

***Boletín de Vulcanología
Estado de los Volcanes
Setiembre del 2012***



Fallamiento del terreno en El Castillo, al suroeste del Volcán Arenal debido al terremoto $M_w = 7.6$ de Nicoya el 5 de setiembre del 2012 (Foto: G. Avard, 6 set. 2012)

Geoffroy Avard, Javier Pacheco, María Martínez, Efraín Menjívar,
Eliécer Duarte, Enrique Hernández, Jackeline Soto, Jorge Brenes, Alejandro Aguero,
Wendy Sáenz, Tomás Marino

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

Introducción

El sismo de Nicoya del 5 de setiembre del 2012 ($M_w = 7.6$).

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

El deslizamiento en la falla continúa hasta el fin del mes de setiembre como movimiento postsísmico, con sismos lentos, relajación viscoelástica y réplicas (> 2500 durante los 10 días posteriores al sismo de Nicoya). El sismo de Nicoya generó sismicidad en casi todo el país (Fig.1). Este boletín se enfoca en la evaluación de las condiciones prevalecientes en los volcanes en los días posteriores al sismo de Nicoya.

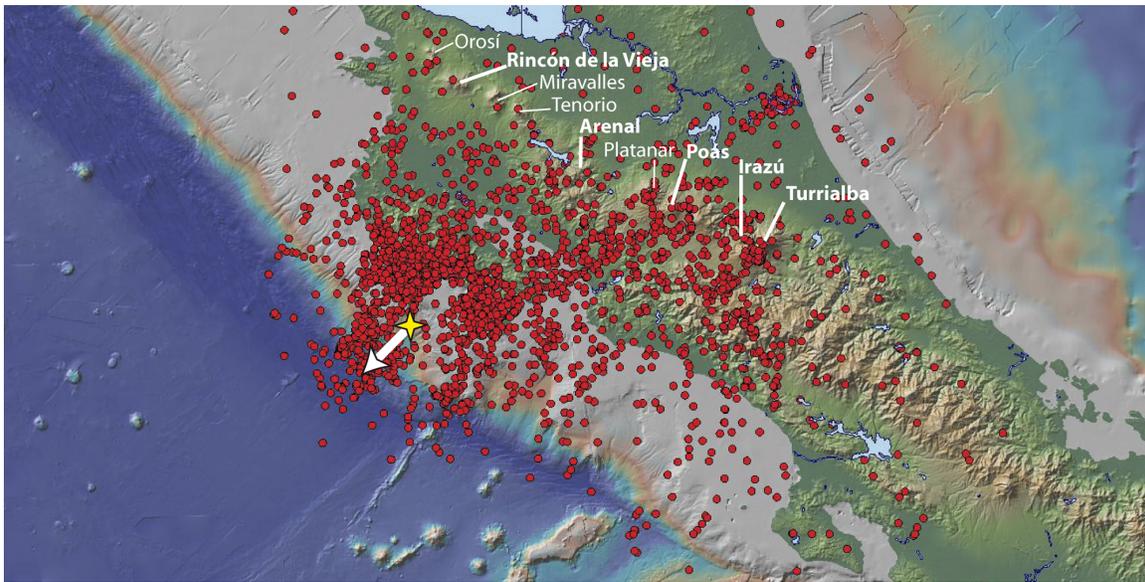


Figura 1: Sismicidad durante setiembre del 2012 y ubicación de los volcanes principales. Estrella amarilla: epicentro del sismo de Nicoya el 5 de setiembre ($M_w = 7.6$). Flecha blanca: dirección del deslizamiento de la falla por el terremoto de Nicoya (mapa: Walter Jiménez y el grupo de sismología del OVSICORI)

En general, el sismo de Nicoya generó una gran actividad sísmica especialmente en el complejo Irazú-Turrialba y en el volcán Poás así como una actividad sísmica anormal sobre los volcanes inactivos Tenorio, Platanar y Porvenir principalmente. Aunque no se notaron cambios importantes en la actividad volcánica superficial, la actividad sísmica puede generar cambios importantes en un periodo de varios días a semanas posteriores al sismo.

El efecto más relevante encontrado 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 en reposo. Sin embargo, no se notaron cambios significativos en la sismicidad volcánica propiamente o en manifestaciones externas (erupciones freáticas, emanación de gas, etc) en ninguno de los volcanes activos de Costa Rica. Cambios importantes sí se produjeron en algunos

volcanes de Nicaragua (e.g. San Cristóbal, Telica, Apoyeque), sin embargo, aunque existe una relación causal, no se puede atribuir estos cambios directamente al sismo de Nicoya. Los cambios que puedan sufrir los volcanes por la ocurrencia de un gran sismo cercano se debe 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 superficial reaccionan a un gran sismo cercano o lejano de gran magnitud (Cannata et al, 2010).

Sismicidad en la Cordillera Volcánica Central.

Luego del sismo de Nicoya (Mw 7.6) del 5 de setiembre, 2012 se disparó la sismicidad tectónica en fallas asociadas con los volcanes de la Cordillera Volcánica Central. En el caso del volcán Irazú, la sismicidad en los sistemas de falla asociados al volcán inició casi con el arribo de la onda S. En el Platanar y el Poás, la sismicidad empieza con cierto retraso.

Aunque se dispara la sismicidad tectónica en los volcanes, no se encontró ninguna variación significativa en la sismicidad volcánica. Incluso la sismicidad volcano-tectónica que se venía presentando con menor frecuencia en la cima del volcán Turrialba se mantuvo con bajos niveles de sismicidad luego del sismo de Nicoya.

La Figura 2 muestra los sismos localizados en la Cordillera Volcánica Central, ocurridos entre el 5 y el 8 de setiembre, 2012. La mayoría de estos sismos son superficiales, con profundidades menores a 10 km. Sin embargo, debe tenerse cuidado al interpretar la sismicidad de los volcanes Poás y Platanar, ya que la falta de estaciones sísmicas no permite ubicar estos sismos con la precisión deseada, y solo se pueden localizar sismos con magnitudes mayores a 2.5. Mientras que la red sísmica de vigilancia del volcán Turrialba, junto con la estación sísmica del volcán Irazú, permite localizar pequeños sismos con magnitudes mayores a 1.0 entre estos dos volcanes.

La mayor sismicidad ocurre en el sistema de fallas asociadas al volcán Irazú, principalmente aquellas alineadas norte-sur (e.g. falla Irazú), sobre un eje que pasa sobre la cúspide del volcán y algunos pocos se alinean en dirección suroeste-noreste, misma dirección que presenta el sistema de fallas asociado al volcán Turrialba (e.g. fallas Ariete y Elia). La continuidad y cercanía de estas fallas no permite distinguir entre sismos tectónicos asociados al volcán Turrialba o al Irazú, y siendo los sismos asociados al volcán Irazú la mayoría, a lo largo de este reporte, para efectos de contabilidad, los sismos tectónicos ocurridos en este sistema de fallas suroeste-noreste se asocian al volcán Irazú, excepto aquellos ubicados en el edificio volcánico del Turrialba.

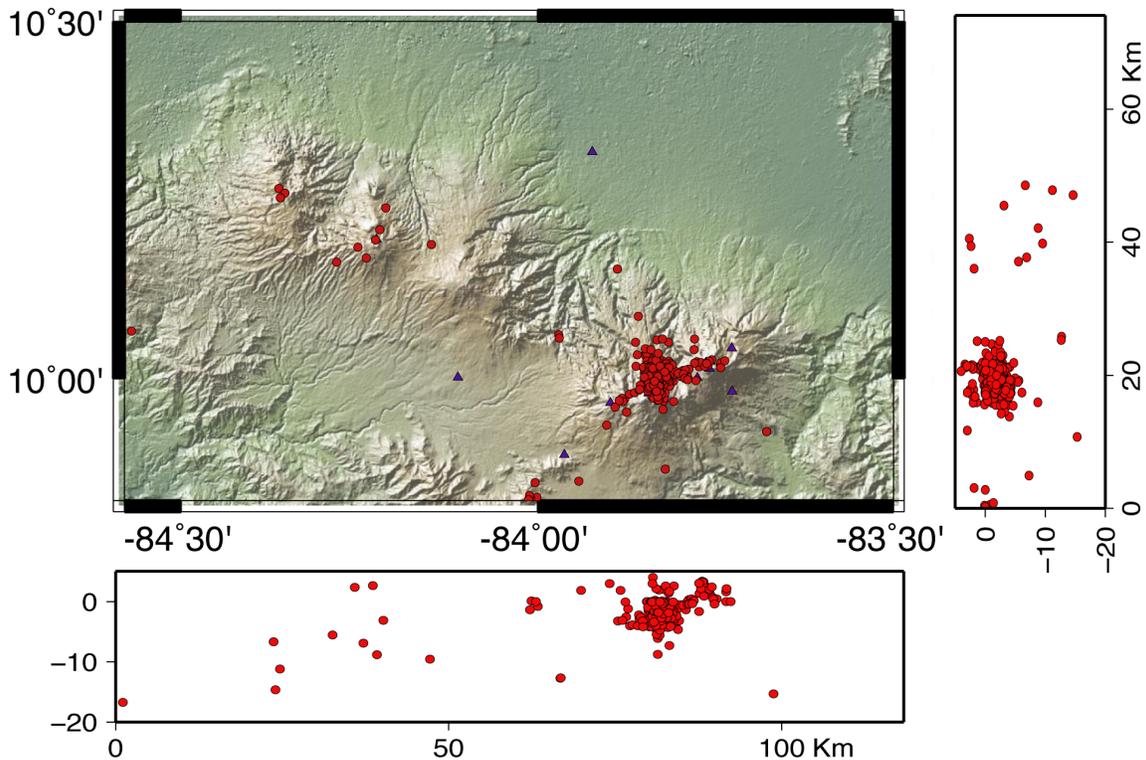


Figura 2. Mapa de la Cordillera Volcánica Central mostrando la sismicidad registrada entre el 5 y 8 de setiembre, 2012. Secciones transversales muestran los sismos proyectados a través del Volcán Turrialba. Puntos rojos representan los sismos localizados y triángulos azules las estaciones sísmicas utilizadas en la localización de los eventos.

Cordilleras de Guanacaste y de Tilarán

El sismo de Nicoya también disparó sismicidad en fallas asociadas a los volcanes de la Cordillera Volcánica de Guanacaste y de Tilarán. Desgraciadamente, la falta de estaciones sísmicas en esta región, no permite tener buenas localizaciones de los eventos. Sin embargo, los mayores eventos, aquellos que pueden localizarse, se ubican fuera de los edificios volcánicos. La sismicidad en el Rincón de la Vieja se localiza primordialmente hacia el oeste, por lo que se encuentran más cerca del complejo Cacao-Orosi que del Rincón. La sismicidad cercana al Tenorio se ubica hacia el este-sureste y la sismicidad más cercana al Arenal en la Cordillera de Tilarán se ubica hacia el sur, dentro de la región de Monteverde. De los dos volcanes activos en estas dos cordilleras, el Rincón y el Arenal, no se notaron cambios importantes en la sismicidad volcánica, aunque se dan cortos enjambres de muy baja magnitud.

I_ Volcán Turrialba

El terremoto de Nicoya del 5 de setiembre no produjo cambios significativos en la sismicidad volcánica del Turrialba aunque si un incremento en la actividad sísmico-tectónica. También se detectó deformación en la parte alta del edificio (mediciones de distancias). Esporádicamente, variaciones discretas en el flujo de gas fueron notadas pero sin cambio del flujo diario (mediciones satelitales). Por lo que se puede decir que en setiembre no se notaron cambios importantes en la degasificación magmática del volcán.

I_1 V.Turrialba: Sismología

El volcán Turrialba no experimentó cambios significativos inmediatamente después del sismo de Nicoya del 5 de setiembre, 2012 ya que los niveles de sismicidad volcánica se mantuvieron durante y después del sismo debajo de 30 sismos diarios [ver la sección *II_1 V.Irazú: Sismología*]. Tampoco se presentaron cambios en la frecuencia o magnitud de los sismos volcano-tectónicos que ocurren en la cima del volcán, asociados a la dinámica del sistema magmático-hidrotermal.

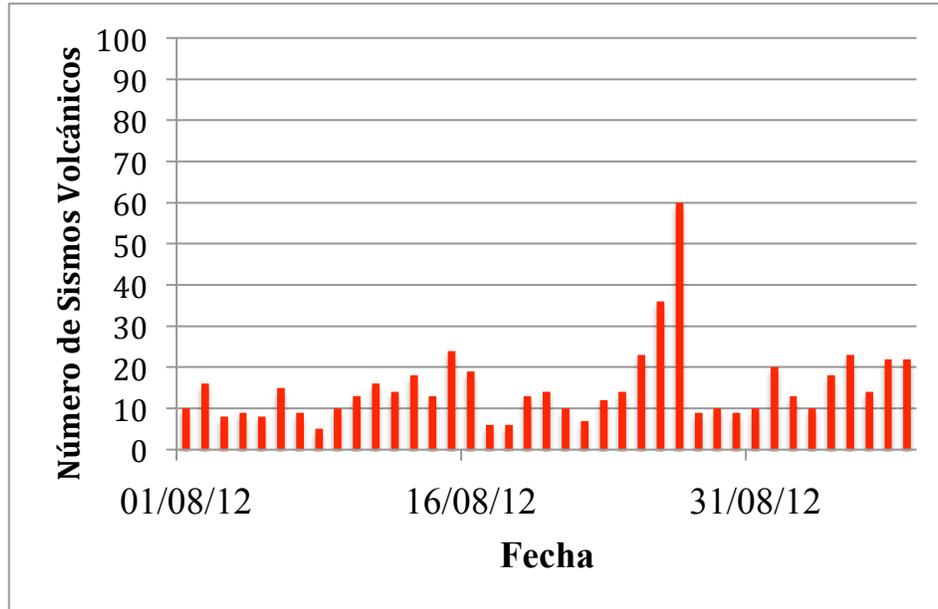


Figura 3: Número de sismos volcánicos registrados en el volcán Turrialba entre el 1 de agosto y el 8 de setiembre, 2012.

I_2 V.Turrialba: Deformación

Una red de mediciones electrónicas de distancia en la cumbre del volcán (Fig. 4) nos permite monitorear la deformación de la cumbre y de los cráteres por cambios superficiales de volumen o movimientos de fallas locales.

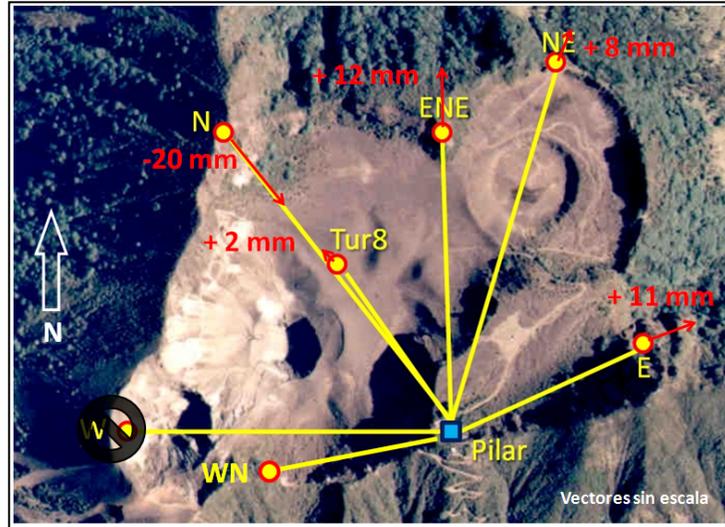


Figura 4: Puntos amarillos y rojos: red de distancias EDM de la cima, volcán Turrialba. Cuadrado azul: base de mediciones. Flechas rojas: vectores de desplazamiento posterior al 5 de setiembre. El punto WN, cercano al cráter oeste, es nuevo y cuenta con una medición hasta la fecha.

Anterior al día 5 de setiembre, se ha registrado una tendencia de contracción en las distancias de la red de la cima del volcán Turrialba. Posterior a esta fecha se observa una expansión en todas las líneas excepto en el punto N (-20 mm, debido a que se encuentra en la zona más alta, Cerro San Carlos y que la tendencia que traía desde antes del evento había sido de disminución de la distancia asociado a la inestabilidad del sitio) en donde se notan cambios de hasta +12 mm (punto ENE) respecto a la tendencia que se venía dando, siendo el terremoto de Nicoya, el causante del mismo (Figs. 4 y 5). Cambios ocurridos entre las fechas de 15 de junio y 26 setiembre 2012. De igual forma se ha visto cambios en la red EDM del volcán Poás debido al terremoto de Cinchona (ver apartado Deformación Poás).

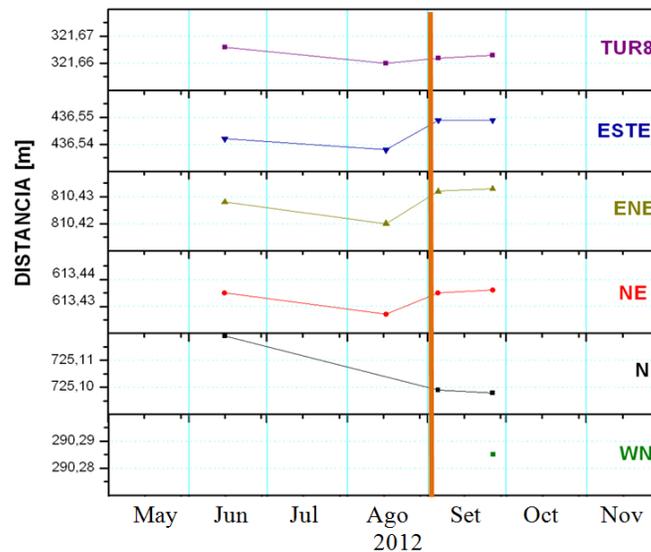


Figura 5: Red de distancias EDM de la cima volcán Turrialba. La línea naranja es la separación entre mediciones posteriores al 5 de setiembre, mostrando la expansión máxima de +12 mm línea Pilar-ENE, nótese que la línea Pilar-N con -20 mm es la única que mantiene la tendencia anterior al evento.

El cambio rápido de distancias y el mantenimiento de la deformación sugiere movimientos superficiales del terreno por las ondas sísmicas y no un cambio en la actividad del volcán.

En cuanto a la distancia entre las estaciones GPS permanentes, CAPI a 2.8 km al suroeste y GIBE a 3 km al noreste del Cráter Oeste, no se registran cambios significativos después del terremoto. La línea presenta una tendencia en todo el período de 4 mm de contracción, con una precisión de ± 5 mm, lo cual no es significativo (Fig.6). Esta base de datos nos informa sobre los cambios de volumen profundos.

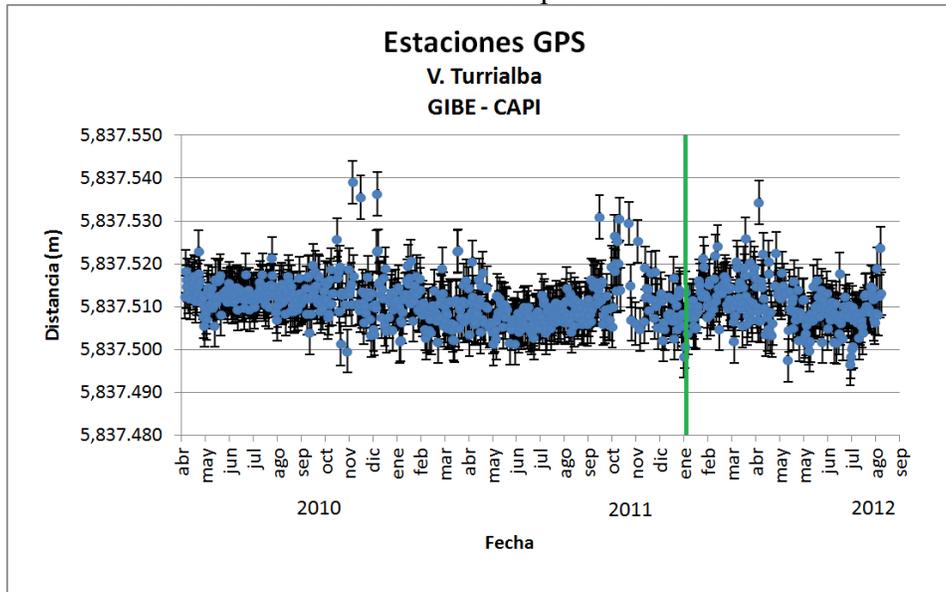


Figura 6. Distancia geométrica entre estaciones GPS CAPI-GIBE, entre abril 2010 al 8 setiembre 2012. La línea verde representa la fecha de apertura de la boca 2012 (emisión de ceniza).

I_3 V.Turrialba: Geoquímica

I_3.1 Evolución térmica de las zonas activas

Las temperaturas medidas, en puntos representativos dentro del cráter oeste, se mantienen con valores altos. En la boca fumarólica 2012 se midieron temperaturas de $\sim 800^{\circ}\text{C}$ (11 setiembre 2012) y $\sim 755^{\circ}\text{C}$ (28 setiembre), en la boca 2011 se midieron $\sim 585^{\circ}\text{C}$ (28 setiembre 2012) y en el piso del fondo, al sur del Cráter Oeste, se midieron temperaturas $> 635^{\circ}\text{C}$ (al pie de la “pirámide de azufre”, el 28 de setiembre).

Mencionamos que a veces la incandescencia visible de noche por la webcam del OVSICORI-UNA aparece más grande que a lo normal. Esta es una ilusión óptica que resulta de gotas de agua y humedad entre la lente y el vidrio de la caja protectora y no a un cambio en la actividad volcánica (Fig.7)

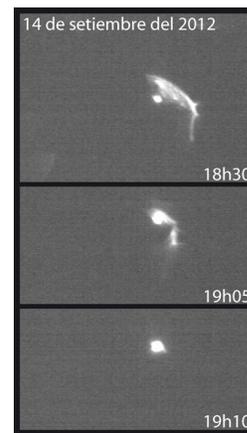


Figura 7: Ilusión óptica la noche del 14 setiembre 2012 (cámara web del OVSICORI-UNA)

I_3.2 Sistema hidrotermal

Mediciones del flujo de CO₂ y H₂S que difunden a través del suelo en la Falla Ariete el 11 de setiembre no muestran ninguna anomalía.

I_4 V.Turrialba: Pluma de gases

Las imágenes de la cámara web del OVSICORI-UNA anterior y posterior al terremoto del 5 de setiembre, no muestran cambios de importancia (Fig.8a).

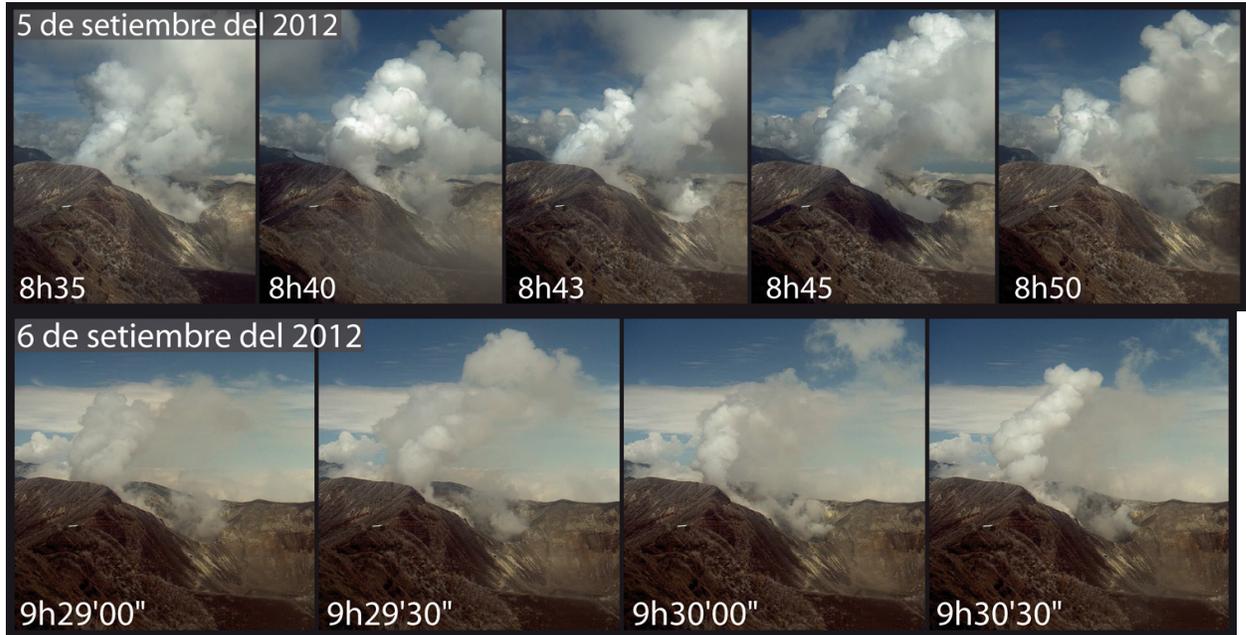


Figura 8: a) Secuencia de imágenes de la webcam del OVSICORI-UNA en el momento del terremoto de Nicoya, el cual ocurrió a las 8:42am. b) Resoplido de gas el día siguiente.

El Sr. Sergio Guillén (funcionario del Parque Nacional Volcán Turrialba) reportó, de acuerdo a sus observaciones, una suerte de pulsos en las exhalaciones habituales del volcán el 6 de setiembre del 2012 (Fig.8b). Los conductos abiertos en los alrededores del cráter activo tienden a cambiar la intensidad del sonido por factores propios de su anatomía, dirección e intensidad del viento y por variaciones del flujo de gas. La resonancia de la onda sonora varía de acuerdo a factores meteorológicos y a la posición del observador.

El gas volcánico dióxido de azufre, SO₂, emitido hacia la atmósfera por el volcán Turrialba y detectado por el satélite OMI/AURA de la NASA ha mantenido una baja tasa de emisión que ha variado entre las 200 y 500 toneladas por día (Fig.9).

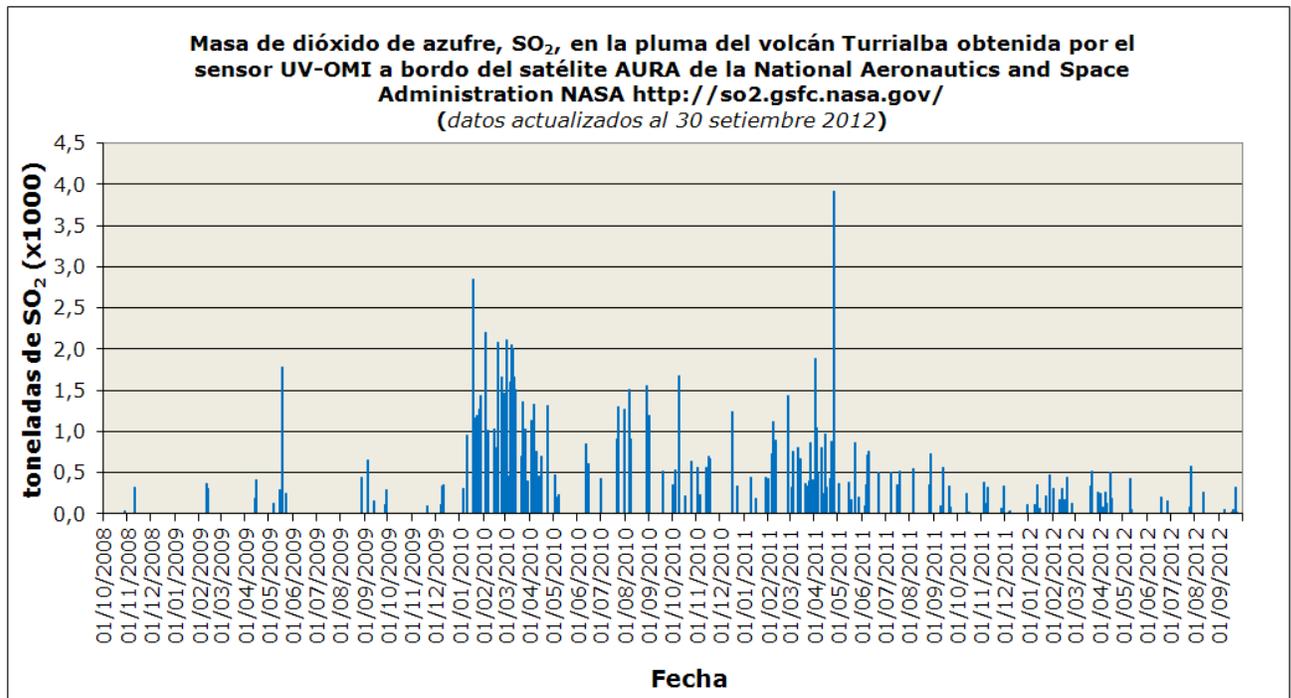


Figura 9: Masa de dióxido de azufre, SO₂, emitida por el volcán Turrialba inferida del análisis de imágenes satelitales del AURA/OMI de la NASA entre octubre 2008 y el 30 de setiembre del 2012. Los datos de masa de SO₂ corresponden al total de SO₂ detectado por el instrumento OMI del satélite AURA en la región de América Central de modo que la información no está corregida respecto al nivel “de fondo” de SO₂. Estos datos corresponden a mediciones hechas cuando el satélite sobrevuela sobre el istmo de América Central entre las 18:00-19:00 UTC. Fuente: <http://so2.gsfc.nasa.gov/>.

Dependiendo de las condiciones climáticas, se observa en la pluma un componente blanco y un componente azulado. El componente blanco es rico en vapor de agua como se ve saliendo del boquete fumarólico que se abrió en enero del 2010 (a la izquierda, Fig.10a,b). El componente azulado es rico en gases magmáticos y aerosoles como se ve saliendo del boquete fumarólico que se abrió en enero del 2012 (al centro, Fig.10a). Los gases azulados son un indicador de gases de alta temperatura ricos en aerosoles (mediciones directas oscilan entre 750 y 800°C). Estos aerosoles están constituidos en gran medida por gotitas diminutas de ácido sulfúrico suspendidas en la pluma volcánica. Por enfriamiento y condensación del agua, generalmente sólo se ve el componente blanco a distancia (Fig.10c), pero los gases ácidos siempre existen y pueden viajar largas distancias desde la cima del volcán (Fig.10d,e).

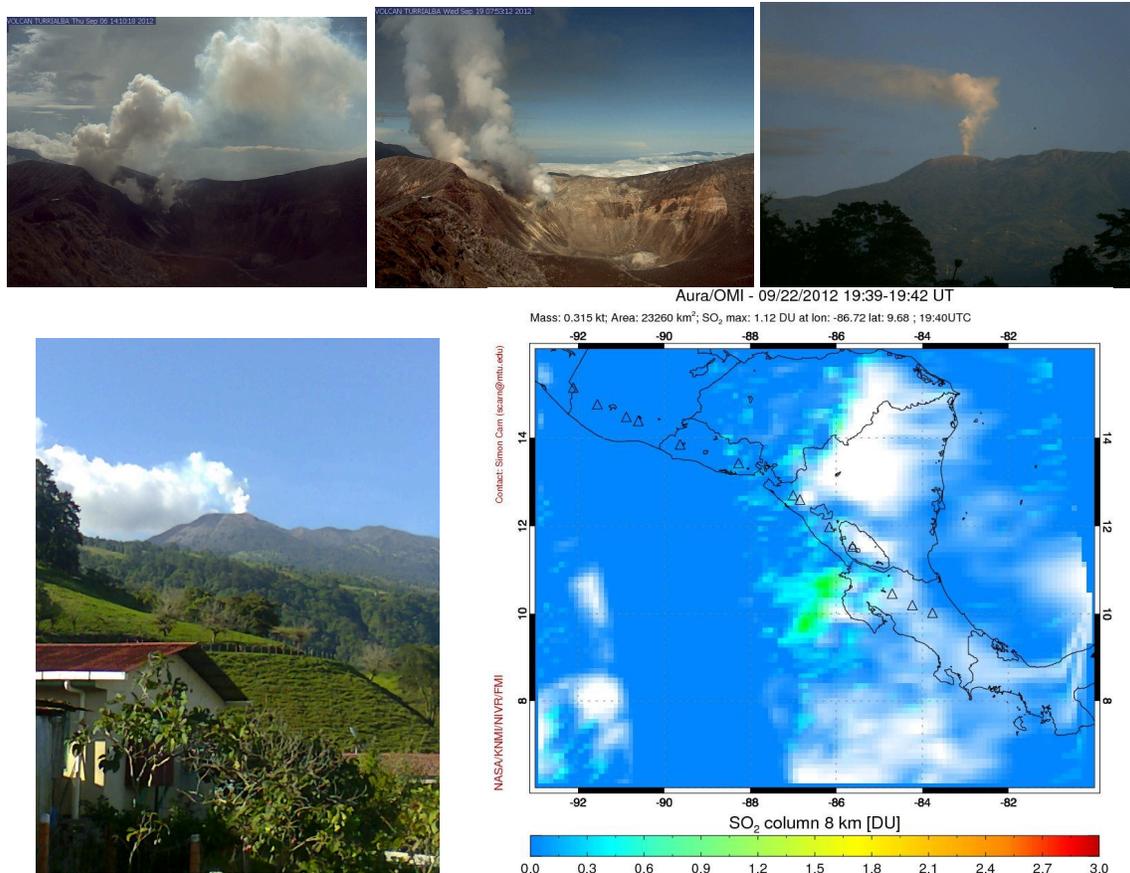


Figura 10: Imágenes por la webcam del OVSICORI-UNA a) el 6 de setiembre del 2012 y b) el 19 de setiembre del 2012. c) Vista desde La Central de Buses en el centro de la ciudad de Turrialba, a las 5:30am el 19 de setiembre del 2012 (Foto: Alejandro Calderón Aguilar). d) Vista desde Coliblanco el 12 de setiembre del 2012 (Foto: Gerald Calderón Mena). e) Imagen del satélite AURA-OMI de la NASA mostrando la pluma del gas dióxido de azufre (SO₂) emitida por el volcán Turrialba el 22 de setiembre 2012. La pluma se dirige hacia el noroeste pasando sobre regiones como Guanacaste y el Océano Pacífico. Imagen satelital: <http://so2.gsfc.nasa/>.

I_5 V. Turrialba: Depositación total ácida (húmeda + seca)

El volcán Turrialba continúa emitiendo una cantidad considerable de vapor y gases volcánicos ácidos a la atmósfera lo que resulta en acidificación e impacto sobre el ambiente debido al proceso de depositación total ácida húmeda y seca (la lluvia ácida es una de las formas de depositación húmeda). Depositación ácida con pH igual o menor a 5.6 ($\text{pH} \leq 5.6$) se ha venido registrando en las inmediaciones del volcán Turrialba desde el año 2007, al despertarse luego de un periodo de reposo relativo de casi 150 años. En general, entre diciembre 2011 y setiembre 2012 la depositación total se ha mantenido considerablemente ácida en los sectores norte y oeste aledaños al volcán, tal y como lo sugiere los valores de pH debajo de 5.6 de la depositación recolectada en las fincas cercanas al volcán, La Silvia (aprox. 2.6 km noroeste) y La Central (aprox. 2 km al suroeste) (Figs. 11 y 12).



Figura 11: Ubicación de los sitios de muestreo de deposición total en los alrededores del volcán Turrialba denotada con círculos rojos: Finca Silvia, Finca Central, Casa Guardaparques, y Calle Vargas. Nótese la pluma de vapor y gases del volcán dispersándose hacia el oeste entre las fincas La Central y la Silvia. Fuente: Google Earth de Google.

Por otra parte, entre mayo y setiembre del 2012, la deposición total en el sector sureste del volcán ha mostrado una disminución significativa en su acidez. Por ejemplo, las estaciones de deposición total en el sector sureste del volcán como la Casa de Guardaparques (aprox. a 1 km del Cráter Oeste) y en Calle Vargas (aprox. a 6 km del Cráter Oeste) han registrados últimamente con frecuencia valores de pH superiores al nivel de referencia de pH=5.6, de modo que la deposición total en esos sitios muestra una tendencia general a ser cada vez menos ácida.

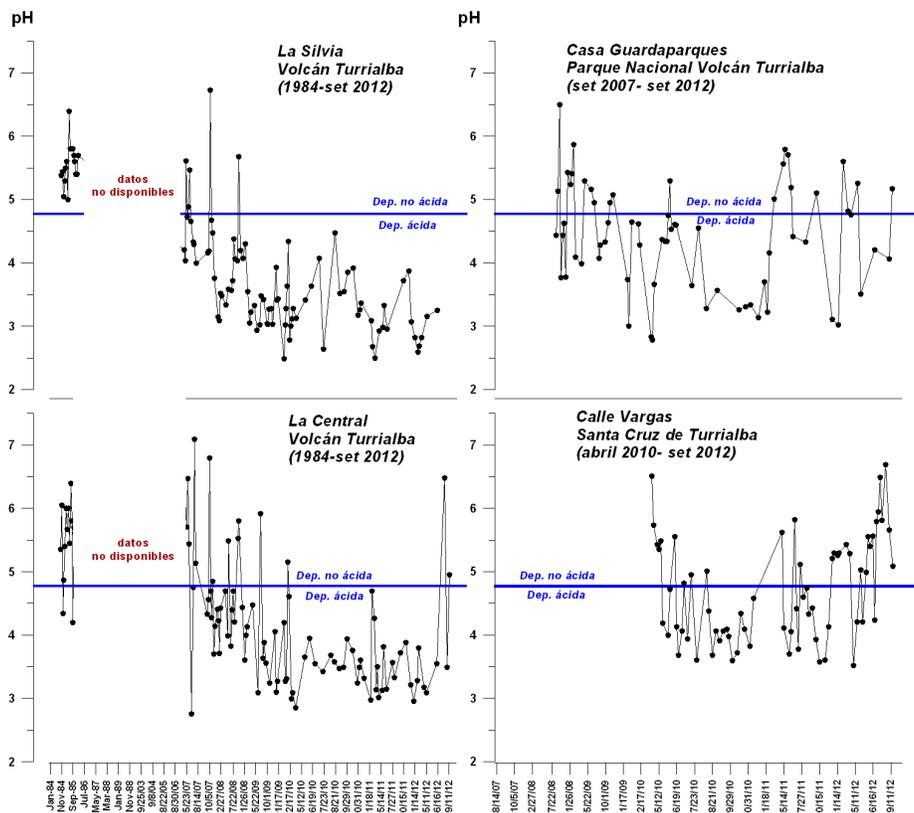


Figura 12: pH (acidez) de la depositación total recolectada en las estaciones de muestreo La Silvia, La Central, Casa Guardaparques y Calle Vargas en las inmediaciones del volcán Turrialba. Valores de $pH \leq 5.6$ corresponden a depositación ácida (línea azul). Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica “Dr. Eduardo Malavassi Rojas” del OVSICORI-UNA.

I_6 V. Turrialba: Otras observaciones

Los enjambres sísmicos disparados por el sismo de Nicoya en el complejo Irazú-Turrialba, provocaron la caída de árboles muertos por la depositación ácida, así como la caída de rocas sobre el camino cerca de la Picada (Fig. 13a).

El “promontorio” rocoso en el borde este del Cráter Oeste se mantuvo erigido a pesar de la actividad sísmica pero una buena parte de este segmento caerá tarde o temprano por lo frágil de su estructura (Fig. 13b).



Figura 13: a) Roca caída por el terremoto sobre el camino para la Picada, en el sector norte del volcán Turrialba (Foto: B.de Bock, 5 set. 2012). b) Restos del segmento rocoso al NE del cráter oeste (foto: E.Duarte, 26 set. 2012).

En el fondo del Cráter Oeste se observan algunas bocas fumarólicas que presentan temperaturas entre 90°C y más de 380°C. Las fumarolas de baja temperatura muestran abundante depositación de azufre nativo (Fig. 14).

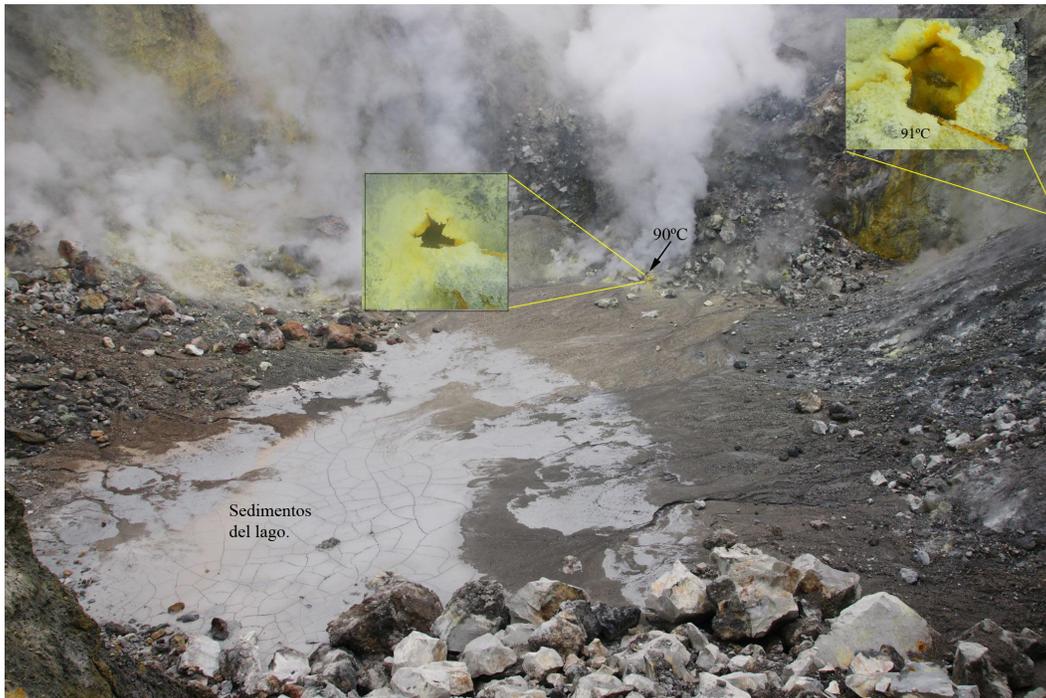


Figura 14: Vista general de Cráter Oeste con algunos puntos calientes (Foto: E.Duarte, 26 set. 2012).

Desde la finca La Silvia (a unos 4km al oeste del Cráter Oeste) se puede apreciar el reverdecimiento de los repastos vecinos. Aún así, las empinadas paredes del flanco oeste del volcán se mantienen con un color café oscuro, debido a la vegetación muerta por causa de la depositación total (húmeda+seca) de naturaleza muy ácida (Fig.15).

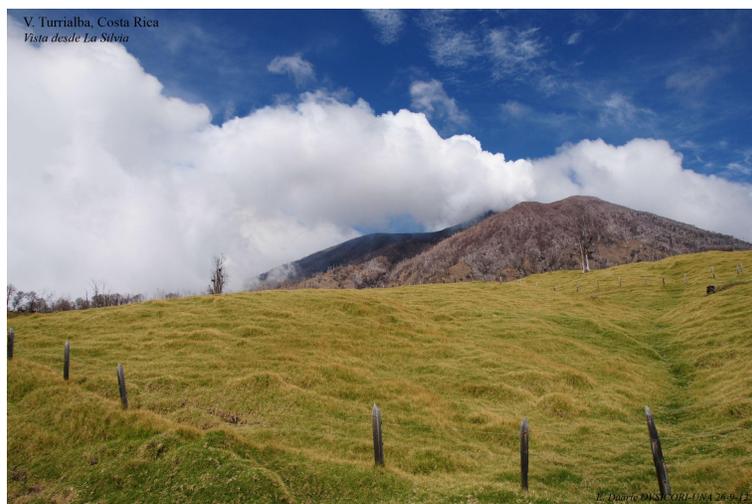


Figura 15: Comparado con los primeros meses del año, los pastos cercanos al Cráter Oeste se notan algo recuperados (Foto: E.Duarte, 26set. 2012).

II_ Volcán Irazú

Debido al terremoto de Nicoya el 5 de setiembre, el volcán Irazú presentó una actividad sísmica importante pero de naturaleza tectónica. No se pudo medir distancias para evaluar la deformación del edificio. No se notaron cambios superficiales que pudieran indicar una posible reactivación magmática.

II_1 V.Irazú: Sismología

La sismicidad volcánica en el volcán Irazú se mantuvo sin cambios luego del sismo de Nicoya; con un sismo tipo LP cada 29 horas en promedio (Fig.16), sin variaciones en sus características (frecuencia y rango de amplitudes) observadas en los meses anteriores.

Sin embargo, la sismicidad volcano-tectónica se incrementó considerablemente inmediatamente después del sismo de Nicoya. Solo durante las primeras 10 horas, de las 14:40 GMT a las 24:00 GMT se contabilizaron 550 sismos. Sin embargo para el día 6 de setiembre el número de sismos había bajado a menos de 300 y los días siguientes se registraron menos de 100 sismos diarios. Del 5 al 8 de setiembre se localizaron 7 sismos con magnitudes entre 3 y 3.6 grados. El mayor ocurrió apenas 6 minutos después del sismo de Nicoya y se calculó una magnitud de 3.6.

Los epicentros se alinean con los sistemas de fallas más importantes que atraviesan el volcán Irazú; el principal con una orientación nor-noroeste-sur-sureste y uno secundario que se continúa desde el volcán Turrialba con orientación noreste-suroeste. Sin embargo, debido a la distribución de la red sísmica, que cubre principalmente el volcán Turrialba, la dispersión en los epicentros no permite definir las fallas que generaron la sismicidad (Fig.17). Los sismos son superficiales, con profundidades menores a 10 km, la mayoría de ellos ubicados a menos de 4 km de profundidad y unos pocos se ubican cerca de la cima del volcán.

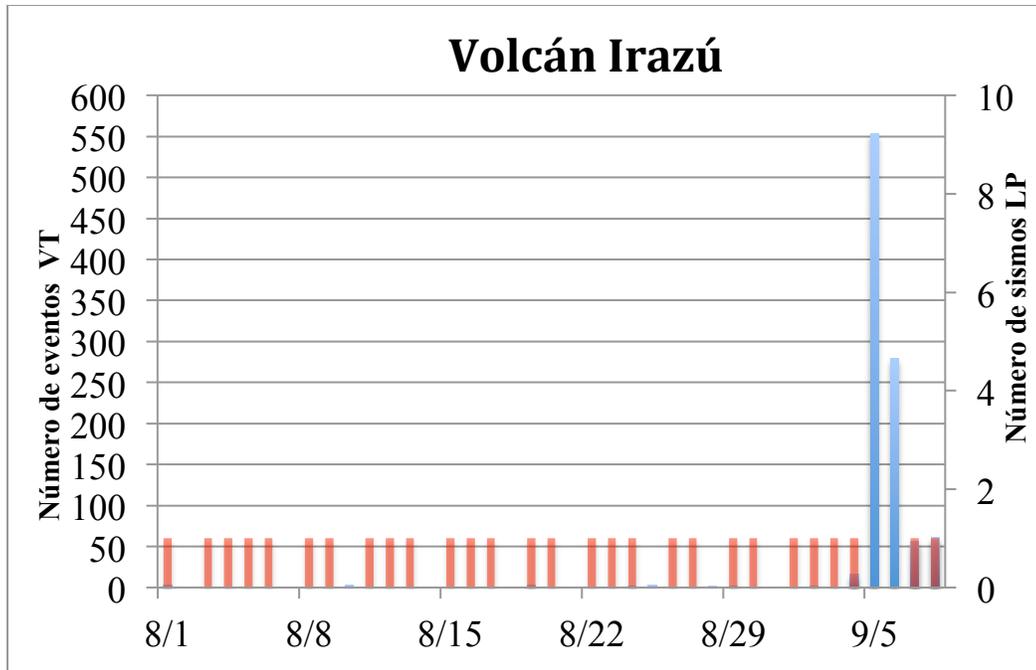


Figura 16: Número de sismos volcano-tectónicos (derecha, barras azules) y número de sismos volcánicos (barras rojas) ocurridos entre el 1 de agosto y el 8 de setiembre, 2012.

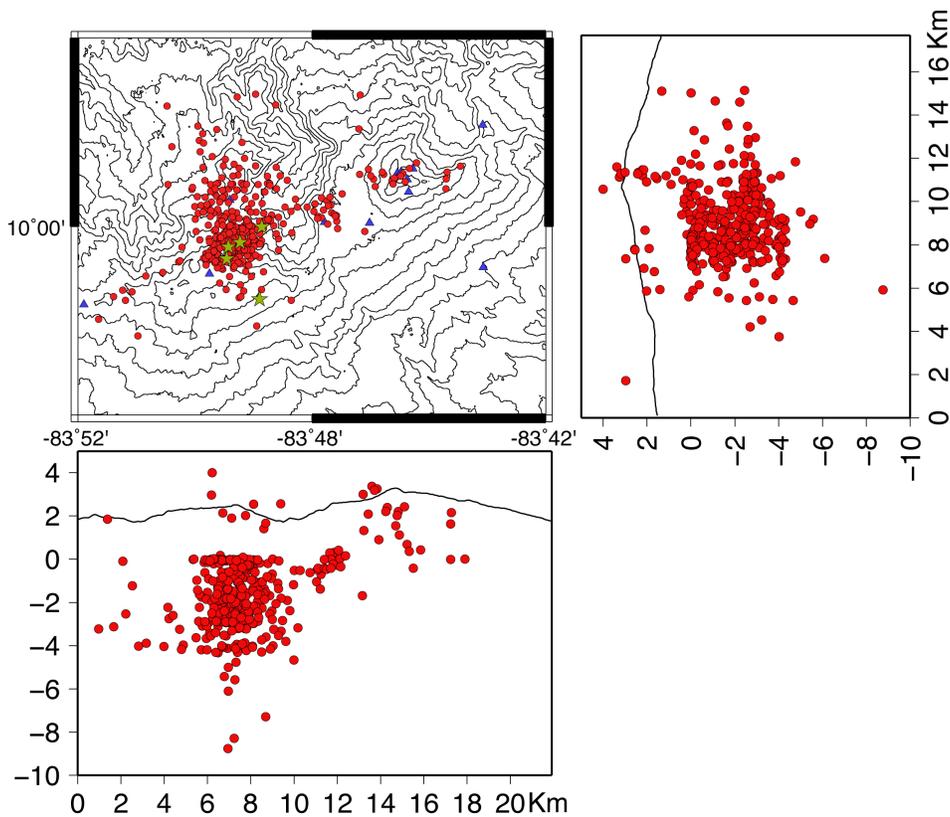


Figura 17. Mapa con epicentros de sismos ocurridos entre el 1 y el 8 de setiembre, 2012. Las estrellas verdes indican los sismos con magnitudes mayores o iguales a 3.0, los puntos rojos son los hipocentros determinados y los triángulos azules las estaciones sísmicas utilizadas para localizar los sismos. Los cortes transversales pasan por la cima del volcán Turrialba.

II_2 V.Irazú: Deformación

La continuidad de las mediciones de la red de distancia fue afectada por el cambio de equipo en junio del 2012. La línea roja en el gráfico de la Figura 18, indica el uso del nuevo instrumento Leica TM30. Por esto el último dato en Haya y Bunker1 (07 de junio) no corresponde con cambios atribuidos al volcán ni al sismo del 5 de setiembre. La línea EDM Haya ubicada a 200 m norte del cráter Diego de la Haya, presenta una clara tendencia de expansión de 3,6 mm por año, mientras que Búnker1 y Búnker2 no presentan esa tendencia.

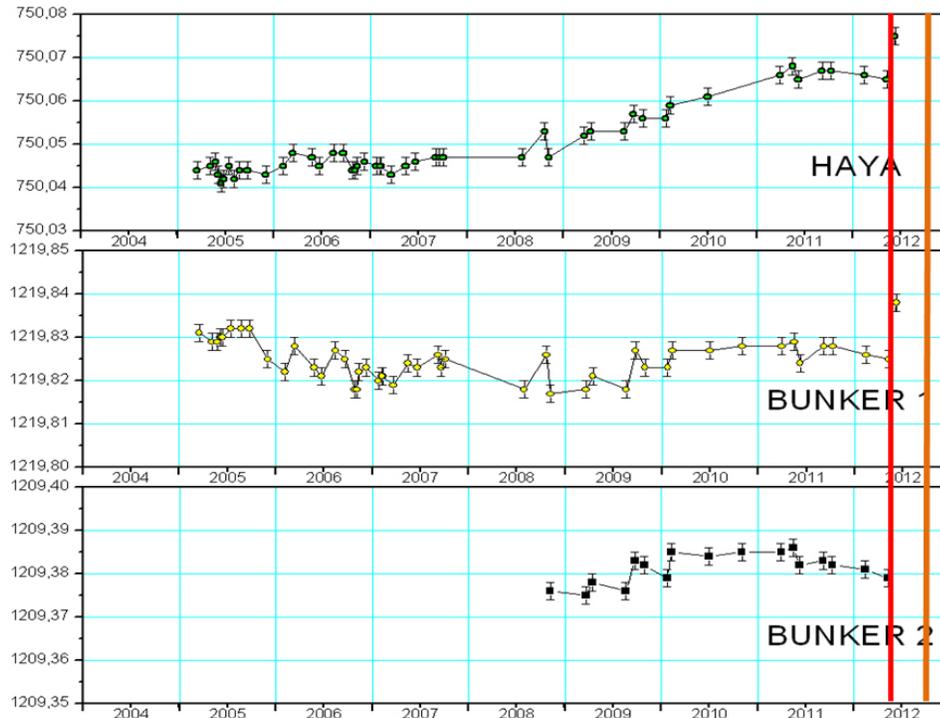


Figura 18: Red de distancias EDM en la cima del volcán Irazú. Los puntos Bunker1 y Bunker2, presentan datos con mucha dispersión, mientras que la línea hacia el punto Haya, presenta una clara tendencia de expansión. La línea roja representa el cambio de equipo, la línea naranja representa el terremoto de Nicoya.

II_3 V.Irazú: Observaciones en el Cráter Principal

El Sr. M. Gamboa (funcionario del Parque Nacional Volcán Irazú) reportó la caída de pequeñas rocas desde las paredes internas del Cráter Principal (Fig.19a,b). Desde inicios de los 90's se ha reportado esporádicamente la caída de fragmentos menores en este sector, por lo que esta ocasión no es la excepción.



Figura 19: a) El desprendimiento rojizo principal ocurrió en el 2003. Capas alternas e inestables promueven la caída de material en forma esporádica (Fotos: M.Gamboa, 6 set. 2012, y E.Duarte, 22 abr. 2012). b) Laguna volcánica en el Cráter Principal en 16 de setiembre del 2012 (Foto: Alfredo Lizano Zumbado)

El nivel del lago sigue bajando pero sin igualar los bajos niveles alcanzados en el 2011.

II_4 V.Irazú: Fuentes Termales

En los últimos 47 años, el volcán Irazú ha manifestado solamente actividad hidrotermal secundaria tal como desgasificación fumarólica tenue de baja temperatura ($<90^{\circ}\text{C}$) con depositación de azufre y otros minerales estables a bajas temperaturas, así como la existencia de fuentes termales con aguas salinas principalmente en el sector norte del volcán. En general, no se han notado cambios sustanciales en la temperatura, acidez (pH), conductividad eléctrica o salinidad en las fuentes termales, al menos entre el 2003 y el presente (Fig.20). La Quebrada Gata (sitio de muestreo A), ubicada aprox. 2.6 km al norte del Cráter Principal, muestra perfiles físicoquímicos bastante estables a lo largo de las últimas 2 décadas, con valores de conductividad eléctrica, temperatura, y pH (acidez) oscilando alrededor de $1695\mu\text{S}/\text{cm}$, $28,9^{\circ}\text{C}$, y 2.98, respectivamente. La razón promedio $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 22,4$ es también bastante constante (Fig.20). La fuente termal Río Aguacaliente presenta pH's similares pero temperatura, salinidad y acidez mayores. En el periodo 2003-2012, la conductividad eléctrica, temperatura, y pH (acidez) han oscilado alrededor de $2388\mu\text{S}/\text{cm}$, $37,8^{\circ}\text{C}$, y 2,83, respectivamente. La razón promedio del $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 4,2$ sugiere que los fluidos hidrotermales que alimentan a Río Aguacaliente circulan más profundamente en el subsuelo que las aguas de Quebrada Gata.

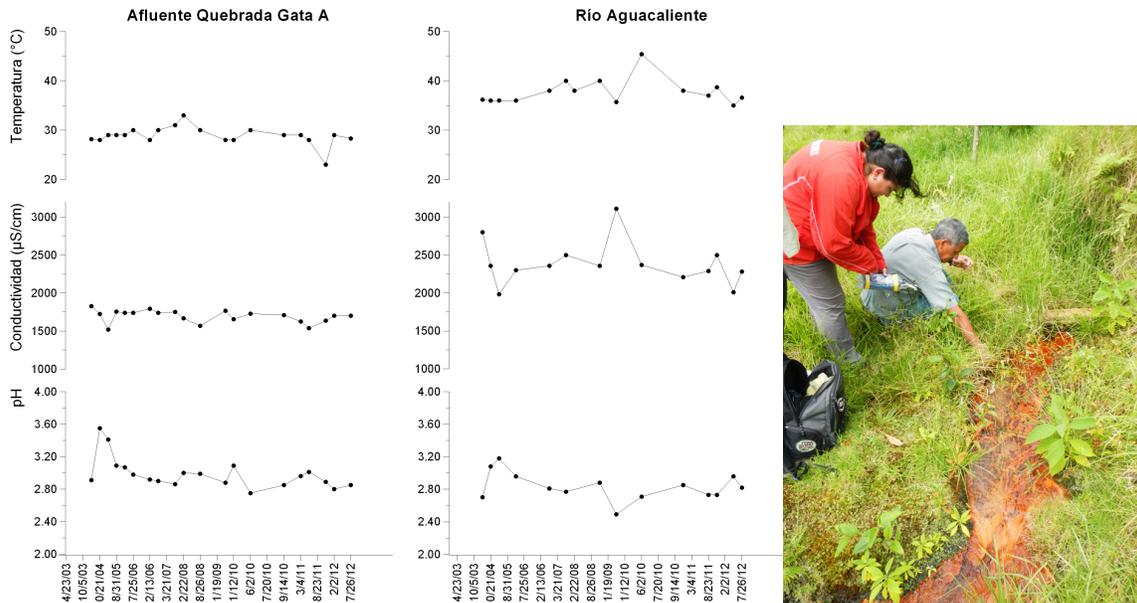


Figura 20: Series de tiempo de pH, conductividad, y temperatura de las fuentes termales del volcán Irazú Quebrada Gata y Río Aguacaliente (Foto de la fuente del Río Aguacaliente en julio 2012: G.Avard)

III_ Volcán Poás

El volcán Poás presentó un pequeño incremento en la actividad sísmica volcano-tectónica después del terremoto de Nicoya el 5 de setiembre, pero no hubo cambios importantes en la actividad sísmica volcánica (sismo de período corto, temblores o erupciones freáticas). Se observó que el edificio se deformó como consecuencia de esta actividad tectónica. El lago mantuvo una actividad sostenida y continua con celdas de convección vigorosas pero como el resultado de la baja presión hidrostática ejercida por la columna de agua debido al bajo nivel del lago. El criptodomo continúa mostrando un descenso en la temperatura de las fumarolas.

III_1 V.Poás: Sismología

El volcán Poás experimentó un incremento en la sismicidad volcánico-tectónica luego del sismo de Nicoya del 5 de setiembre, 2012, sin embargo, la sismicidad volcánica se mantuvo dentro de las fluctuaciones observadas durante este año. La Figura 21 muestra el número de sismos volcánicos diarios del 1 de agosto al 12 de setiembre, 2012 (barras azules) y el número de sismos volcano-tectónicos registrados por día (barras rojas). Se nota una disminución en el número de sismos volcánicos y un incremento en el número de sismos volcano-tectónicos luego del sismo de Nicoya. Sin embargo, la disminución en el número de sismos volcánicos puede deberse a que las señales, de baja amplitud, estén escondidas bajo el ruido sísmico (sismos volcano-tectónicos en el Poás, réplicas del sismo de Nicoya y otros sismos en la región de la Cordillera Volcánica Central).

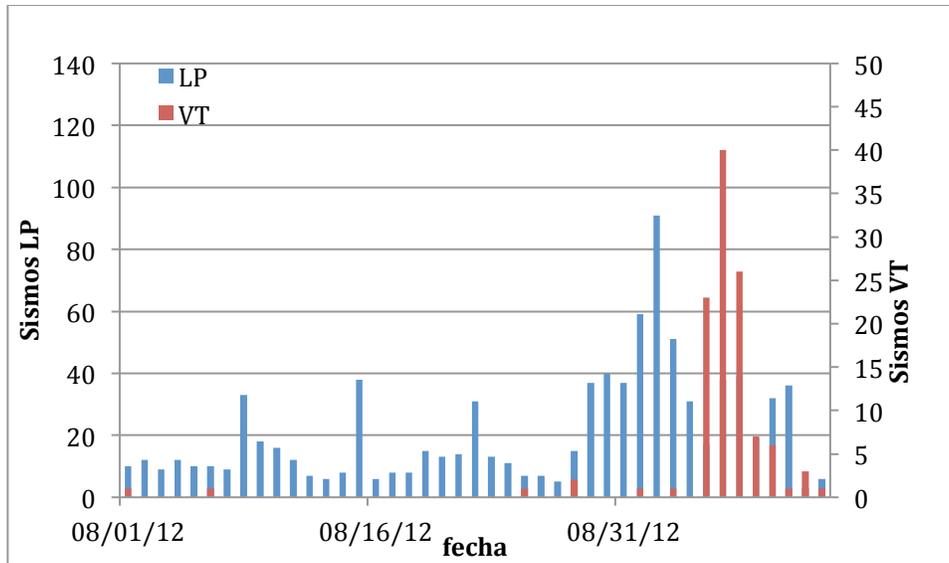


Figura 21. Número de sismos volcánicos (LP, barras azules) y volcano-tectónicos (VT, barras rojas) diarios registrados en la estación sísmica CRPO.

El número de sismos volcano-tectónicos alcanza un máximo en el día 6, un día después del sismo de Nicoya. El sismo de mayor magnitud se registró ese mismo día a las 2:32 pm (hora local) con una magnitud de 3.3. Los eventos VT registrados se ubican principalmente dentro de la región cuspidal del volcán Poás, por lo que podrían considerarse rupturas de falla influenciadas por el sistema hidrotermal.

III_2 V.Poás: Deformación

Las mediciones electrónicas de distancias (EDM) desde el pilar del mirador muestran en todas una tendencia de expansión que va de los 15 mm (línea Mirador-BW) hasta los 30 mm (línea Mirador-A), como se ve en la Figura 22, debido al terremoto de Nicoya (línea naranja). La línea roja, representa el cambio de instrumento, Leica TM30, por lo que ese cambio no se puede atribuir a un cambio de la actividad volcánica. Los datos tomados entre estas dos líneas (roja, naranja), no muestran una tendencia clara ya que la incertidumbre de los datos es mayor a algún posible cambio. Por comparación, se atribuyen al terremoto de Cinchona (la línea verde) expansiones en las distancias de hasta 25 mm (puntos A y D). Tal deformación no significa necesariamente un cambio en la actividad volcánica.

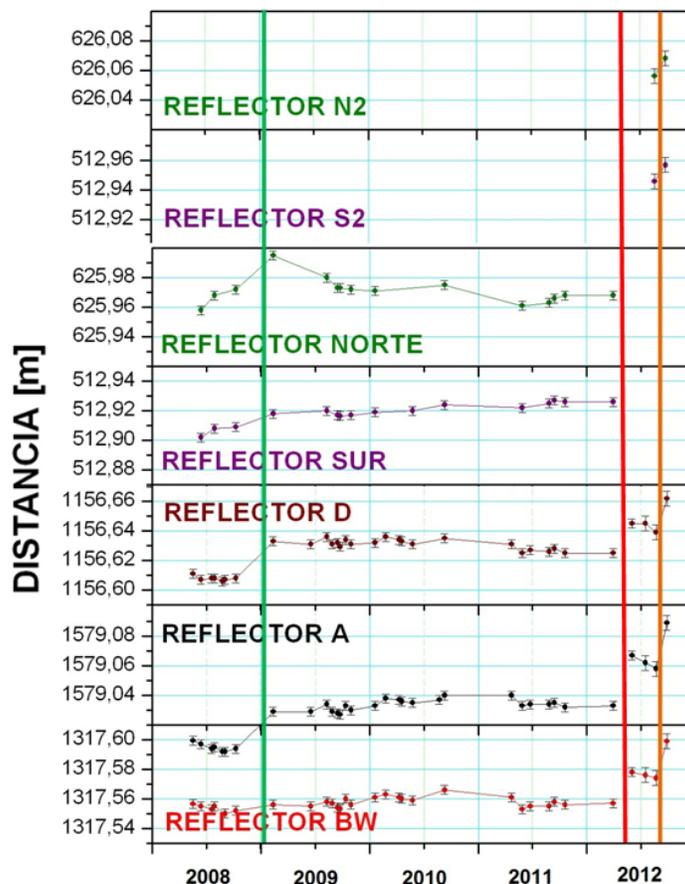


Figura 22: Mediciones de distancias (EDM) de la red del volcán Poás, ubicadas alrededor del cráter principal (A, BW, D) y en la base del domo (N2, S2, casi mismo sitio de los puntos Norte y Sur, respectivamente). Línea verde: terremoto de Cinchona. Línea roja: nuevo equipo de mediciones. Línea naranja: terremoto de Nicoya.

III_3 V.Poás: El criptodomo

III_3.1 Mediciones geoquímicas

La temperatura de las fumarolas en el criptodomo continúan bajando. Se midió en forma directa con termocupla de superaleación en sitios accesibles en el sector este un máximo de 202°C el 13 de setiembre del 2012. En el lado oeste del criptodomo, las máximas temperaturas directas en sitios accesibles fueron de 91°C (Fig.23). El flujo de gas y calor más importante parece concentrarse hacia el centro de la zona activa del criptodomo (cara norte), a la cual no se pudo tener acceso.



Figura 23: Vista sobre la parte oeste del criptodomo y algunas solidificaciones de azufre (Fotos: E.Duarte, 12set. 2012).

Algunas mediciones del flujo de CO_2 y H_2S que difunden a través del suelo han sido repetidas desde julio del 2012. A pesar de la falta de datos históricos en este monitoreo, no se apreció ningún cambio evidente en estas primeras mediciones.

III_3.2 Otras observaciones

La parte norte alta del criptodomo muestra inestabilidad por la alteración hidrotermal, y se notó frecuente caída de rocas el 13 de setiembre del 2012. La cavidad en el criptodomo descrita en el boletín de agosto del 2012 no sufrió cambios por la actividad sísmica. La misma presenta poca salida de gas pero una alta emisión de dióxido de carbono.

Muy pocos derrumbes debidos al terremoto de Nicoya del 5 de setiembre del 2012 fueron notados en el Cráter Principal.

III_4 V.Poás: El lago ultra ácido del cráter activo

III_4.1 Mediciones geoquímicas

En setiembre 2012 el lago presenta un color verde lechoso, una temperatura que se mantuvo entre $47-48^\circ\text{C}$, el $\text{pH}=0.02$, y la conductividad eléctrica 433 mS/cm . Entre abril y noviembre del 2011 el lago registró valores de conductividad eléctrica que excedieron los 500 mS/cm , superando el límite de capacidad de medición del potenciómetro que utilizamos para aguas super salinas. Por esta razón en la Fig. 24 no se muestran datos de conductividad entre abril-noviembre 2011. Es justo dentro de este periodo cuando se registra un incremento importante en el número de erupciones freáticas en el lago y un alto flujo de calor y gases magmáticos principalmente a través del criptodomo. El alto flujo de calor a través del CPC produjo incandescencia que duró desde julio hasta octubre 2011. La Figura 24 muestra en general un cambio radical en las condiciones del lago del Poás a partir de marzo del 2005: Temperaturas hasta de 62°C , conductividad eléctrica superior a 500 mS/cm , potencial eléctrico $>480\text{ mV}$, y valores de pH negativos tan bajos

como $\text{pH} = -0.72$. En marzo del 2005 se observó fuerte actividad convectiva y el transporte a la superficie del lago de grandes cantidades de azufre fundido. Un año más tarde, el 23 de marzo del 2006 se inició un nuevo ciclo de actividad freática en el lago del Poás el cual continúa hasta el día de hoy.

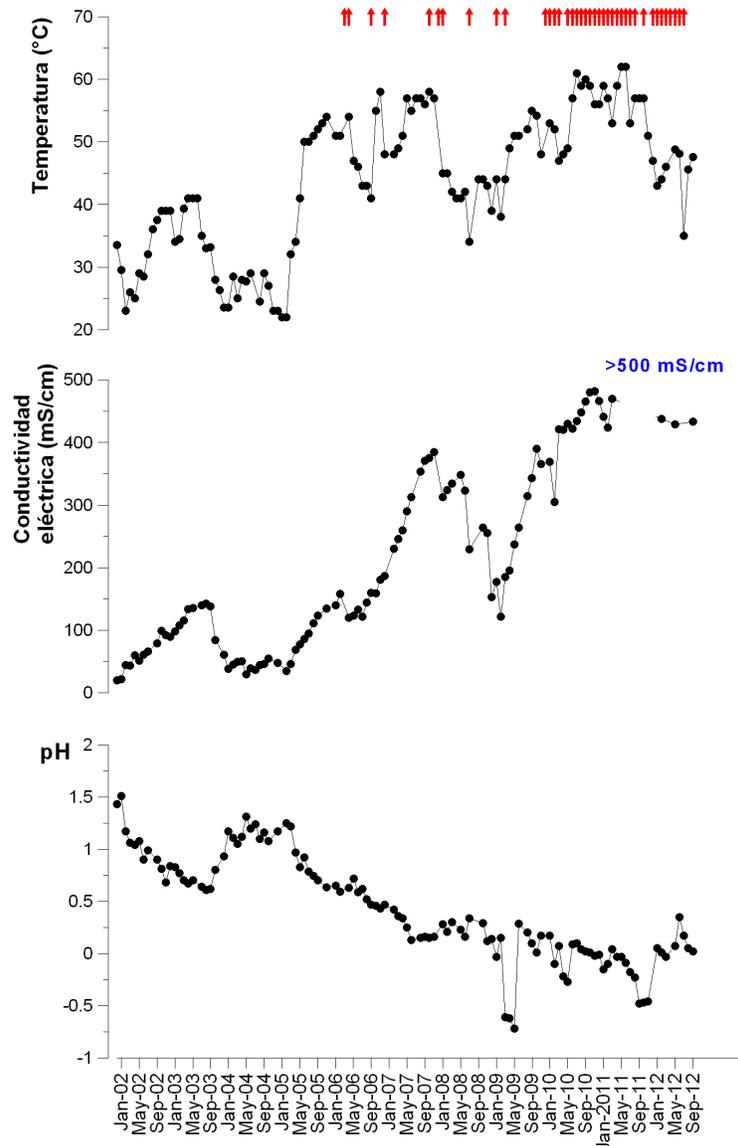


Figura 24: Serie de tiempo de pH (acidez), conductividad, y temperatura del lago ultraácido del Poás en el periodo enero 2002-setiembre 2012. Las flechas rojas indican los meses en que se han observado erupciones freáticas en el lago. Datos: Programa de Vigilancia Volcánica- Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA.

III_4.2 Otras observaciones

Después de una estabilización en agosto, el nivel del lago ultraácido bajó de nuevo en setiembre (perdida de $\sim 0.4\text{m}$ entre el 20 de julio y el 13 de setiembre). Un sobrevuelo de la Comisión Nacional de Emergencias (C.N.E.) el 7 de setiembre permite la observación de una celda de convección muy activa en el centro del lago, pero esta celda ya fue

reportada muy activa en el boletín de julio con cambios muy visibles en algunos minutos, y la misma se mantuvo en condiciones similares todo el mes de setiembre a lo mínimo. Esta celda produce azufre fundido que flota en la superficie del lago y que se mueve en dirección predominante del viento y por las corrientes lacustres. Una celda de convección mas pequeña pero vigorosa ubicada entre el criptodomo y el borde sureste del lago muestra cambios rápidos (en el intervalo de segundos a minutos) (Fig.25 y video en la página web del OVSICORI-UNA). Esta celda de convección se notó ya en julio del 2012 (boletín de julio del 2012), sin embargo su actividad parece haberse incrementado posiblemente por el bajo nivel de la columna de agua que ejerce una menor presión hidrostática sobre las fumarolas subacuáticas.

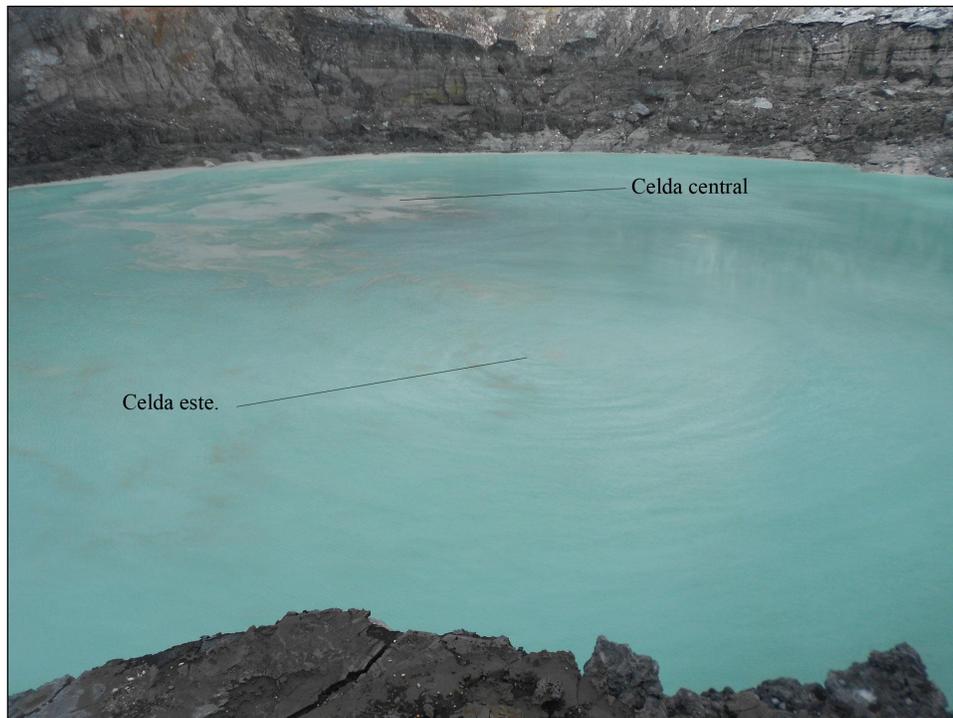


Figura 25: Panorámica de la parte central del lago ultrácido mirando hacia el WNW (Foto: E.Duarte, 12 set. 2012).

III_5 V.Poás: Depositación total ácida

La depositación total (húmeda y seca) monitoreada por el OVSICORI-UNA nos permite determinar el nivel de acidificación del ambiente causado por las emisiones de gases magmáticos a través de las fumarolas subaéreas y subacuáticas existentes en el cráter activo. Los perfiles de pH de la depositación ácida en cuatro de las estaciones de muestreo de depositación total del Poás muestran en general una tendencia del pH a disminuir gradualmente (líneas rojas en figura 26), lo cual implica un incremento en la acidez de la depositación y por ende una mayor acidificación del ambiente circundante. Este aumento paulatino en la acidez de la depositación en el Poás se viene observando desde los años 2005-2006, momento en que inició el ciclo de actividad freática del Poás que continua hoy día. Entre los años 2009 y 2011 se observó con mayor frecuencia eventos de depositación total ácida con pH's entre 3 y 4 debido al alto flujo de gases

magmáticos y calor liberados hacia la atmósfera a través del criptodomo y la superficie del lago ultraácido.

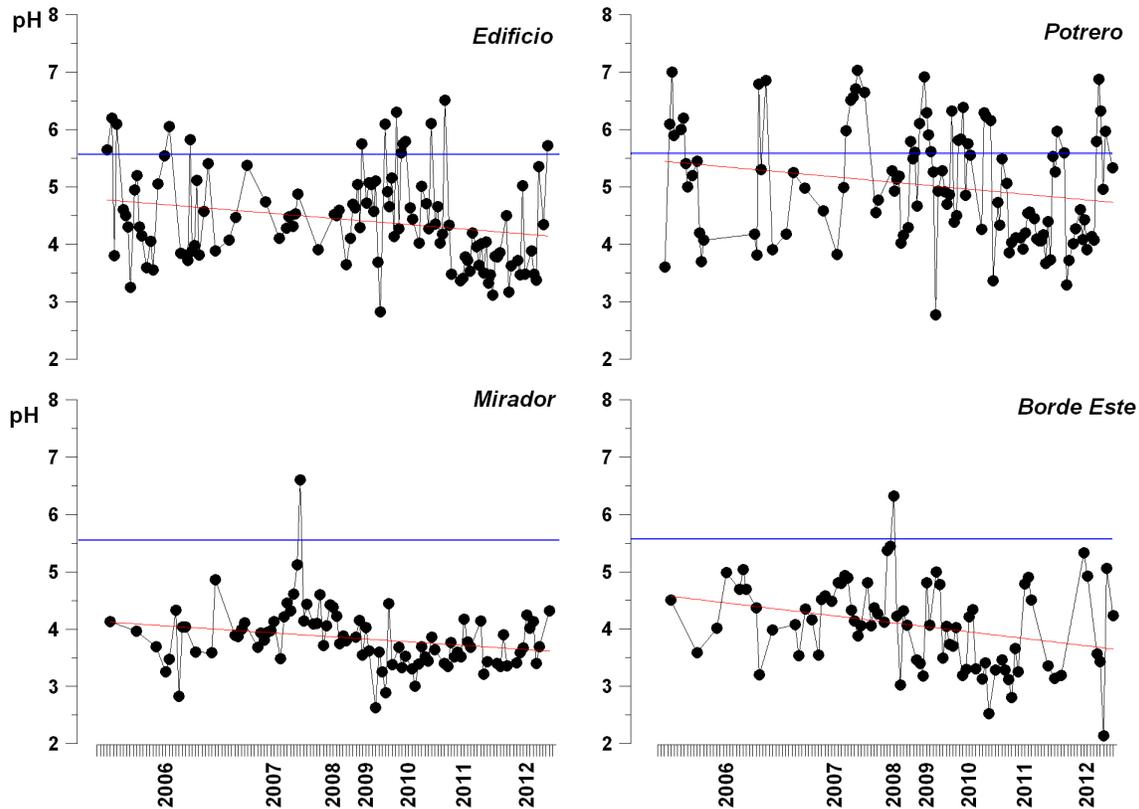


Figura 26. Serie de tiempo de pH (acidez) de la depositación total recolectada en las estaciones de muestreo Edificio, Potrero, Mirador y Borde Este ubicadas en las cercanías del cráter activo del volcán Poás. Valores de $pH \leq 5.6$ corresponden a depositación ácida (línea azul). Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA.

IV_ Volcán Arenal

El sismo de Nicoya el 5 de setiembre generó la caída moderada de rocas desde la parte superior del flanco norte del edificio por la inestabilidad del material en esta zona de fuerte pendiente. Sin embargo, no se notaron cambios en las fuentes termales alrededor del volcán, ni en la actividad magmática.

IV_1 V.Arenal: Sismología

El volcán Arenal sigue sin presentar sismicidad volcánica importante. La sismicidad tectónica disparada por el sismo de Nicoya se ubica principalmente hacia el sur del Arenal (Monteverde) y el oeste (Tenorio). Tanto antes como después del sismo de Nicoya no se registra sismicidad volcano-tectónica significativa dentro del edificio volcánico del volcán Arenal, y la sismicidad volcánica (LP o tremor) está ausente o es de muy baja amplitud para ser registrada por las estaciones sísmicas.

IV_2 V.Arenal: Deformación

Por razones climáticas, no se tiene mediciones posteriores al terremoto de Nicoya (línea naranja Fig.27). Durante los meses pasados, no se observan cambios significativos desde la segunda mitad del año 2011. La línea roja vertical muestra el inicio de mediciones con un instrumental distinto al que se venia usando previamente.

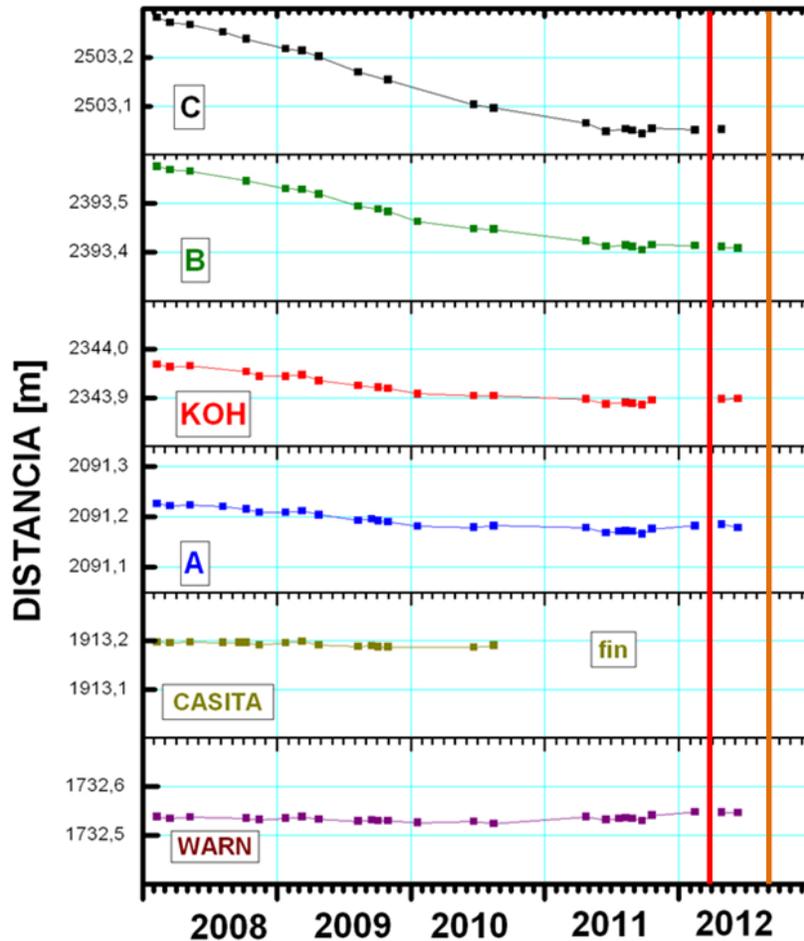


Figura 27: Red de distancias EDM para el volcán Arenal, medidas desde el flanco oeste.

IV_3 V.Arenal: Geoquímica: Depositación total ácida (húmeda + seca)

La depositación total ácida [húmeda (lluvia) +seca] recolectada en la estación de muestreo Caseta C, ubicada 1.9 km al oeste del Cráter C del volcán Arenal, presenta un incremento general sostenido en el tiempo de valores de pH cada vez mayores tendiendo a un $\text{pH} \geq 5,6$ lo que indica que la depositación total en las inmediaciones del volcán es cada vez menos ácida (Fig.28). Valores de $\text{pH} \geq 5,6$ son valores normales para depositación total en lugares remotos libres de o con mínima contaminación natural o antropogénica.

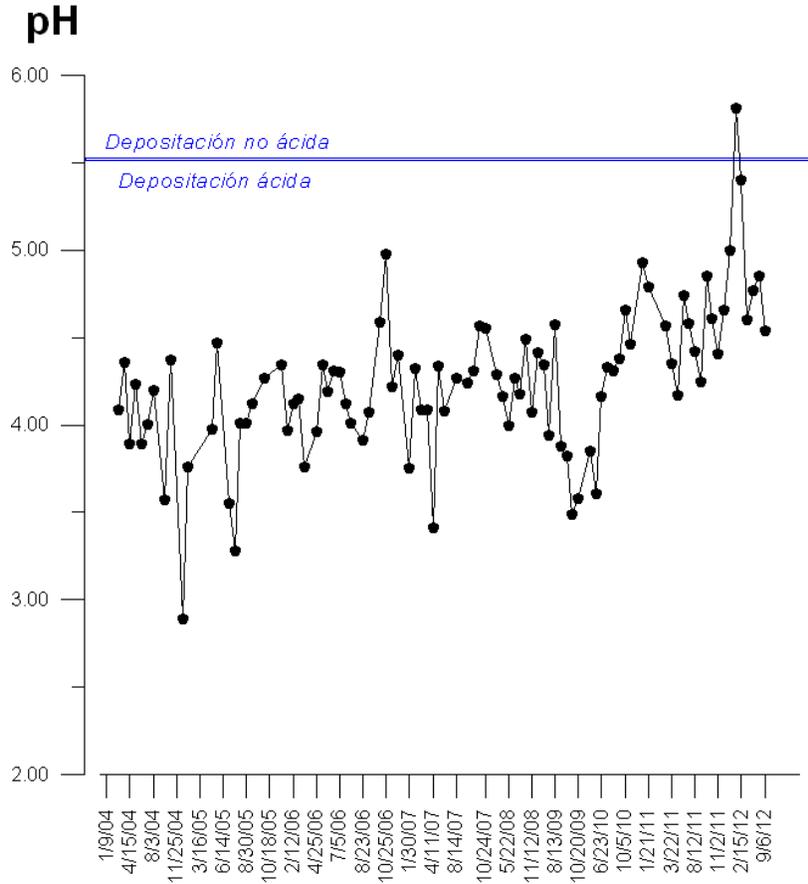


Figura 28: pH (acidez) de la depositación total ácida recolectada en la estación de muestreo Caseta C, ubicada al oeste del volcán Arenal. Valores de $pH \leq 5.6$ corresponden a depositación ácida (línea azul). Datos: Programa de Vigilancia Volcánica - Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA.

IV_4 V.Arenal: Geoquímica: Fuente Termal Tabacón

La fuente termal Tabacón, ubicada ca. 3.3 km al noroeste del Cráter C del Volcán Arenal, presentaba hasta el año 2007 aguas del tipo salinas-cloruradas. 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 ha mostrado cambios físicoquímicos sistemáticos que parecen estar asociados a la notable disminución en la tasa de extrusión y desgasificación del volcán Arenal observados en los últimos 5 años. En los años más recientes se observa en general una disminución en el pH, la conductividad eléctrica y la temperatura (Fig. 29). Estos cambios sugieren una menor interacción agua-gas-calor-roca y por tanto una modificación en el régimen magmático-hidrotermal del volcán Arenal.

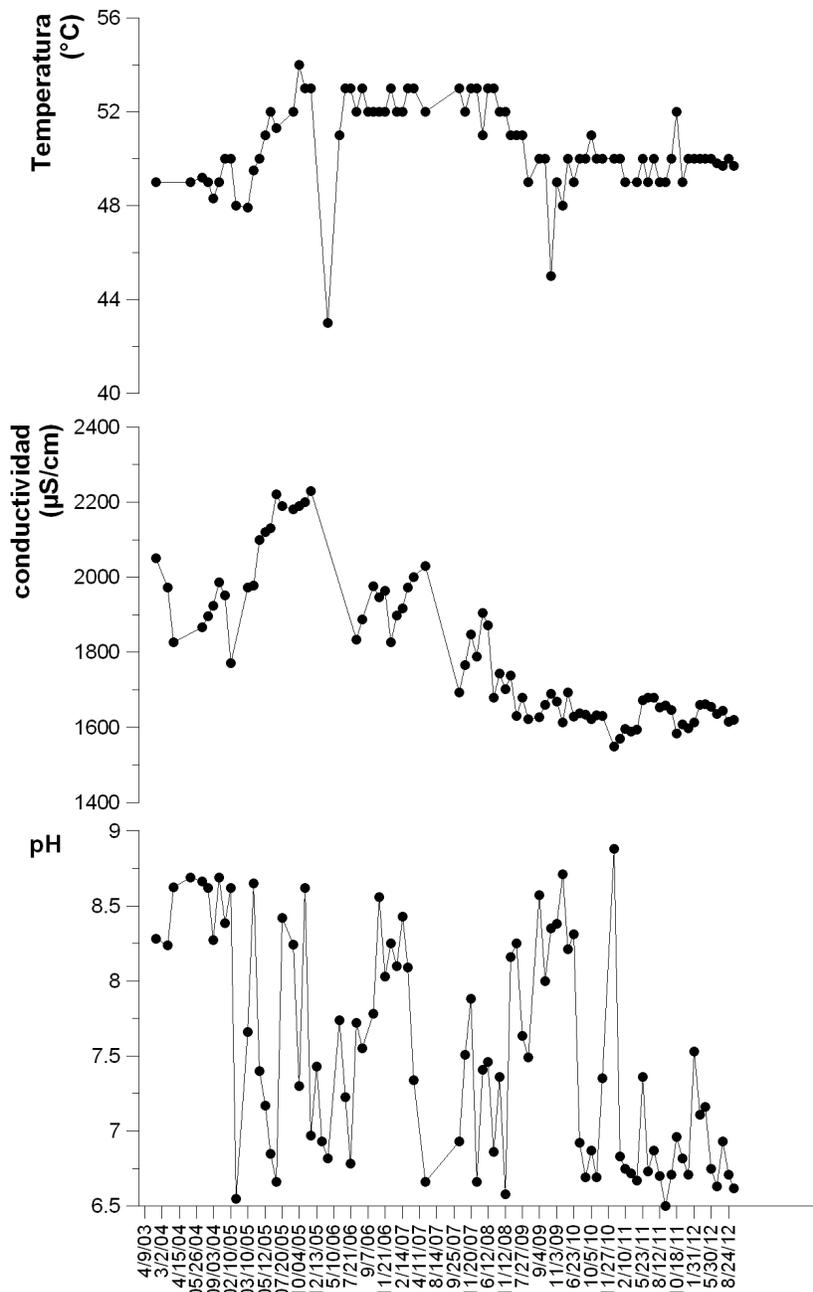


Figura 29. Series de tiempo de pH (acidez), conductividad eléctrica, y temperatura de las aguas del Río Tabacón, Volcán Arenal, periodo abril 2003-setiembre 2012.

IV_5 V.Arenal: Otras observaciones

La señora Laura Aguilar (funcionaria del Parque Nacional Volcán Arenal) reportó caída de rocas debida al terremoto de Nicoya, lo que generó un estruendo importante especialmente en el lado norte, confirmado por la señora Karen Peñaranda (Hotel Los Guayabos). Visita al campo el 6 de setiembre confirmó la presencia de nuevos depósitos de material caído desde el borde del cráter hasta un poco más allá de la mitad del edificio,

particularmente al lado norte del volcán (Fig.30). La acumulación caótica de materiales en la parte superior de fuerte pendiente del edificio volcánico es particularmente inestable y es el origen de las rocas caídas por las vibraciones del terreno debidas al terremoto. En general, no se observan cambios en la actividad volcánica.



Figura 30: Comparaciones entre mayo-junio del 2012 y el 6 de setiembre del 2012 del lado norte y noroeste del volcán Arenal (Fotos: Cyril.Muller y G.Avard). Abajo: Arenal, flanco norte el 8 de setiembre del 2012 (Foto: Jorge Barquero Hernández).

V_ Volcán Rincón de la Vieja

El lago cratérico ultraácido del Rincón de la Vieja se encontró con mayores temperaturas y mayor nivel de agua, sin embargo el sismo de Nicoya no indujo actividad sísmico-volcánica, tampoco actividad freática o convectiva notable en el lago. Las solfataras en el lado norte del edificio volcánico no presentan cambios de temperatura.

V_1 V.Rincón de la Vieja: Sismología

Debido a la cercanía de las réplicas del sismo de Nicoya, los sismos locales asociados o no a los sistemas de falla del volcán Rincón de la Vieja, y la lejanía de la estación de vigilancia del Rincón de la Vieja del cráter activo, resulta muy difícil encontrar en los registros los sismos volcánicos de baja amplitud, por lo que es posible que no se hayan podido contabilizar estos eventos adecuadamente luego del sismo de Nicoya. Sin embargo, sismos LP de gran amplitud o erupciones freáticas no se presentaron durante los días posteriores al sismo de Nicoya. Por otra parte, los sismos volcano-tectónicos se incrementaron a partir del sismo de Nicoya, pero su número resulta mucho menor a períodos de enjambres registrados en el 2011 y los registrados en Irazú y Poás después del 5 de setiembre (Fig.31).

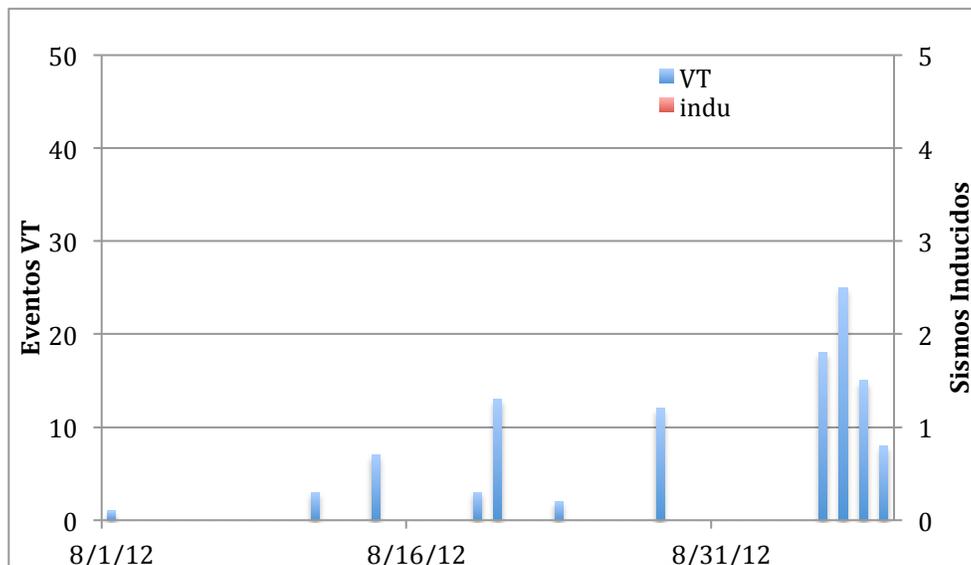


Figura 31: Número de sismo volcano-tectónicos (VT) registrados en el volcán Rincón de la Vieja entre el 1 de agosto y el 8 de setiembre.

V_2 V.Rincón de la Vieja: Deformación

Durante setiembre de 2012 no hay datos nuevos de deformación para el volcán Rincón de la Vieja.

V_3 V.Rincón de la Vieja: Geoquímica

No hay información nueva en geoquímica para el volcán Rincón de la Vieja.

V_4 V.Rincón de la Vieja: Otras observaciones

El 13 de setiembre del 2012, a pesar de la nubosidad imperante, no se observaron nuevos deslizamientos, colapsos de roca o aberturas en el suelo en la cara norte del volcán ni otras secuelas importantes luego del terremoto de Nicoya del 5 de setiembre, excepto por el cambio en la apariencia de las aguas de nacimiento en Quebrada Grande (toma Las Lilas, ca. 17 km al oeste del volcán Rincón de la Vieja) reportado por maestro de la Escuela Las Lilas. Suponemos que un derrumbe pequeño en el sector oeste del volcán pudo haber producido la turbidez de las aguas de Las Lilas quebrada. Tampoco se notaron cambios visibles en la actividad fumarólica subaérea y subacuática en la pared interna oeste del cráter activo y en el lago ultraácido. En los sitios que presentan solfataras en el sector norte del volcán y que se ubican aproximadamente 0.8km al norte del cráter principal (a 1250m de altura) (Fig.32), se han registrado por varios años temperaturas entre $< 60^{\circ}\text{C}$ y 90°C . Se midió en forma directa el 14 de marzo del 2012, 90.4°C y el 13 de setiembre, 86°C .

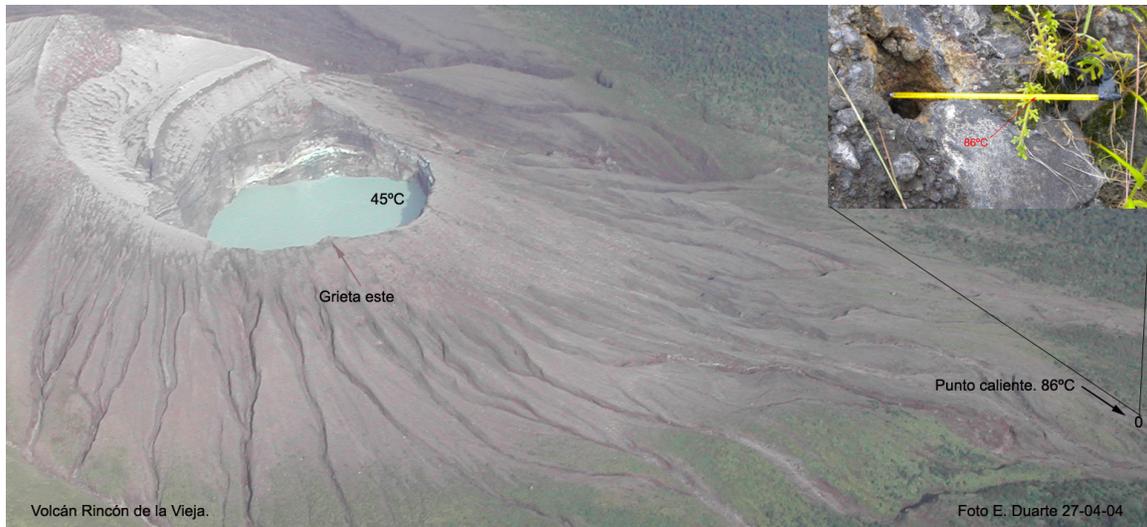


Figura 32: Vista aérea del volcán Rincón de la Vieja (foto del 2004) y ubicación al norte del área con solfataras (Fotos: E.Duarte, la foto insertada es del 13 set. 2012).

El 13 de setiembre del 2012 el lago ultrácido registró 45°C (en su borde norte) en comparación con $27-30^{\circ}\text{C}$ registrados el 13 de marzo del 2012, y tenía un nivel de agua muy alto con un color celeste lechoso.

Reconocimientos:

Se agradece a los funcionarios del Sistema Nacional de Áreas de Conservación 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
- Videos:
http://www.ovsicori.una.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=79

Bibliografía:

- 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.

**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>