de octubre, especialmente entre el 18 y el 27 de octubre. La actividad freática de octubre estuvo acompañada por el transporte de gran cantidad de azufre fundido desde el fondo del lago ácido hacia su superficie (Fig.22) debido al vigor y temperatura de las fumarolas subacuáticas (>150°C, *Takano et al.*, 1994). Este aumento en la actividad freática en octubre podría reflejar una perturbación del régimen del sistema hidrotermal que subyace bajo el cráter activo debido a la influencia del sismo de Nicoya del 5 de setiembre del 2012.



Figura 22: Fotos del lago el 20 de octubre del 2012 (Foto cortesía de Fabián Murillo S.), el 6 y el 16 de noviembre del 2012 (Fotos: G.Avard). El 20 de octubre del 2012 se podía observar una gran cantidad de azufre fundido flotando y cubriendo prácticamente toda la superficie del lago. El 6 de noviembre se podía ver una mancha de azufre fundido generada por una celda de convección cual perfil de temperatura AA' está visible en las imágenes del 16 de noviembre del 2012.

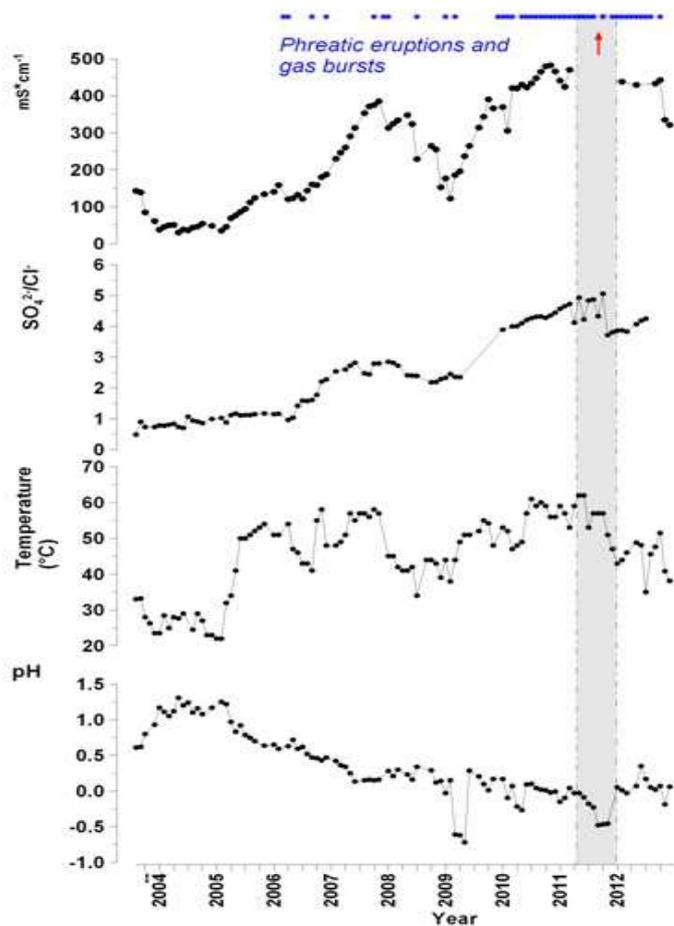


Figura 23: Serie de tiempo de conductividad eléctrica y razones de sulfato versus cloruro comparados con cambios de temperatura y pH monitoreados en el lago ultraácido del volcán Poás. La flecha roja en el panel de conductividad eléctrica se refiere al periodo abril-noviembre 2011 cuando la conductividad eléctrica alcanza valores  $>500$  mS/cm, el pH registra valores mínimos, y el criptodomo presenta las máximas temperaturas de los últimos 20 años.

El nivel del lago disminuyó ~4m entre enero y octubre, pero volvió a recuperar el nivel en noviembre-diciembre del 2012 debido a las precipitaciones típicas de esa época del año.

En la Figura 23 se muestra los cambios geoquímicos abruptos que ha experimentado el lago ultraácido tal como el registro inusual de valores extremos de conductividad eléctrica ( $>500$  mS/cm) y pH en el periodo abril-noviembre 2011. En este mismo periodo el criptodomo mostró incandescencia y temperaturas muy altas con un máximo de  $900^{\circ}\text{C}$ . También cabe señalar el cambio temporal en la razón  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  observado en el lago ácido entre noviembre 2011 y marzo 2012, el cual parece señalar la inyección de fluidos profundos ricos en volátiles magmáticos como el cloruro de hidrógeno, HCl, hacia el lago.

#### IV\_5 V.Poás: Acidificación del ambiente y erosión

##### IV\_5.1 V.Poás: Afectación ambiental

Durante el año 2012 la depositación total ácida recolectada en la estación Mirador para Visitantes registró pHs entre 3.4 y 4.3 indicando el impacto que el nivel de gasificación magmática a través del cráter activo tiene sobre el ambiente circundante al cráter. Estudios llevados a cabo entre octubre y noviembre del 2012 han mostrado que la niebla en la cima del volcán Poás tiene pH's extremos y representa un potencial de afectación sobre el ambiente mucho más severo que la misma depositación total ácida. La niebla en el Mirador para Visitantes ubicado en el borde sur del cráter activo del Poás registró un pH promedio de 2.95 mientras que la lluvia recolectada en ese sitio arrojó un pH promedio de 4.25. La niebla en el Centro de Visitantes y en los jardines de la Casa de

Funcionarios del Parque Nacional Volcán Poás registró pH's más altos, 3.17 y 4.01, respectivamente (*información personal del Dr. Jorge Herrera M., 2012*).

#### IV\_5.2 V.Poás: Cambios en el Cráter Principal por el proceso de erosión

El proceso de erosión es más visible en las áreas del cráter activo donde hay persistente e intensa actividad fumarólica debido a la disminución de la cohesión entre las partículas de las rocas como resultado de reacciones químicas entre los minerales que conforman las rocas, y los fluidos magmáticos-hidrotermales. Las lluvias fuertes de noviembre erosionaron la superficie de la pared norte del criptodomo lo que produjo el taponamiento de orificios y grietas afectando el flujo de emisión fumarólica. También las paredes verticales este y noreste del cráter que bordean el lago ácido presentan caída de materiales rocosos que caen dentro del lago, principalmente durante la época lluviosa.

## ***V\_ Volcán Arenal***

### *V\_1 V.Arenal: Resumen de los eventos principales durante el año 2012*

El evento principal del año es el desprendimiento de un volumen moderado de material rocoso desde un sector inestable en la parte superior del flanco noroeste del edificio volcánico causado posiblemente por las vibraciones generadas por el sismo de Nicoya del 5 de setiembre del 2012. No se notó una reactivación de la actividad volcánica luego del sismo de Nicoya.

### *V\_2 V.Arenal: Actividad Sísmica*

La actividad sísmica en el volcán Arenal durante el año 2012 presentó uno de los niveles más bajos desde el despertar del volcán en 1968. No se registraron sismos volcano-tectónicos ni sismos volcánicos o temblores asociados al volcán Arenal. Aún después del sismo de Nicoya del 5 de setiembre (Mw 7.4), no se registró sismicidad dentro del edificio volcánico, ni fallas asociadas al volcán. Los sismos registrados más cercanos se ubican en las cercanías de Monteverde y del lado del volcán Tenorio.

### *V\_3 V.Arenal: Deformación*

La red EDM del flanco oeste del volcán Arenal (Fig.24a) muestra una tendencia de varios años de contracción en la mayor parte de las líneas (Fig.24b). Un comportamiento similar se observó entre los años 1992 y 2007 en la red de EDM del flanco sur, que fue destruida por flujos de lava y flujos piroclásticos. A partir de finales de setiembre de 2011 se observa una disminución de esa contracción y durante todo el año 2012 no se muestran deformaciones.

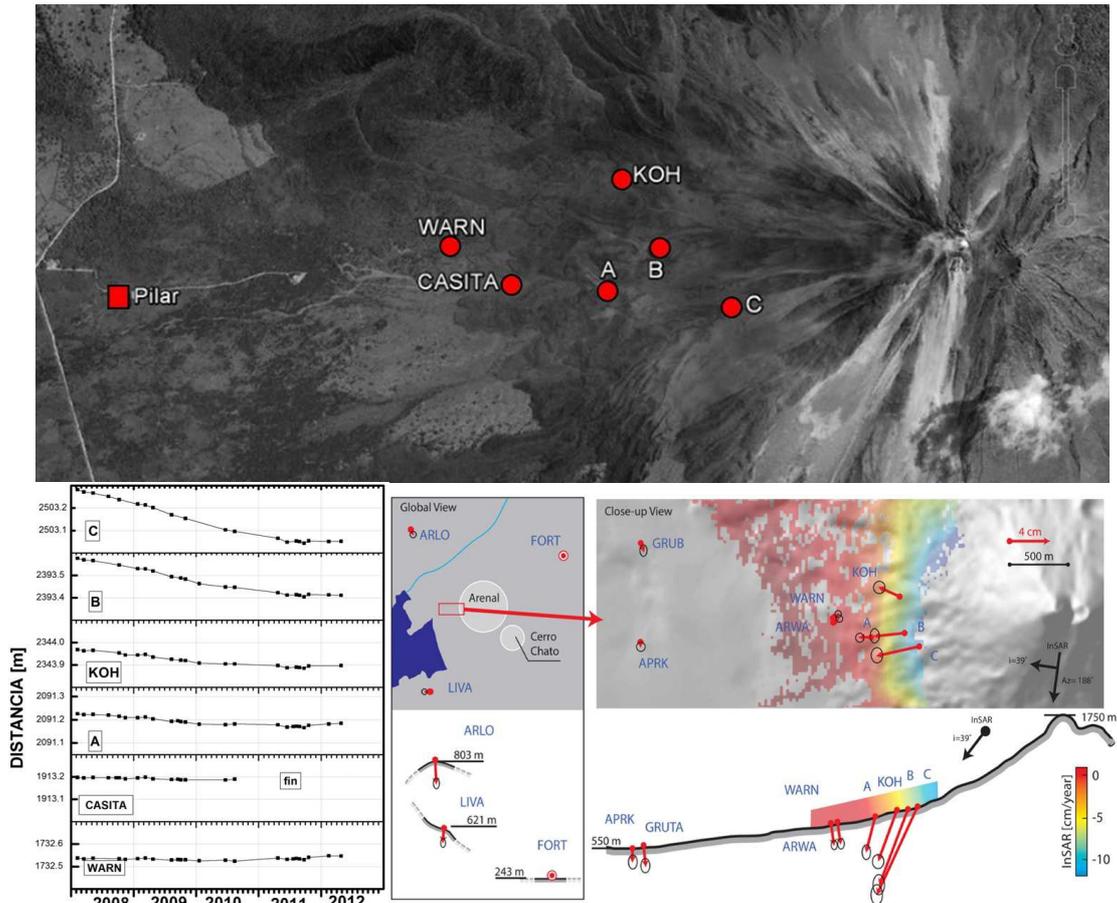


Figura 24: a) Red geodésica del volcán Arenal, año 2012. Círculos rojos representan, reflectores de la red EDM medidos desde el monumento Pilar. b) Distancias de la red EDM del flanco oeste del volcán Arenal. c) Tendencia de las velocidades entre los años 2008 y 2009 con técnica EDM y GPS e InSar 2005-2009 (Muller et al., 2011).

De acuerdo a la Figura 24c, se muestra la combinación de técnicas GPS e EDM para determinar la velocidad de los reflectores de la red, junto a la técnica de InSar. Todas estas técnicas coinciden con una contracción de las líneas base, en magnitudes de 75mm/año  $\pm 7$  mm mismos resultados que mostró la inclinometría seca.

#### V\_4 V.Arenal: Actividad Magmática

No actividad magmática fue notada en el 2012.

#### V\_5 V.Arenal: Actividad hidrotermal

##### V\_5.1 V.Arenal: Fumarolas

La actividad hidrotermal se mantuvo mínima con la presencia de pocas fumarolas difusas principalmente en el borde norte del Cráter C (Fig.25). La no observación de incandescencia en estas fumarolas a través de película fotográfica aún con larga exposición indica que son fumarolas de baja temperatura.

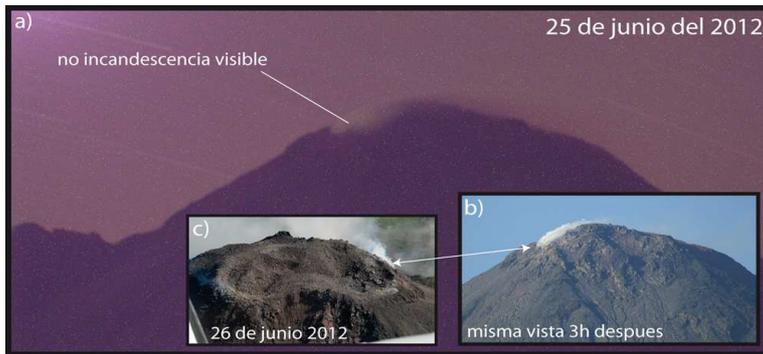


Figura 25: a) Foto de noche larga exposición (~12min, iso800) del lado noroeste de la cima del Cráter C del volcán Arenal, y b) misma vista de día 3h después (Fotos: G.Avard, el 25 de junio del 2012). c) Foto aérea del Cráter C visto desde el sur (Foto: F.Chavarría-Kopper, el 26 de junio del 2012).

### V\_5.2 V.Arenal: Fuente termal Tabacón

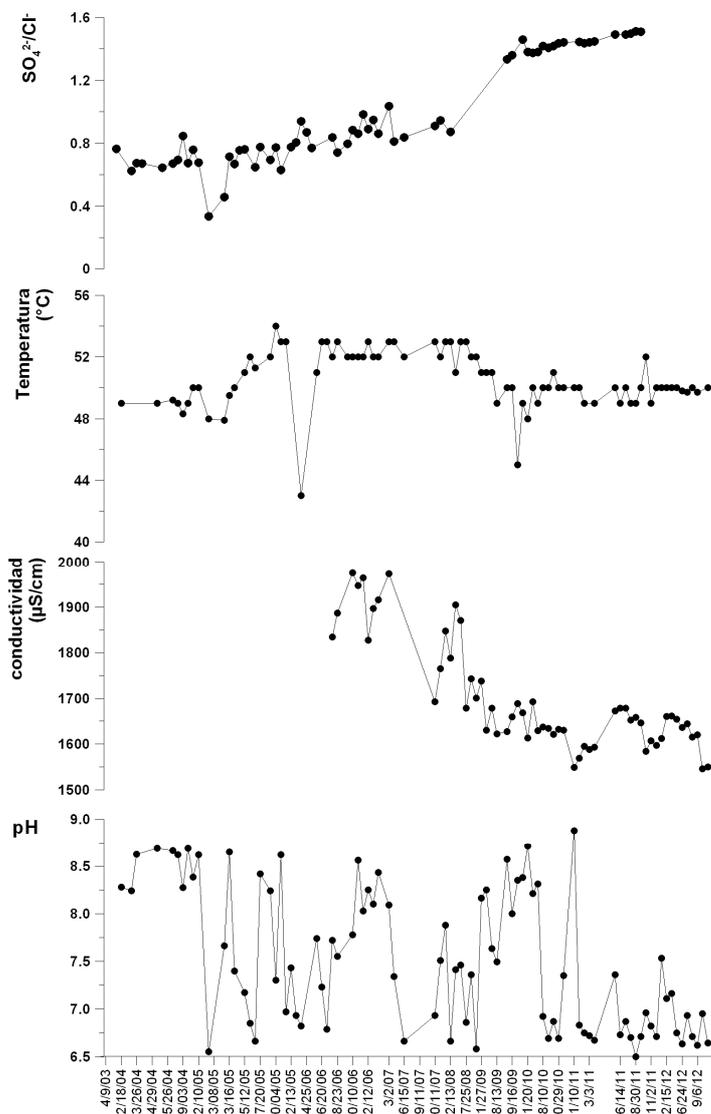


Figura 26: pH (acidez), temperatura, y relación sulfato-cloruro de las aguas del Río Tabacón, Volcán Arenal, período final 2007 hasta final del 2012. Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica "Dr. Eduardo Malavassi Rojas"- OVSICORI-UNA

La fuente termal Tabacón (sitio A), ubicada al NW del volcán Arenal, presentaba aguas del tipo salinas-cloradas hasta el año 2007. Estas aguas parecen generarse de la infiltración rápida de aguas meteóricas a través de contactos entre flujos de lavas recientes andesítico-basálticas calco-alcalinas aún calientes y viejos depósitos piroclásticos. Desde el año 2008 la composición de las aguas del Tabacón muestra cambios físico-químicos sistemáticos asociados con el cese de extrusión de lavas y con la drástica disminución en el nivel de desgasificación observada en los últimos 5 años. Particularmente la relación  $SO_4^{2-}/Cl^-$ , la temperatura, y el pH (Fig.26) muestran cambios que indican una disminución considerable pero paulatina del aporte de calor, volátiles magmáticos, y elementos formadores de roca hacia el sistema hidrotermal que origina las aguas del Río Tabacón.

## V\_6 V.Arenal: Afectación Ambiental y erosión

### V\_6.1 V.Arenal: Afectación ambiental

La depositación total ácida (húmeda y seca) que monitorea el OVSICORI-UNA en los alrededores del volcán Arenal muestra un aumento sistemático en los valores de pH hasta valores cercanos al valor de referencia de pH 5.6 (Fig.27). La depositación total se considera ácida si  $pH \leq 5,6$ . Este cambio en el pH, especialmente desde el 2010 hasta el presente refleja la reducción significativa de la actividad magmática del volcán Arenal.

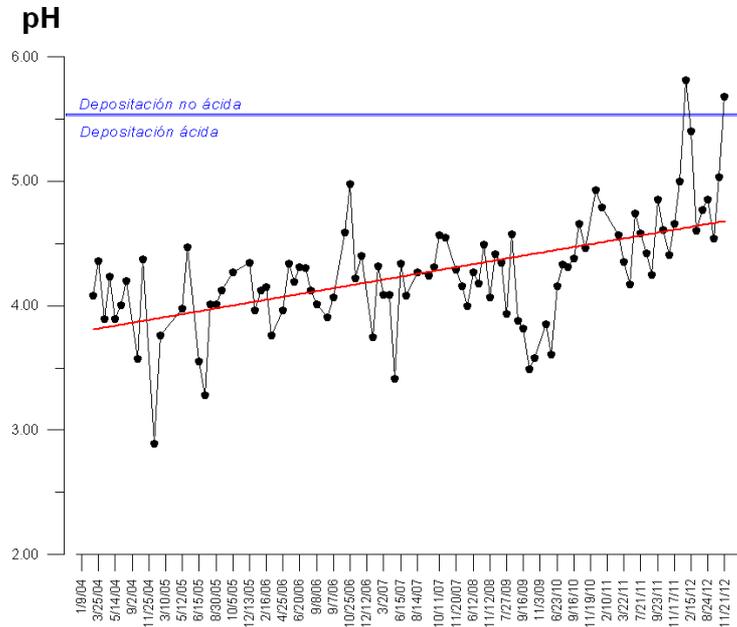


Figura 27: Perfil de pH (acidez) de la depositación total ácida [húmeda y seca] recolectada en la estación Caseta C. Valores de  $pH \leq 5,6$  corresponden a lluvia ácida (línea azul). La línea roja es la tendencia promedio en el tiempo. Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica "Dr. Eduardo Malavassi Rojas" - OVSICORI-UNA

### V\_6.2 V.Arenal: Cambios por el proceso de erosión

Avalanchas de rocas proveniente de la cúspide del volcán y moviéndose hacia los flancos norte y noroeste, fueron observadas y reportadas por habitantes del sector norte del volcán en setiembre-octubre, particularmente el día del terremoto de Nicoya del 5 de setiembre del 2012 (Fig.28). El sismo generó la caída de una cantidad apreciable de material rocoso inestable y las condiciones climáticas continuaron este proceso de erosión rápida.



Figura 28: Vista noroeste del edificio en mayo del 2012 (Foto: C.Müller) y 24 horas después del terremoto de Nicoya del 5 de setiembre del 2012 (Foto: G.Avard).

## VI\_ Volcán Rincón de la Vieja

### VI\_1 V.Rincón de la Vieja: Resumen de los eventos principales durante el año 2012

El volcán Rincón de la Vieja mantuvo en 2012 una actividad baja con poca sismicidad. La erupción freática más importante del año ocurrió el 14 de abril del 2012 y fue moderada de pequeña amplitud, no generó lahares.

### VI\_2 V.Rincón de la Vieja: Actividad Sísmica.

La actividad sísmica durante el 2012 se mantuvo baja. La mayor actividad corresponde a sismos volcano-tectónicos ocurrió entre el 5 y el 8 de setiembre, registrándose un total de 58 eventos, probablemente esta sismicidad fue disparada por el sismo de Nicoya del 5 de setiembre (Mw 7.4). También se registraron pocos sismos volcánicos y esporádicos episodios de temblor de muy baja amplitud y corta duración. Se registraron pequeñas erupciones freáticas los 19 y 20 de febrero, el 14 de abril y el 17 de octubre del 2012. La erupción freática moderada en el lago ultraácido del 14 de abril del 2012 fue registrada por los sismógrafos y observada y escuchada como un retumbo acompañado con salida de agua y sedimentos junto con una columna blanca de vapor desde el cráter activo, por vecinos de Buenos Aires y de Aguas Claras de Upala, ~7 km al norte del volcán Rincón de la Vieja (Fig.29). Los materiales arrojados fuera del lago fluyeron pendiente abajo por el flanco norte del volcán sin generar una avalancha importante.

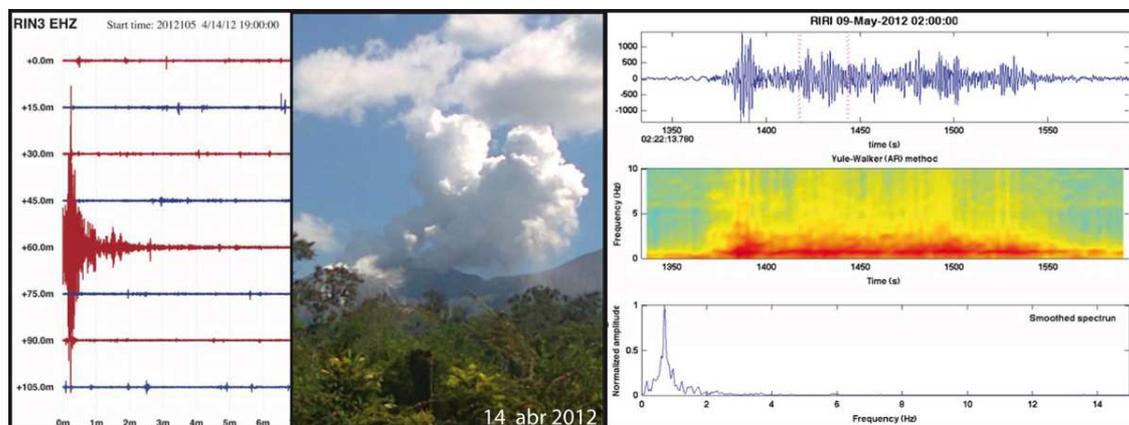


Figura 29: a) Registro sísmico de la erupción de 14 de abril, 2012 b) Foto de la plumas volcánicas ricas en vapor de agua producidas por la erupción freática del 14 de abril del 2012 observada desde Aguas Claras de Upala (Foto: cortesía Srta. Yanela Zamora Ugarte), c) Tremor monocromático registrado el día 9 de mayo: sismograma en la parte superior, espectrograma en el centro y espectro de frecuencias en la parte inferior.

### VI\_3 V.Rincón de la Vieja: Actividad Magmática-hidrotermal

#### VI\_3.1 V.Rincón de la Vieja: Lago ultraácido

La cobertura de datos del Rincón de la Vieja es escasa debido a la dificultad de ascender hasta el borde del cráter activo del Rincón y a las malas condiciones de tiempo que imperan en la cima del volcán. De los pocos datos recolectados en el 2012 no se notan

cambios significativos en los parámetros físico-químicos monitoreados en el lago ultraácido. La temperatura registró 29°C en marzo y 33°C en diciembre; la conductividad eléctrica midió 125 mS/cm en marzo y 151 mS/cm en diciembre, mientras el pH fue de 0.42 en marzo y 0.37 en diciembre. Siguiendo los perfiles geoquímicos de la Figura 30 en la ventana de tiempo entre los años 2000 y 2012, se observa que entre setiembre del 2011 y diciembre 2012 hay una disminución en la temperatura, la cantidad de iones disueltos, y en la acidez (pH's mayores) quizás como resultado de la remoción de un volumen importante de agua del lago por las esporádicas erupciones freáticas combinado con la dilución del lago remanente con nueva agua meteórica. En las dos visitas realizadas en el 2012 se observó azufre fundido flotando en la superficie del lago.

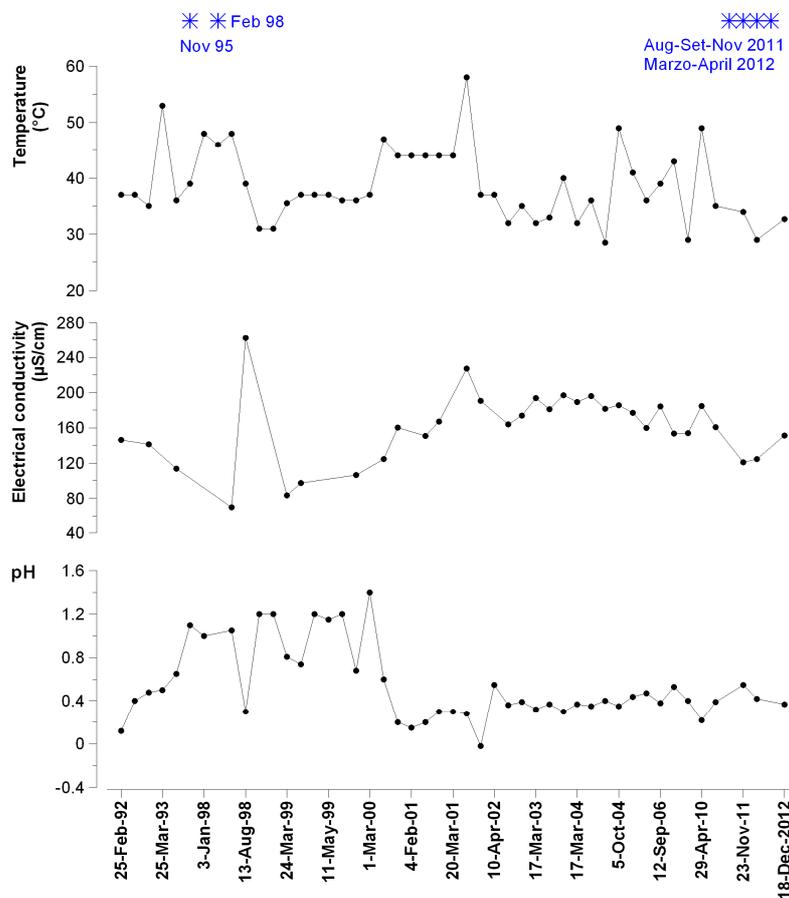


Figura 30: Perfiles físico-químicos del lago ultraácido del volcán Rincón de la Vieja: pH (nivel de acidez), y conductividad eléctrica comparados con cambios de temperatura. Los asteriscos azules en la parte superior de la figura indican los periodos en que se han reportado erupciones freáticas.

### VI\_3.2 V.Rincón de la Vieja: Fumarolas, y volcanes de barro

Las fumarolas en el flanco norte por el sector afectado por las avalanchas mantienen temperaturas muy bajas, alrededor de 90-91°C. Las pailas de barro (“*mud volcanoes*”) en el sector de Las Pailas al suroeste del volcán Rincón de la Vieja, registraron temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua, 96-100°C (Fig.31).

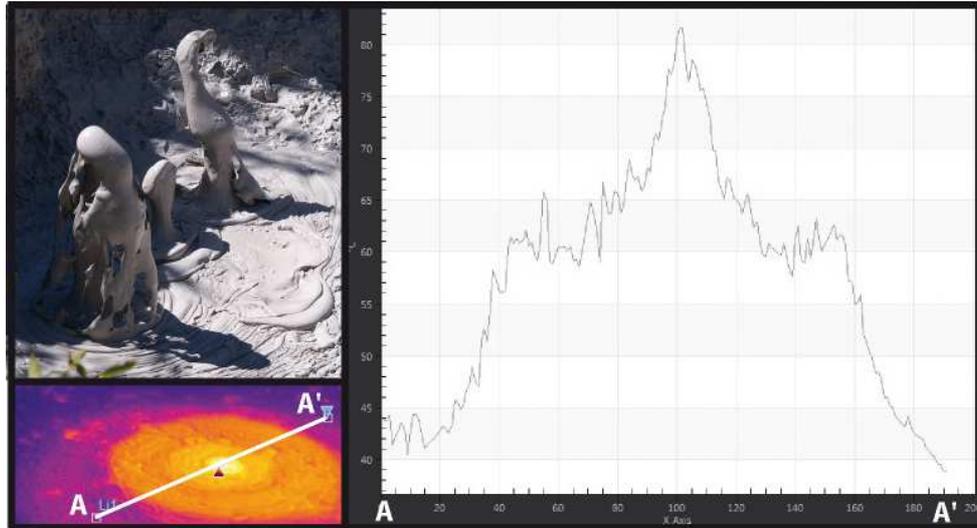


Figura 31: A la izquierda: Paila de barro en el sector de Las Pailas y termograma infrarrojo de una de las celdas de convección en la superficie de la paila de barro. A la derecha: Perfil de temperatura en grados Celsius a lo largo del diámetro de la celda de convección, AA', mostrada en termograma. La celda de convección en la paila de barro consiste en anillos concéntricos superpuestos. Los triángulos rojo y azul en el termograma indican los sitios más calientes y más fríos a lo largo de AA'. (Fotos: G.Avard, el 13 de marzo y 17 de diciembre del 2012, respectivamente).

## VII\_ Volcán Barva

En el volcán Barva se monitorea desde el año 1992 la Fuente Termal Huacalillo, ubicada en Porrosatí,  $10^{\circ}5'18.86''N$   $84^{\circ}7'5.66''O$  5.3 km SE de la Laguna Barva a una altura aprox. de 1846 m.s.n.m. Huacalillo es una pequeña afluente ácida del Río Ciruelas (Fig.32a). Las aguas de Huacalillo son tibias ( $26.3^{\circ}C$ - $33.5^{\circ}C$ ), sumamente ácidas (pH 1,74-2,51), ricas en iones sulfato (1600-9000 mg/kg), cloruro (225-1580 mg/kg) y fluoruro (13-45 mg/kg). También contiene cantidades apreciables de elementos formadores de rocas tales como Al (570 mg/kg), Fe (280 mg/kg), Na (190 mg/kg), Ca (162 mg/kg), K (166 mg/kg), Mg (58 mg/kg) y Si (73 mg/kg). Entre los elementos trazas que se han medido están el B (3,5 mg/kg), P (9,7 mg/kg), Zn (963  $\mu$ g/kg), Cd (29  $\mu$ g/kg), Ba (37  $\mu$ g/kg), Pb (15  $\mu$ g/kg), La (451  $\mu$ g/kg), Ce (854  $\mu$ g/kg), etc. Estas aguas son del tipo salino ricas en  $Cl^{-}+SO_4^{2-}$  y  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  y resultan de la mezcla de un fluido hidrotermal derivado de la interacción agua-gas magmático-roca con agua meteórica (OVSICORI, datos sin publicar). En el sitio donde se origina esta naciente se observan vapores y se percibe un leve olor a sulfuro de hidrógeno,  $H_2S$ . A lo largo del cauce de la fuente termal se observa un depósito café rojizo de óxidos hidratados de hierro que se extiende varios metros hasta la confluencia con el Río Ciruelas.

En la figura 32b se muestran los cambios registrados en la acidez (pH), temperatura, y la razón  $SO_4^{2-}/Cl^{-}$  en los últimos diez años. En general se observa que las aguas de Huacalillo tienden gradualmente a ser menos ricas en cloruro, menos calientes y menos ácidas. La modificación en las características de Huacalillo podrían indicar una

disminución paulatina en el aporte de calor y volátiles magmáticos hacia el sistema hidrotermal del Barva y por ende una menor interacción agua-gas-roca.

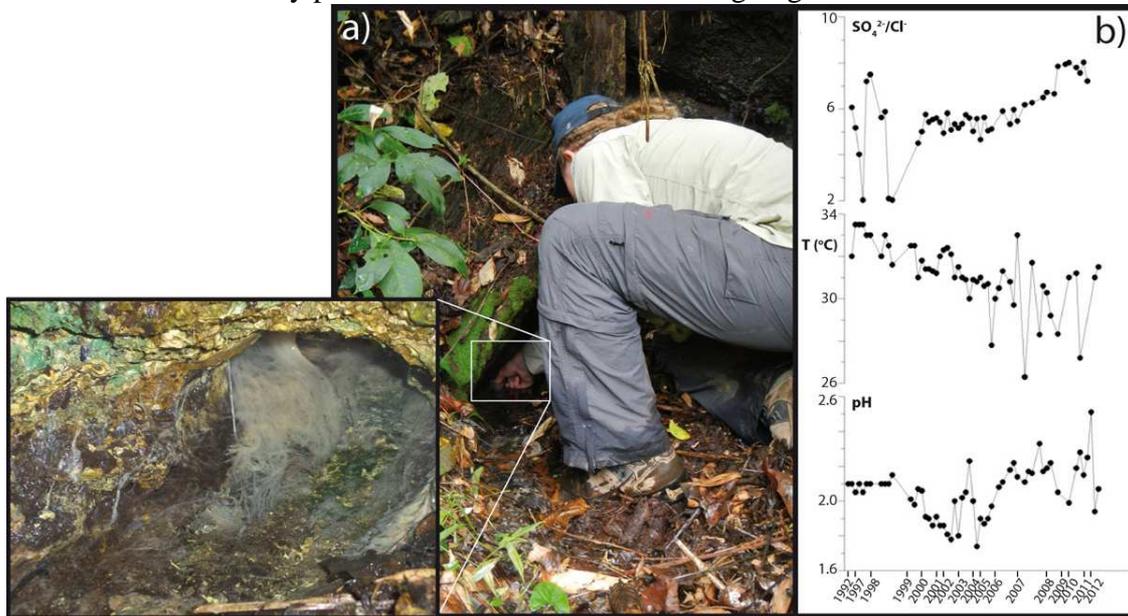


Figura 32: a) Naciente de la Fuente Termal Huacalillo, volcán Barva. El orificio por donde brota el agua presenta abundantes filamentos de colonias de bacterias que están siendo estudiadas en la Universidad de Utrecht, Holanda (Fotos: 19 abr. 2010, M.Martínez y 30 jul 2012, G.Avard). b) pH (acidez), temperatura, y razones  $SO_4^{2-}/Cl$  del Río Huacalillo. (Datos: OVSICORI-UNA)

#### Reconocimientos:

Se agradece a los funcionarios del Sistema de Conservación de Parques Nacionales de Costa Rica y a las personas que ayudaron con las mediciones y el trabajo de campo y de laboratorio presentado en esta publicación.

Información previa de los volcanes monitoreados por el OVSICORI-UNA está disponible en las siguientes direcciones electrónicas de INTERNET:

- Boletines periódicos del estado de actividad de los volcanes de Costa Rica:  
[http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com\\_phocadownload&view=section&id=3&Itemid=73](http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com_phocadownload&view=section&id=3&Itemid=73)

- Videos:  
[http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=55&Itemid=79](http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=79)

#### Bibliografía

Avard, G., Pacheco, J., Martínez, M., Menjívar, E., Duarte, E., Hernández, E., Soto, J., Brenes, J., Agüero, A., Sáenz, W., Marino, T. Boletín de Vulcanología Estado de los Volcanes Setiembre del 2012. En: [http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=461:estado-de-los-volcanes-setiembre-2012&id=20:2012&Itemid=73](http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=461:estado-de-los-volcanes-setiembre-2012&id=20:2012&Itemid=73).

Brodsky, E., E. Roeloffs, D. Woodcock, I. Gall, M. Manga. A mechanism for sustained ground water pressure changes induced by distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 108, doi:10.1029/2002JB002321, 2003.

- Cannata, A., G. Di Grazia, P. Montalbo, M. Aliotta, D. Patane, E. Boschi. Response of Mount Etna to dynamic stresses from distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, doi: 10.1029/2010JB007487, 2010.
- Martínez, M., Fernández, E., Valdés, J., Barboza, V., van der Laat, R., Duarte, E., Malavassi, E., Sandoval, L., Barquero, J., Marino, T. 2000. Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás Volcano, Costa Rica, 1993-1997. *J. Volcanol. Geother. Res.* 97: 127-141.
- Takano, B., Saitoh, H., Takano, E. 1994. Geochemical implications of subaqueous molten sulfur at Yugama Crater Lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *Geochem. J.* 28: 199-216.
- Vaselli, O., Tassi, F., Duarte, E., Fernández, E., Poreda, R.J., Delgado-Huertas, A. 2010. Evolution of fluid geochemistry at the Turrialba volcano (Costa Rica) from 1998 to 2008. *Bull. Volcanol.*, 72: 397-410, doi: 10.1007/s00445-009-0332-4.
- Muller, C.; del Potro, R.; Gottsmann, J.; Biggs, J.; Van der Laat, R. 2011, Combined GPS, EDM and triangulation surveys of the rapid down-slope motion of the western flank of Arenal Volcano, Costa Rica, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*

**Programa de Vigilancia Volcánica**  
**Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica**

**Universidad Nacional**

**OVSICORI-UNA**

Campus Omar Dengo, Heredia

Costa Rica, América Central

*Teléfonos:* (+506) 2562 4001    (+506) 2261 0611

*Fax:* (+506) 2261 0303

*Website:* <http://www.ovsicori.una.ac.cr/>

*Facebook:* <http://www.facebook.com/OVSICORI?ref=ts>