

El monitoreo volcánico se realizó a través de la red sísmica nacional y de inspecciones directas. Los datos obtenidos, es decir, número de sismos, temperatura de fumarolas, acidez del agua, dimensiones de grietas y los resultados de pruebas de laboratorio se almacenaron en la Base de Datos de Monitoreo Volcánico, para su posterior interpretación (<http://www.snet.gob.sv>).

Por otro lado, se logró establecer e instrumentar dos redes geodésicas, para implementar el monitoreo de deformaciones en el volcán de San Salvador. Proyecto ejecutado con el apoyo de un estudiante de ingeniería civil de la Universidad Albert Einstein, quien elaboró su tesis de grado titulada “**Metodología para el Análisis de Deformaciones en los volcanes Activos de El Salvador**”.

Actividad del volcán de San Miguel

El rasgo sobresaliente de la actividad del Volcán de San Miguel, es la intensa microsismicidad, además de la actividad hidrotermal y fumarólica que lo caracteriza. Ver mapa de ubicación de estaciones de monitoreo sísmico en la figura 1.

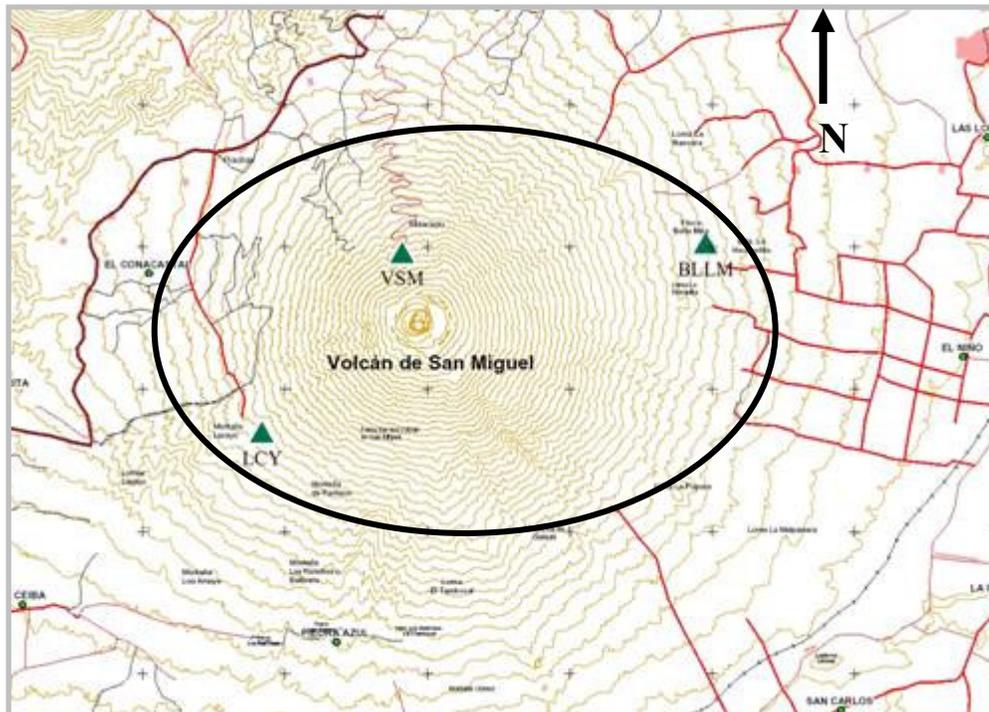


Figura 1. Triángulos verdes muestran los sitios de ubicación de las estaciones sísmicas: VSM, a una cota de 1,675 msnm, LCY, a 900 m de altitud y BLLM a 650 msnm.

Sismicidad

El monitoreo de la actividad sísmica del volcán se basa en el conteo y observación sistemática de las señales y en la medida de las amplitudes de las frecuencias (RSAM).

Para efectos de conteo de eventos y análisis de señales sísmicas se tomó como base la estación VSM por estar ubicada más cerca del cráter. En términos de conteo, en 2004 se registró un total de 85,857 microsismos, es decir un promedio de 7,154 temblores por mes, 230 por día. Total que resulta en 65,883 eventos menos que los registrados durante el año 2003. Ninguno de los temblores fue reportado como sentido por la población que vive entorno al volcán.

Enero, Abril y Octubre fueron los meses con mayor número de microsismos fluctuando entre 10,949 y 14,704 eventos por mes respectivamente. En otros meses, la microsismicidad osciló entre 4,632 y 9,437 eventos. Cabe indicar que Julio y Diciembre se presentaron problemas técnicos en la estación sísmica VSM, por ello, la microsismicidad fue de 1300 evento por mes, mas sin embargo, en ambos meses se registraron vibraciones (tremor) con paquete de microsismos de periodo largo (LP), ver figura 2 y 3. Con respecto a años anteriores, el número de microsismos del volcán en 2004 fue baja a moderada, similar al año 2002 (Figura 4). De hecho, la microsismicidad durante la primera mitad del mes de mayo de 2004 fue significativa (Figura 5). En la figura 6 se presenta el cruce de datos sísmicos con la precipitación. En la figura 7 aparece, la medida del tamaño de las amplitudes de la vibración en el área de la estación VSM.

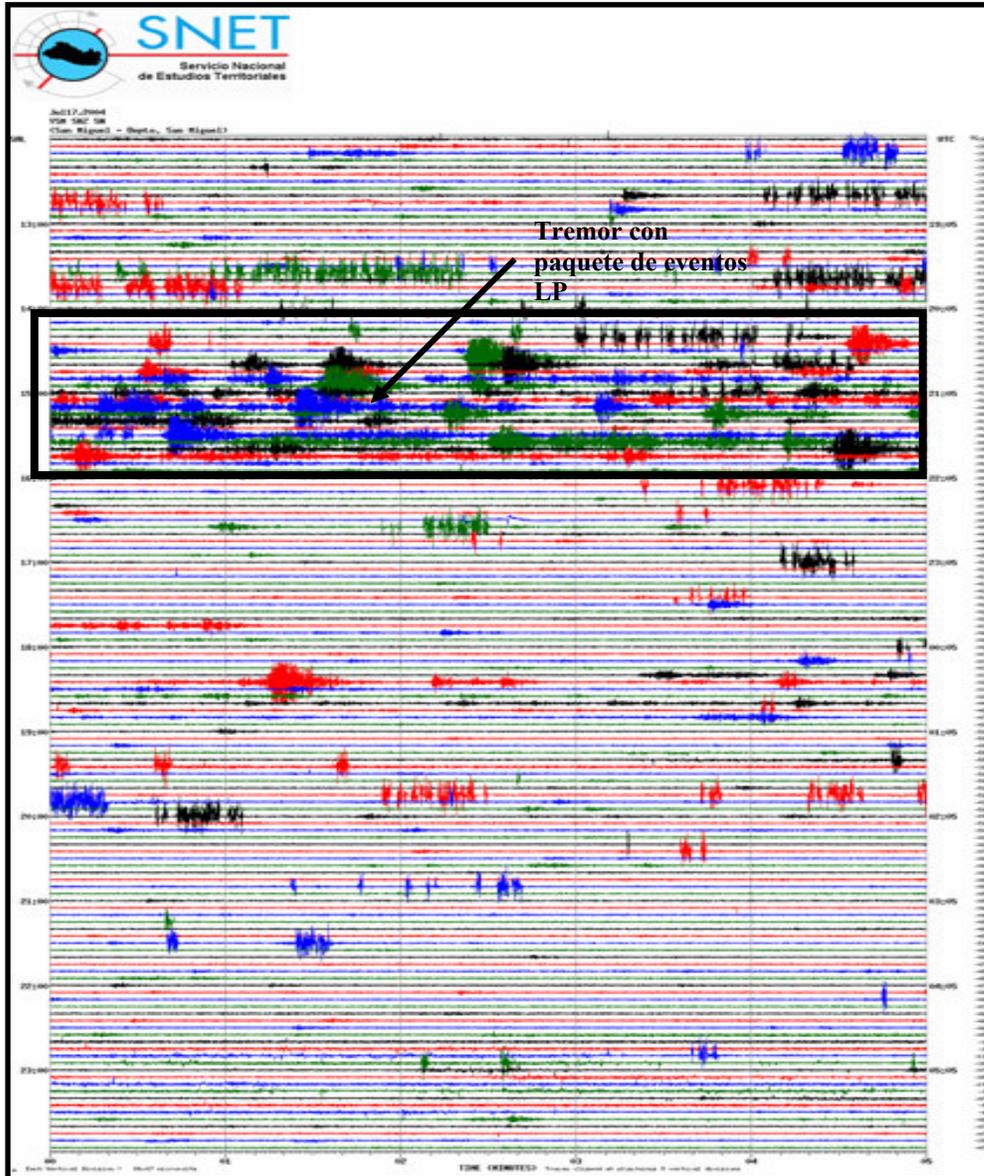


Figura 2. Sismograma del día 17 de julio con tremor y sismos volcánicos de baja frecuencia (5 y 6 hz).

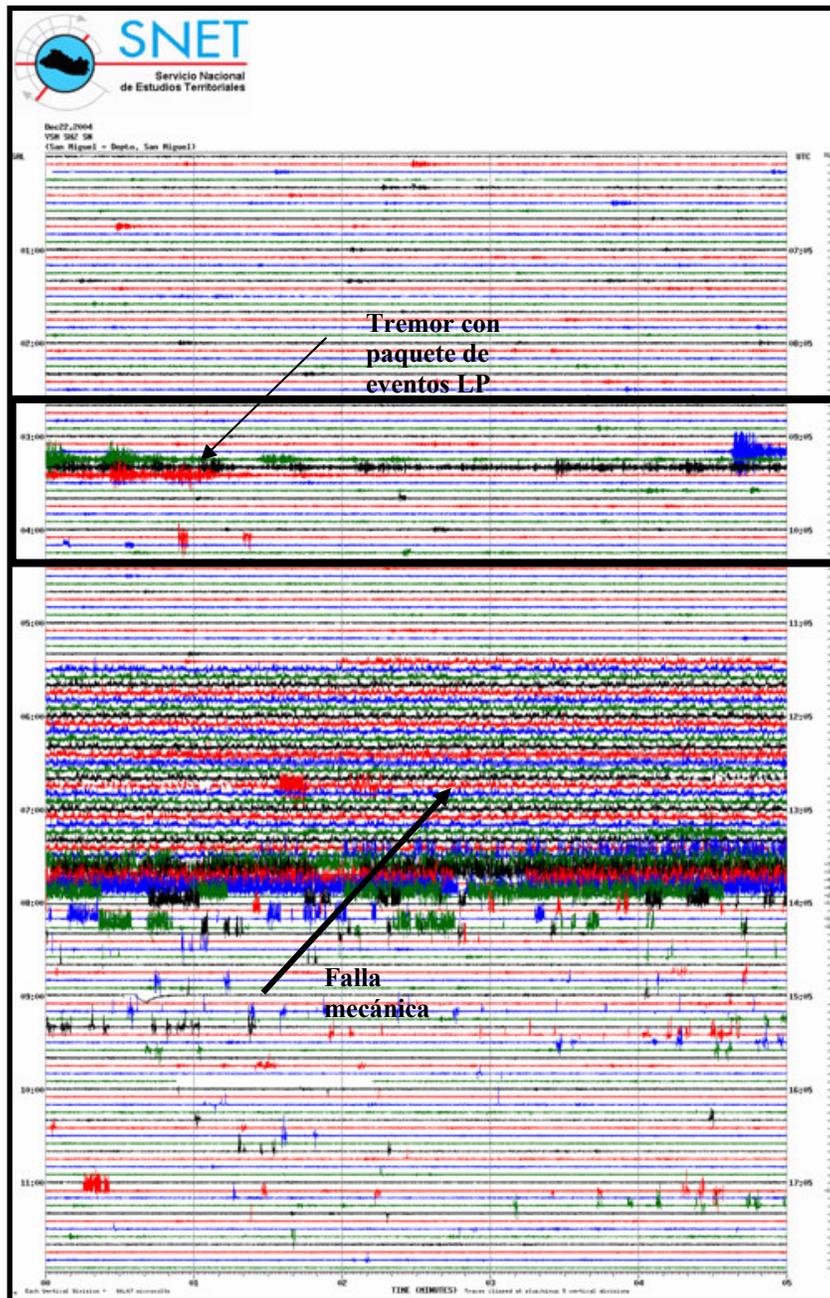


Figura 3. Sismograma del día 22 de diciembre con microsismos volcánicos de Periodo Largo (LP) y baja frecuencia (5 y 6 Hz).

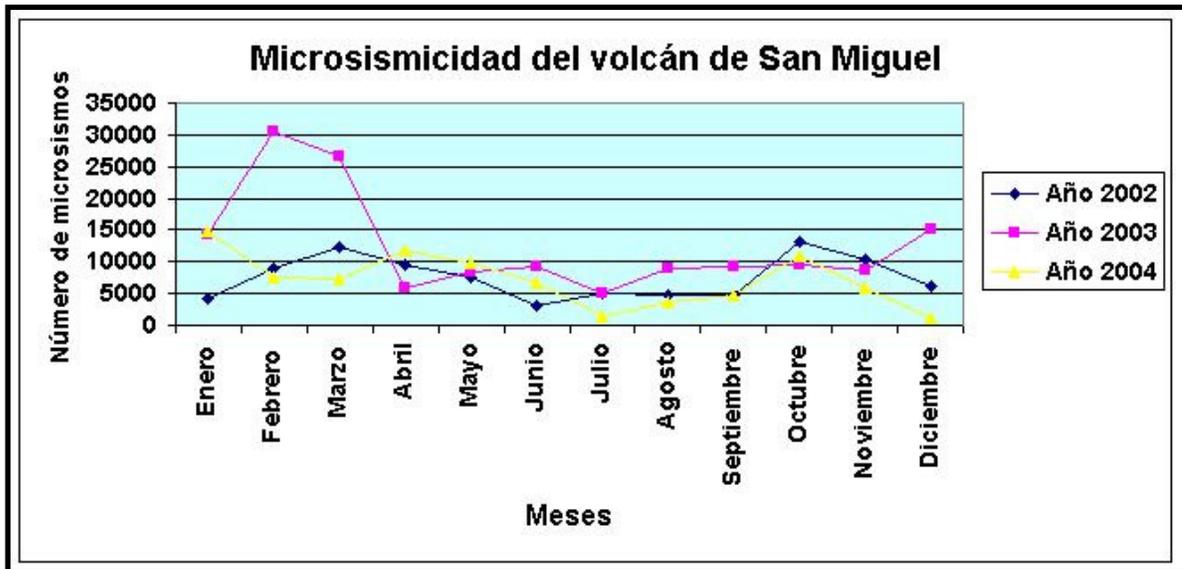


Figura 4. Comportamiento de la microsismicidad del volcán de San Miguel, por mes durante 2002, 2003 y 2004. Nótese la similitud del nivel de actividad símica volcánica para los años 2002 y 2004.

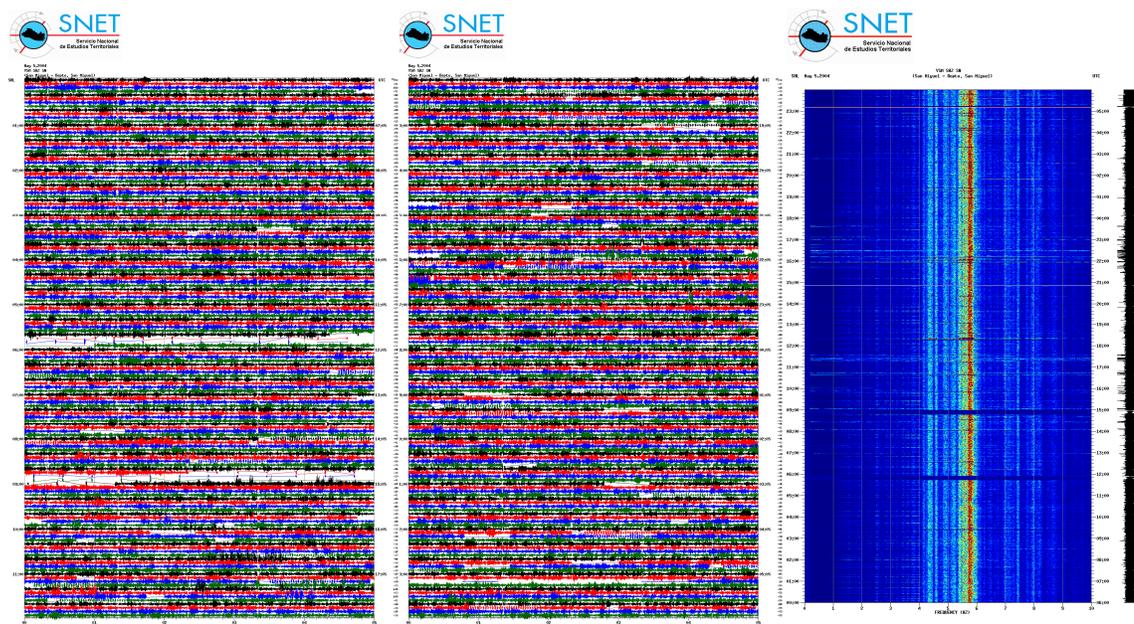


Figura 5. Sismogramas del 5 de mayo con tremor bandeado y eventos discretos. Este día el sistema RSAM registro amplitudes de hasta 160 cuentas. A la derecha el espectro que indica un rango de frecuencias dominantes entre 5 y 6 hz.

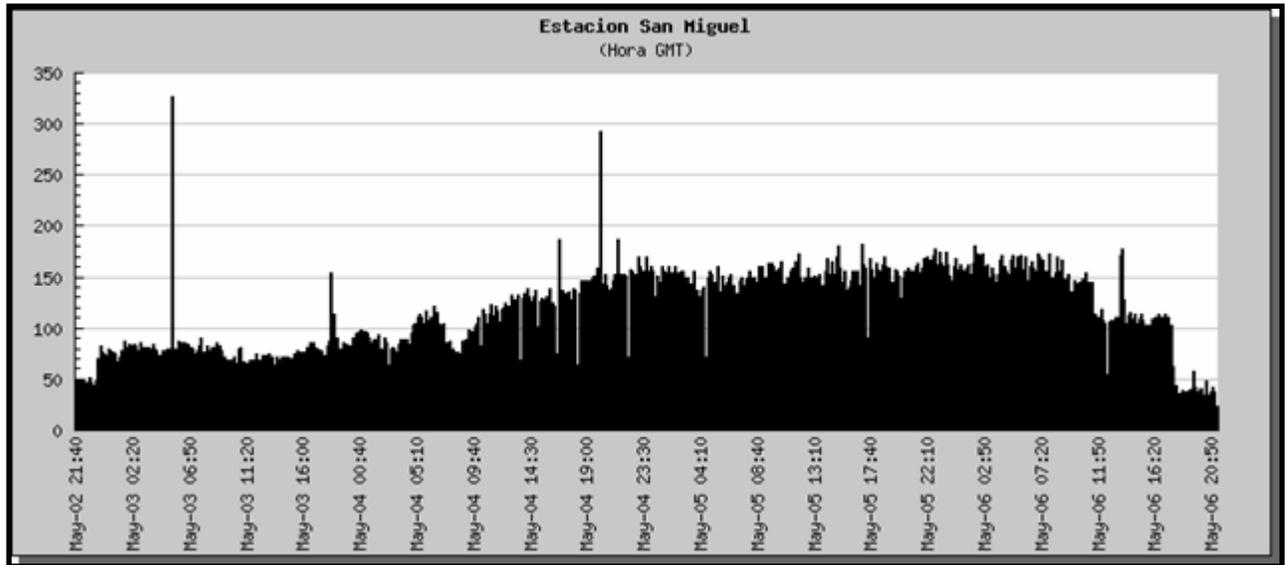


Figura 6. Se observa el nivel ascendente de amplitudes sísmicas a partir de las 23:20 GMT del 2 de mayo. Nótese que del 4 al 6 de mayo se alcanzaron niveles de vibración entre 130 y 160 cuentas RSAM.

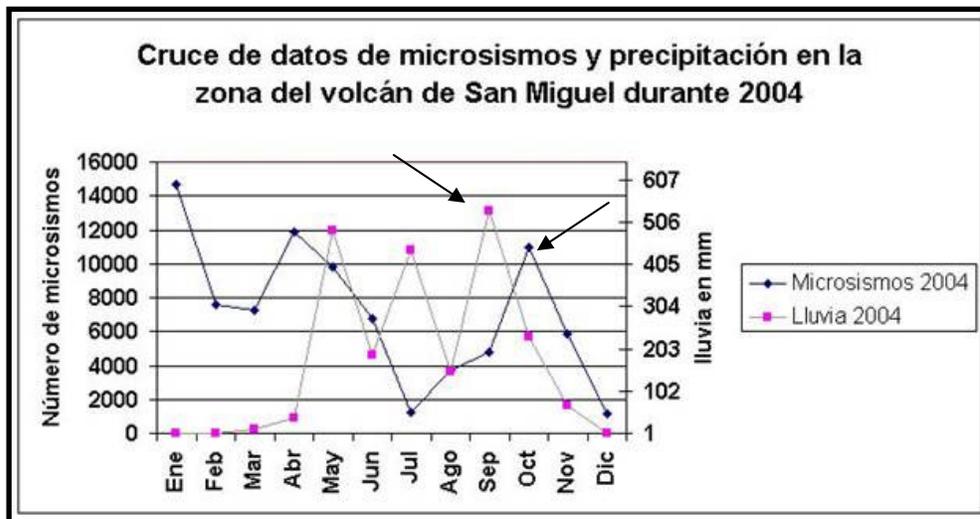


Figura 7. Se observa que la intensa lluvia de septiembre (Flecha) influye en el incremento de la microsismicidad en octubre, de manera que en noviembre al disminuir la lluvia también disminuye la microsismicidad.

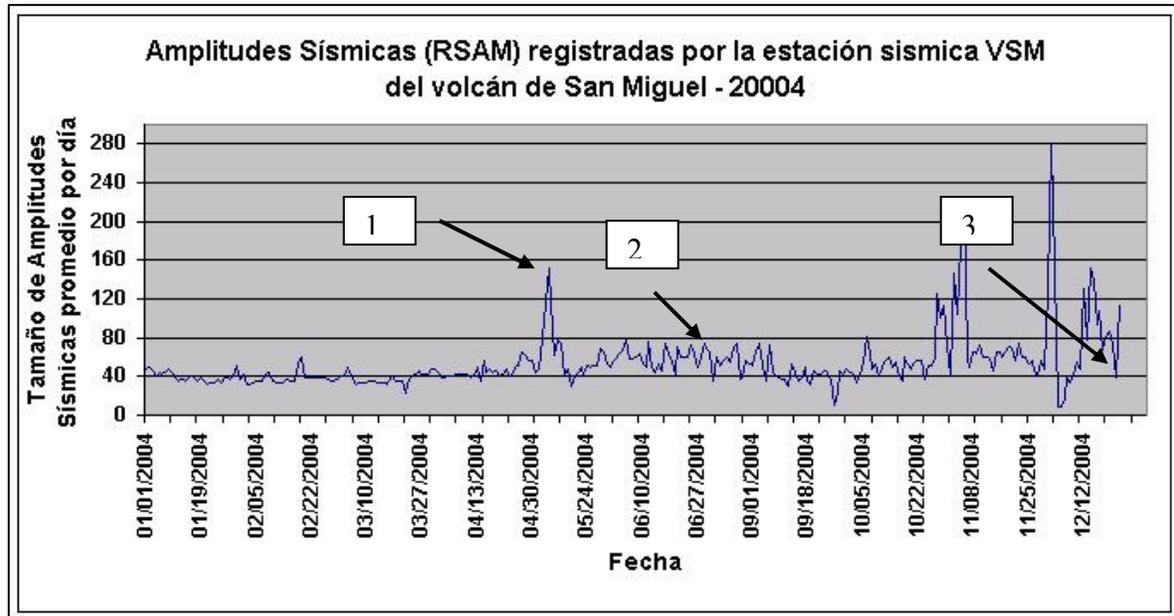


Figura 7. Presenta las amplitudes sísmicas del volcán durante el año 2004. La actividad relevante inició el 27 de abril, y el 05 de mayo (flecha 1) alcanzó una amplitud máxima de 160 cuentas RSAM. Aunque no lo muestra la figura, hubo horas críticas de hasta 210 cuentas. Por otro lado, el 17 de julio se registró un temblor durante dos con paquete de eventos volcánicos (LP), y alcanzó 65 cuentas (flecha 2), el 22 de diciembre otro temblor de 15 minutos de duración alcanza 39 cuentas (flecha 3). El nivel de vibración conocido del volcán de San Miguel fluctúa entre 20 y 40 cuentas. En la figura, a excepción de las crisis la mayoría de los picos arriba de 40 cuentas se asocian ya sea a eventos relacionados con la zona de subducción, fallas locales e interferencias meteorológicas y ruido ambiental entre otros. .

Cambios en el número de microsismos de Periodo Largo (LP) y la ocurrencia de temblor bandeado con paquete de eventos LP, se presentan a menudo y se ha documentado en los reportes de 2002 y 2003. En relación a eventos volcano-tectónicos (Tipo A), estos son escasos y aun no se han logrado localizar.

El hecho de que la estación VSM ubicada en la cima del volcán registra los temblores del volcán con mayor tamaño, indica que la fuente de origen de la microsismicidad de este volcán está localizada en la zona alta y a una profundidad desde su cráter, no mayor a 1 Km., lo cual es característico de actividad volcánica no asociada a procesos magmáticos profundos, si no mas bien a procesos de dinámica de fluidos hidrotermales someros.

Fumarolas y temperatura

Otro rasgo interesante de la actividad del volcán de San Miguel es la emanación continua de gases a través de las fumarolas del interior del cráter (Foto 1 y 2). Según lo que se ha

podido observar, la emanación de gases y vapores del volcán durante 2004, fue de baja intensidad y no se observó cambio en el régimen de emisión con la ocurrencia de sismos o lluvias.



Foto 1: Izquierda, estado del conducto y fumarolas en enero 2004. Derecha, situación observada en diciembre de 2004. Nótese en el centro, el pequeño embudo formado por la subsidencia de rocas

No se ha tomado temperatura de las fumarolas, debido al difícil acceso a los campos fumarólicos. Tampoco se realizaron mediciones de SO₂ con COSPEC. En general, a pesar de la microsismicidad anómala, registrada en mayo 2004, la actividad fumarólica fue muy débil comparado con años anteriores.

Derrumbes

Durante el año 2004 no se produjeron derrumbes de consideración, solo caídas de rocas hacia el interior del cráter. Tampoco se observaron cambios significativos en las mesetas oriental y occidental, aunque en ambas existen grietas semicirculares que muestran las zonas de debilidad. Las mediciones en la grieta de la meseta occidental no presentaron variaciones con respecto a medidas hechas meses y años anteriores.

Flujos de escombros

Durante los meses lluviosos (mayo–octubre), normalmente se incrementa la amenaza a producirse flujos de escombros, puntualmente por drenajes del sector Norte y Norponiente del volcán. La situación erosiva de las cárcavas en este sector (Foto 3 y 4bis) es intensa y aporta material suelto hacia los cauces, formando depósitos susceptibles a ser movilizados por las lluvias intensas del invierno.



Fotos 3 y 4. Áreas de intensa erosión, transporte y depositación de material en la zona alta del sector noroeste del cono volcánico. El material suelto y acumulado en los cauces es propenso a ser transportado por la lluvia hacia las partes bajas del volcán y con ello la formación de flujos de escombros

La cantidad e intensidad de lluvia es el factor que dispara flujos de escombros. Por ello también, se mide la cantidad de lluvia que cae (Figura 8). Una estación pluviométrica se instaló en el lugar de la estación sísmica VSM a 1,675 msnm. Debido a problemas técnicos, este pluviómetro no registró durante algunos meses del año. El sistema de alerta que acompaña al pluviómetro no se disparó en ninguna ocasión durante el invierno de 2004, lo que indica que no se superaron los 40 mm/hora del umbral de lluvia.

Los observadores del volcán no reportaron la ocurrencia de flujos de escombros, sin embargo, las obras físicas (muros de derivación y resumideros) de mitigación construidas en la quebrada La Arenera se rellenaron de material, las cuales posteriormente fueron evacuadas por la comunidad. Tampoco se tuvo reporte de situaciones anómalas propias del volcán por parte de los observadores locales a los que se consulta en el sector Norte y Norponiente del volcán.

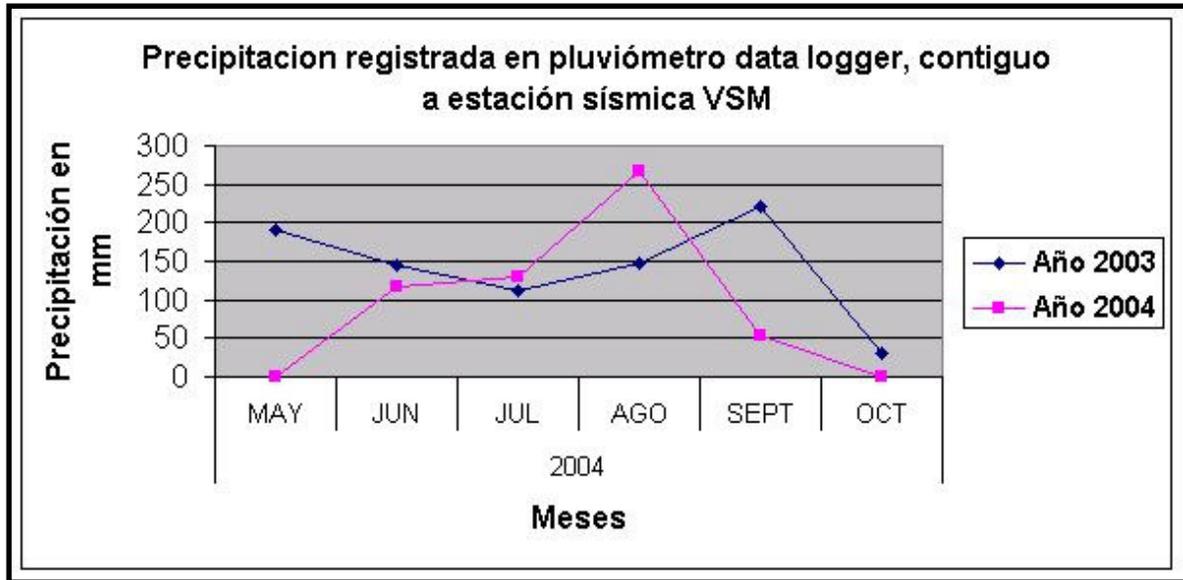


Figura 8. Datos de lluvia registrada en pluviómetro instalado en el flanco norte del volcán a 1675 m.s.n.m. Nótese que en 2003 se presentó problema de registros en octubre; mientras que en 2004, se tuvieron problemas en mayo, septiembre y octubre.

Discusión

Después del colapso de la pared oriental del cráter en agosto 2002, que obstruyó casi en un 95% el conducto central, se obstruyeron las fumarolas y disminuyó la emisión de gas. Es decir, ya no se forma el penacho de vapor de agua arriba del cráter en dirección suroeste del volcán. Asociado a la obstrucción del conducto, en octubre y noviembre de 2002 se presentó temblor sísmico con paquete de eventos volcánicos. En Junio 2003, durante 5 horas la sobre presión de vapor generó nuevamente temblor con paquete de eventos volcánicos.

Diez meses después, en mayo 2004 inicia un temblor bandeado con paquete de eventos discretos, el cual tuvo una duración de 84 horas, con tamaño de amplitudes sísmicas (RSAM) que en la fase intensa llegó a alcanzar 210 cuentas. Sin embargo, no se reportaron ruidos ni abertura de fracturas y no se observó aumento en la emisión de gases y tampoco olores fuertes a azufre.

Un aumento significativo en la presión interna causado por gases y vapor de agua, en adición a la subsidencia de rocas dentro del conducto central, puede ser una probable causa del origen del temblor bandeado que caracteriza al volcán de San Miguel. El hecho de no observar aumento en la presión de las fumarolas, fuerte olor a azufre o cambio en las dimensiones de la grieta bajo control, indicaron que el temblor, incluyendo los eventos

discretos volcano-tectónicos no fueron asociados con ascenso magmático. En realidad, después de la crisis de mayo, la microsismicidad del volcán volvió a lo normal, a excepción de los esporádicos eventos de tremor en julio y diciembre de 2004.

La intensa microsismicidad que usualmente precede al tremor es de periodo largo (LP), es decir eventos con frecuencias entre 4 y 6 hz. Ello sugiere además, la posible presencia de un incipiente sistema hidrotermal en la zona sumital del cráter. Lo anterior sugiere que con el tiempo poco a poco se acumula presión dentro del volcán, la cual periódicamente se libera haciendo vibrar la estructura volcánica.

Basados en el monitoreo realizado y las conversaciones con los pobladores cercanos al volcán, se concluye que en 2004, a excepción de la crisis de mayo, se concluye que la actividad del volcán fue moderada a baja. Más sin embargo, ante las circunstancias actuales de obstrucción del conducto, los gases y vapores sometidos a presión debido al taponamiento podría generar una erupción freática, al liberarse la presión de manera instantánea.

Actividad del Volcán de Santa Ana

Aparte del monitoreo con estaciones sísmicas telemétricas (Figura 1), la vigilancia del volcán de Santa Ana se ejecutó sistemáticamente a través de inspecciones mensuales durante los primeros cinco meses del año. A raíz del incremento de la microsismicidad y el reporte de daños por el efecto del aumento de gases, se realizaron inspecciones cada 15 días.

Durante el año se observó una serie de cambios en la emisión de gases y vapores, cambio de niveles del agua de la laguna y sutiles cambios en la química y acidez del agua.

De hecho lo relevante en la actividad del volcán fue el claro apareamiento de microsismos volcánicos a partir del mes de junio 2004.

Los gases volcánicos y las precipitaciones ácidas influenciadas por los vientos causaron quema parcial y daños a la vegetación en un área de 10 a 15 km² del flanco sur, suroeste del edificio volcánico. Los pobladores del Caserío San Blas ubicado al sur del volcán reportaron problemas respiratorios en las personas adultas y niños durante los últimos meses del año 2004. Al respecto, se planifico para inicios del 2005, implementar una serie de charlas y capacitaciones a los pobladores de la región para explicar el comportamiento del volcán, haciendo énfasis en los procesos de monitoreo que realiza el SNET y la necesidad de los pobladores de informarse permanentemente y prepararse en caso de un incremento repentino de la actividad del volcán.

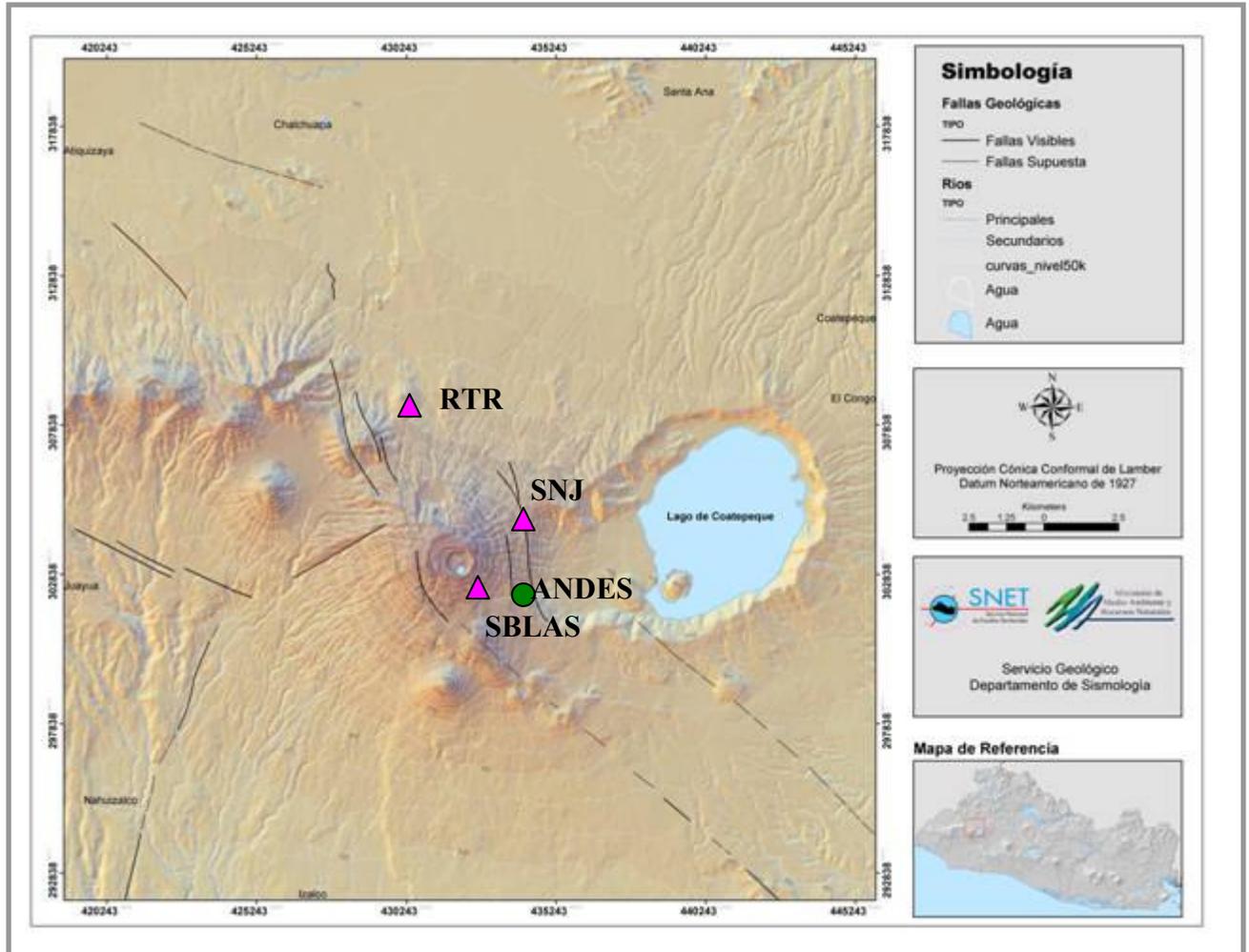


Figura 9. Triángulos rozados muestran los sitios de ubicación de las estaciones sísmicas de monitoreo: San Blas (SBLAS, a 1949 m de altitud), San José (SNJE, a 1694 m), Retiro (RTR, a 1499 m). Líneas negras continuas y punteadas representan al sistema de fallas que afectan al volcán. El círculo verde indica sitio de la estación meteorológica los Andes.

Actividad sísmica

Para fines de conteo y análisis de señales sísmicas del volcán, se tomó como base la estación sísmica SBLAS, por estar ubicada a 1 Km. del cráter. Como se observa en la figura 10 (flecha), la microsismicidad se incrementa notablemente a partir del 18 de junio. En total durante el año, se registraron 29,800 microsismos, haciendo un promedio de 4,257 eventos por mes, 142 por día. Ninguno de los eventos fue reportado como sentido por la población que vive entorno al volcán. Los meses más activos fueron julio, agosto y septiembre, con

un máximo 200 temblores volcánicos por día. A partir de octubre hasta diciembre se presenta claramente un ligero descenso en la microsismicidad

Con el afán de encontrar alguna correlación entre los parámetros físico-químicos, se presenta en la figura 10 datos de precipitación y microsismicidad del volcán durante el año 2004.

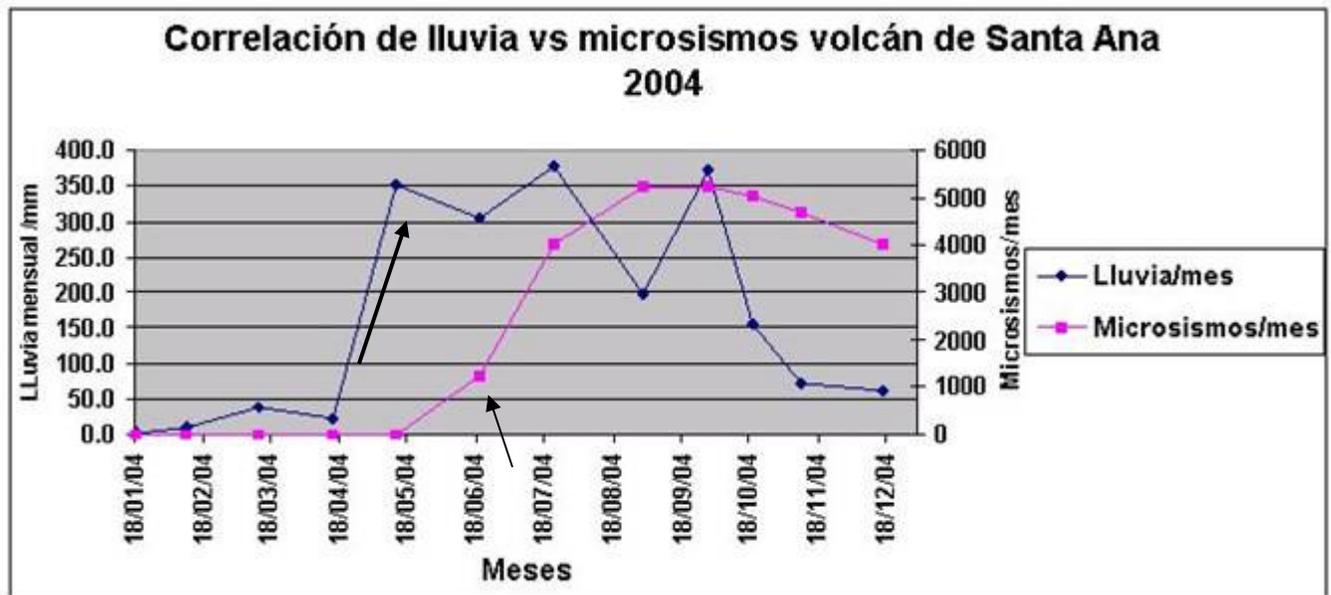


Figura 10. Datos de precipitación vs. Numero de sismos por mes. La flecha negra sugiere que las lluvias con más de 300 mm a partir de mayo, junio y julio disparan a partir de junio un significativo incremento de microsismos. Sin embargo, nótese que aunque en agosto la lluvia cae a 200 mm, durante los meses de agosto y septiembre la microsismicidad del volcán alcanza un máximo de 5000 eventos. A partir de octubre ambos parámetros tienden a caer.

Los datos de precipitación corresponden al registro de la estación meteorológica instalada en la finca los Andes, a unos 2 Km. al este de la estación sísmica SBL5.

La figura 11 presenta el número de sismos por día contra el promedio diario de la temperatura del agua de la laguna. En general durante 2004 la temperatura de la laguna fluctuó entre 21.8 ° C y 28 ° C. Toma de temperatura también se realizó en las fumarolas de vapor de agua de la meseta interna y fluctuaron entre 88.6 y 91.3 ° C.

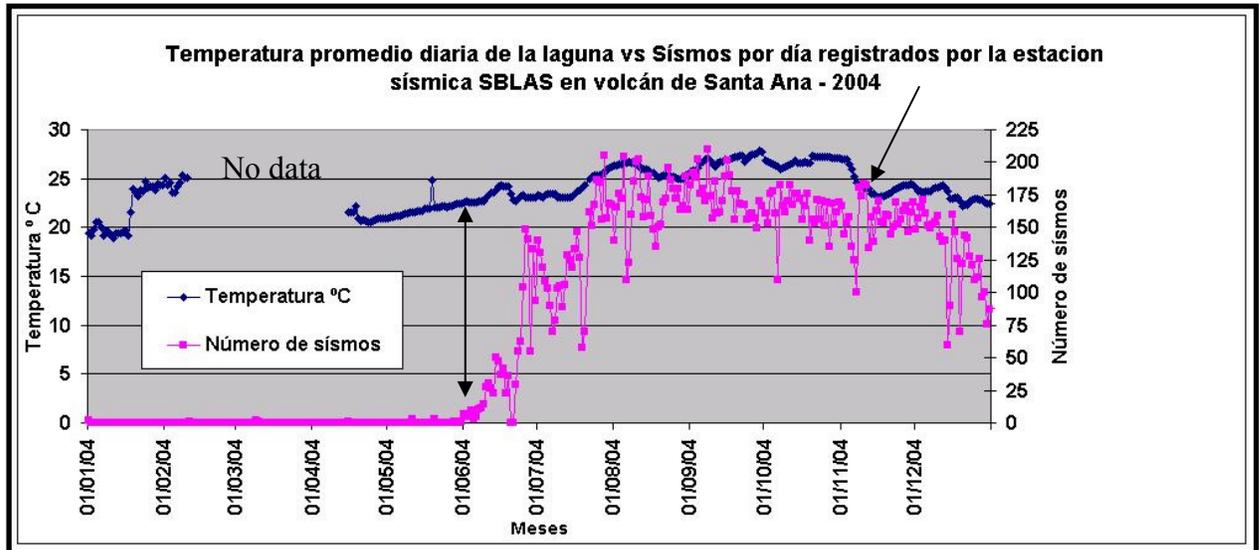


Figura 11. Cruce de datos de temperatura de la laguna vs. microsismos. Nótese que desde junio (flecha doble) ambos parámetros siguen una tendencia ascendente y luego en noviembre (Flecha), se observa claramente la caída tanto en el número de sísmos como de temperaturas.

La figura muestra a partir de junio un incremento en la temperatura de la laguna, que corresponde también al incremento de la sismicidad, lo que sugiere que existe cierta relación. Desde que se incrementa significativamente la microsismicidad en junio de 2004, además del conteo se inició la tarea de intentar caracterizar los eventos, proceso que aun continúa. La figura 12 presenta la medida de las amplitudes de la vibración sísmica (RSAM)

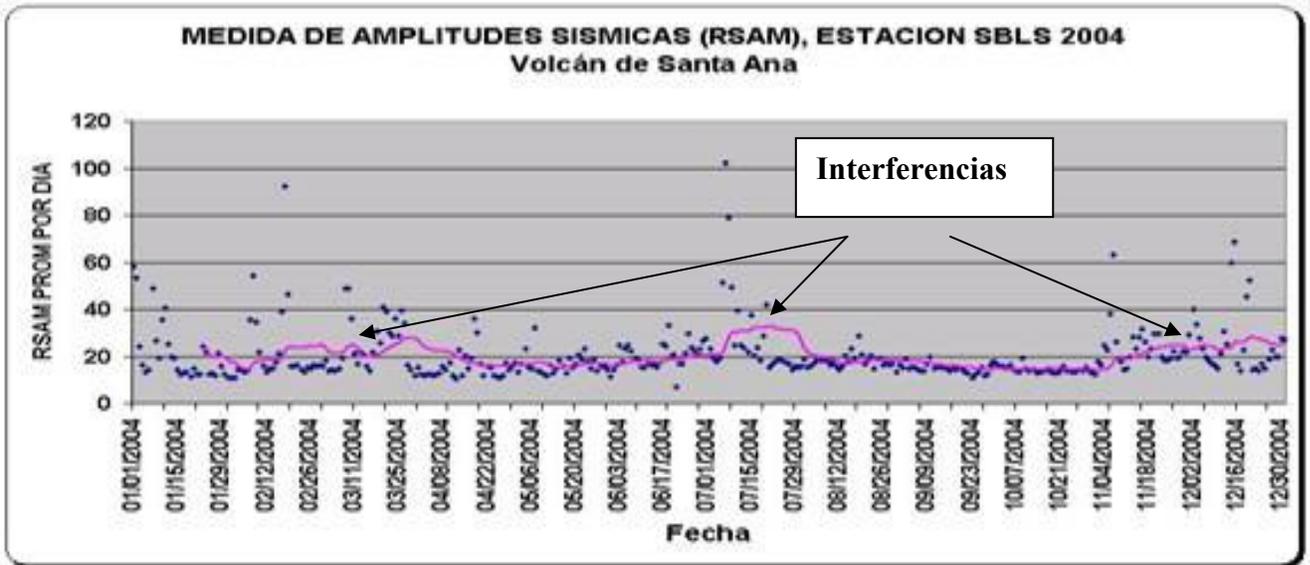
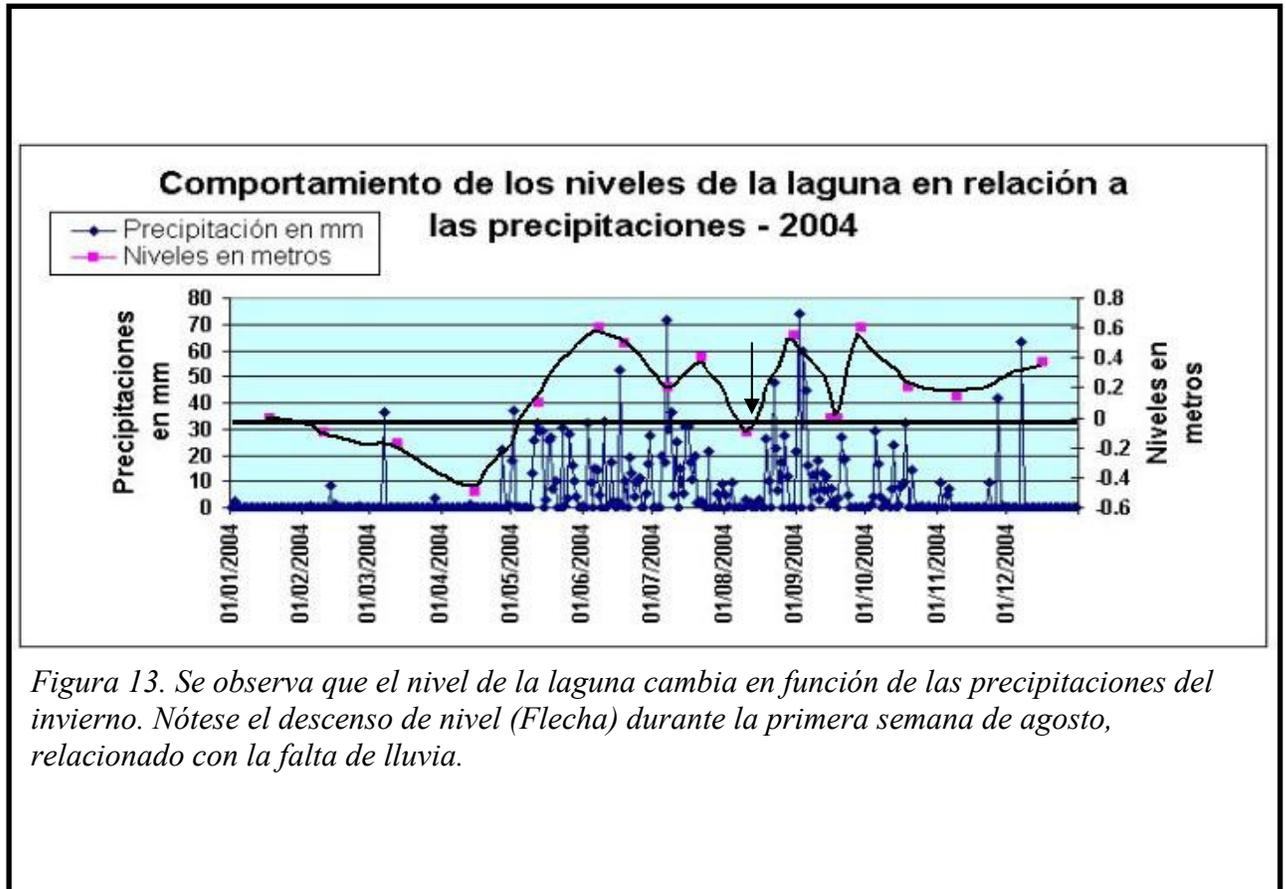


Figura 12. La línea morada indica la tendencia de las amplitudes de las señales sísmicas registradas por la estación SBL5. El promedio de las amplitudes se mantuvo ligeramente inferior a 20 cuentas y los picos corresponden ya sea a eventos relacionados con la zona de subducción, fallas locales e interferencias meteorológicas y ruido ambiental entre otros.

Las amplitudes con valores menores a 20 cuentas indican una vibración normal entorno al rea de la estación. Los picos arriba de 20 cuentas obedecen ya sea a amplitudes por temblores fuera de la zona del volcán y por interferencias de la señal. Por otro lado, en lo relativo a sismicidad relacionada con eventos asociados a fallas que afectan al volcán, lo cierto es que ocurren, son relativamente esporádicos y muy pequeños, difícil de ser localizados. Tampoco hubo reporte de eventos relacionados con el volcán sentidos por la población que vive en la zona.

Hidrogeoquímica

La toma de muestras de agua y los respectivos parámetros físicos-químicos como temperatura, acidez (pH) y niveles del agua de la laguna cratérica se realizó de forma continua y sistemática. La temperatura se tomo con un sensor digital instalado en el centro de la laguna. Los niveles del agua de la laguna fluctuaron en función del aporte de agua lluvia (Figura 13). Al final del año la laguna incremento 3.54 m de nivel. La figura 14 presenta la relación acidez vs. lluvia. La figura 15 presenta la relación Sulfato/Cloruro de las muestras de agua analizadas en el laboratorio y su cruce con la microsismicidad. La figura 16 presenta la relación Sulfato/Cloruro vs. lluvia.



La medida de los niveles de la laguna in-situ indican que del 18 de enero al 15 de abril el nivel del agua logró descender 77 cm. Con las intensas lluvias del 18 abril al 22 de julio, el nivel del agua incremento 1.80 m, y en la canícula del 22 julio al 11 de agosto descendió solamente 10 cm. Del 11 agosto al 16 de septiembre se registró un aumento de nivel de 2.61 m. Al final, después de sumar algebraicamente ascensos y descensos hasta el 16 de diciembre de 2004 la laguna aumento 3.54 m de nivel.

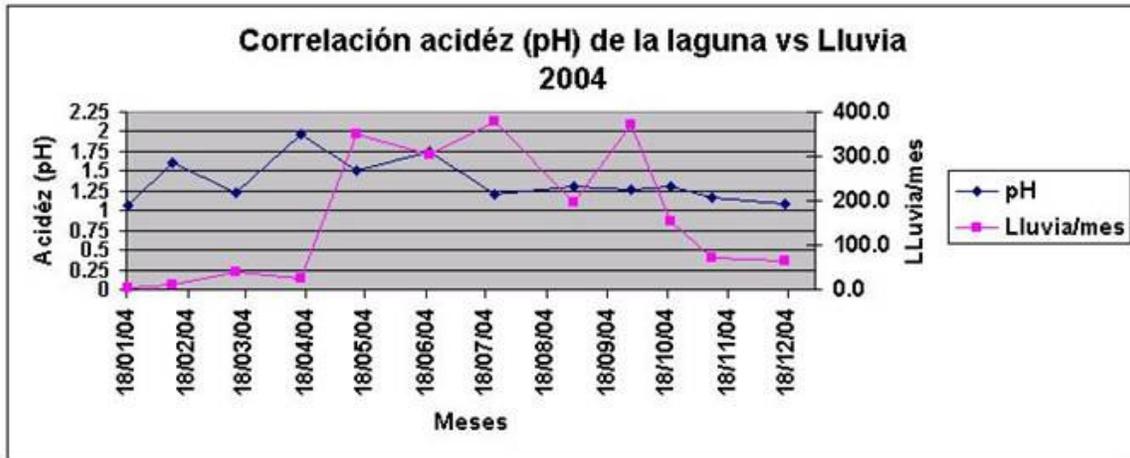


Figura 14. Comportamiento de la acidez del agua de la laguna ante la presencia del aporte de agua por las lluvias del invierno. Aunque no se aprecia gran influencia del agua lluvia en la acidez de la laguna, con la disminución de la lluvia, el agua de la laguna también disminuye ligeramente su acidez.

Los niveles de acidez de la laguna durante todo el año 2004 fluctuaron entre 0.8 y 1.8. Durante los meses de mayo, junio y julio y septiembre las intensas precipitaciones no causaron mayores variaciones en la acidez del agua. Sin embargo, de octubre a diciembre ante la disminución de las lluvias, el agua se tornó ligeramente más ácida alcanzando valores menores a 1.

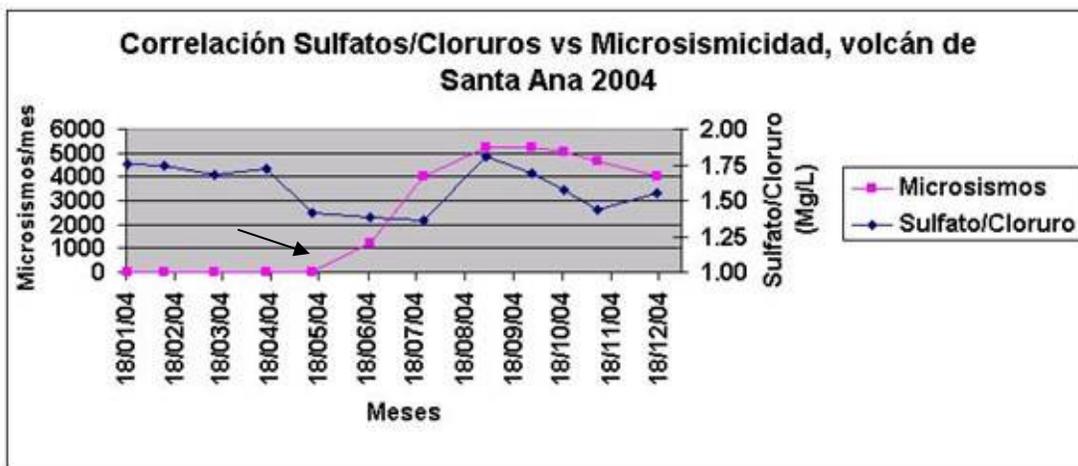


Figura 15. Se observa que a partir del 18 de mayo la microsismicidad tiende a incrementarse, mientras que la relación sulfato cloruro lo hace a partir del 18 de julio. Lo anterior sugiere dos cosas: la primera es que ambos parámetros fueron influenciados por las lluvias de la época, y la segunda, que la vibración sísmica tiene influencia en la relación Sulfato/Cloruro.

De acuerdo a la figura 15, del 18 de abril al 18 de julio la relación sulfato cloruro experimenta una caída repentina debajo de 1.5, en cambio se observa que a partir de junio la microsismicidad del volcán se incrementa significativamente. Nótese además que ambos parámetros alcanzan un nivel máximo entre el 18 de agosto y el 18 de septiembre y luego ambos muestran tendencia a caer, en congruencia con la disminución de las lluvias.

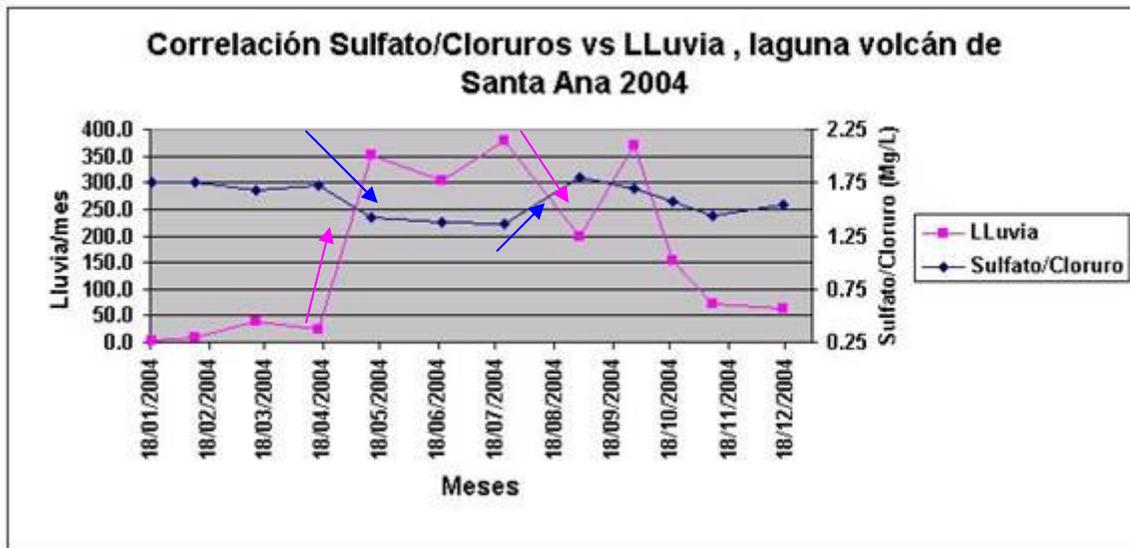


Figura 16. Relación Sulfatos/Cloruros correlacionado con la precipitación registrada en la estación meteorológica los Andes.

Según la figura 16, a partir del 18 de abril la precipitación da un salto importante, mientras que la relación sulfato cloruro cae (flechas) para mantenerse mas o menos así hasta el 18 de julio. Luego la relación se incrementa significativamente a finales de agosto, con la disminución de las lluvias. Nótese que en septiembre la lluvia aumenta, pero del 18 de octubre en adelante llueve poco, sin embargo, la relación sulfato cloruro se mantiene. En realidad puede ser que exista una relación inversa entre estos parámetros. Es decir, que ante el aumento de lluvia ocurra una disminución en la relación sulfato/cloruro.

Nótese además según la figura 16, que las primeras lluvias del año no ejercen mayor influencia en la relación Sulfato/ Cloruros. Pero durante los meses lluviosos, la relación Sulfato/Cloruro cae y asciende notablemente ante la disminución de las lluvias de agosto.

Sin embargo, la relación se mantiene ante el incremento de lluvias en septiembre y no varía significativamente ante la disminución de las lluvias con la entrada del verano. En realidad es complicado.

Monitoreo de emisión de SO₂ (COSPEC).

Periodicas mediciones de dióxido de azufre (SO₂) se han realizado en el volcán de Santa Ana desde 2001, con la colaboración de la Universidad Tecnológica de Michigan (USA) y el INSIVUMEH de Guatemala. De acuerdo a los resultados, la emisión de SO₂ alcanza niveles promedio cercanos a 800 t/d (Ver figura 17).

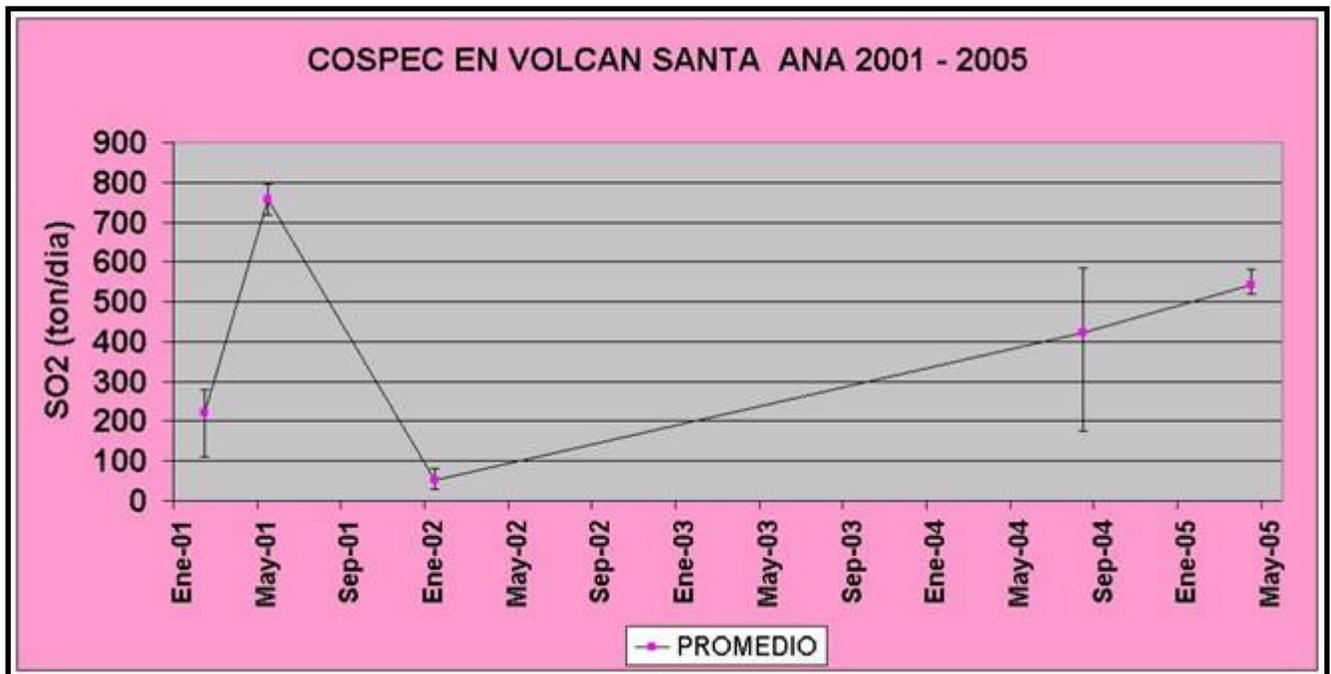


Figura 17. Datos promedios de mediciones con COSPEC de SO₂ desde 2001 a Abril 2005.

Tal como se observa en la figura 17, la emisión de SO₂ del volcán fluctúa entre 190 – y 750 t/día, es decir, un promedio aprox. de 500 t/d,

Monitoreo visual

Se realizó un total de 16 inspecciones al cráter y laguna del volcán. Se determinó que durante los primeros 5 meses del año, la emisión de gases por las fumarolas fue cambiante, es decir, débil en febrero y marzo, pero en enero, abril y mayo se observó intensa, con pulsos fuertes de vapor elevándose unos 300 m de altura. Aunque a finales de marzo, se observó desde Quezaltepeque una columna blanca de gas saliendo del volcán (Foto 5), durante la visita al cráter la emisión de gas estaba más fuerte y se escuchó ruido leve a turbina de avión jet. Se tuvieron reportes por residentes de San Blas de fuertes olores azufre.

En la laguna el cambio de nivel y color fue evidente (Foto 6 7), se observó burbujeo en diferentes áreas y la presencia de pequeñas cantidades de partículas blancas de azufre en suspensión. También durante los meses de mayor actividad se observaron pequeños derrumbes dentro del cráter. En el reporte mensual de mayo se alertó sobre posibles daños a las personas, al bosque y especies vegetales debido a los intensos gases y lluvia ácida que podía caer durante los meses siguientes.

En el contexto de lo anterior, incluyendo el parámetro sismicidad y datos químicos del agua, etc, hasta el 13 de mayo la situación del volcán se consideró normal y con características similares a las observadas en 2001, 2002 y 2003.

A partir de la inspección de rutina realizada el 08 de junio, donde además del aparecimiento de sismos LP (de periodo largo) y un aumento en el número de sismos VT, se observaron pequeños nuevos derrumbes y un aumento significativo de gases emitidos con pulsos fuertes formando una columna de aprox. 1000 m de altura (Foto 8), similar a lo observado en julio de 1992 y julio de 2000. Se percibió fuerte olor a azufre, se escuchó ruido moderado a turbina de avión y se observó bastante espuma blanca en la playa de la laguna (Foto 9). La temperatura del agua de la laguna había aumentado 2 grados centígrados con respecto a la visita del 13 de mayo.

En vista de lo anterior, de acuerdo a los procedimientos de emergencia, se entró a preaviso y se procedió a dar especial atención al volcán analizando los datos sísmicos y realizando visitas de monitoreo cada 15 días.

Julio, agosto y septiembre, fueron los meses en los que el volcán alcanzo niveles altos, tanto en el número de sismos, como de temperatura del agua de la laguna. Cabe mencionar que las fumarolas de la meseta interna no experimentaron cambios. Por otro lado, si bien es cierto que se detectaron pequeños cambios en la química del agua de la laguna, éstos no se consideraron significativos.

En lo que respecta a morfología, la pared erosionada de la corona del campo de fumarolas se observó más inestable (Fotos 10 y 11).

Finalmente, en diciembre, la microsismicidad del volcán mostró clara tendencia a disminuir, igual que la emisión de gases y la temperatura del agua de la laguna.

Sin embargo, se percibió fuerte olor a azufre, gases picantes y asfixiantes, también se escucho el ruido a turbina de avión jet. Además se observó más intensa la coloración. anaranjada amarillenta de la pared de las fumarolas, presencia de espuma blanca y burbujeo en la laguna (Fotos 12 y 13). Debido a la intensa actividad del volcán y los daños ocasionados por lluvia ácida se consideró necesario delimitar un área afectada y se procedió a impartir charlas informativas a la comunidad, en San Blas (Figura 18 y foto 14)



Foto 5. Pluma de gas del volcán de Santa Ana, vista desde Quezaltepeque (Por Favio Alvarado, 28/03/04)



Foto 6 y 7. Izquierda, estado de la laguna visto el 13 de marzo de 2004. Derecha, situación de la laguna observado el 09 de noviembre del mismo año. Nótese la obvia diferencia de nivel, tamaño y color por influencia de las lluvias del invierno.



Foto 8 y 9. Izquierda, columna de vapor color gris de aprox. 1000 m de altura del cráter. Derecha, espuma azufrada en la playa de la laguna Fotos del 8 y 19 de junio.



Foto 10 y 11. Izquierda pared erosiva vista el 13 de mayo 2004. Derecha, estado de la pared el 19 de octubre con apariencia de estar un poco más abierta.



Fotos 12 y 13. frente de pared fracturada de intenso color anaranjado y amarillenta. A la derecha, la laguna de color café verdosa. Al pie de las fumarolas se observa burbujeo y espuma blanca.

Area de Vegetación Afectada por Gases y Lluvia Acida. 2004-Enero 2005

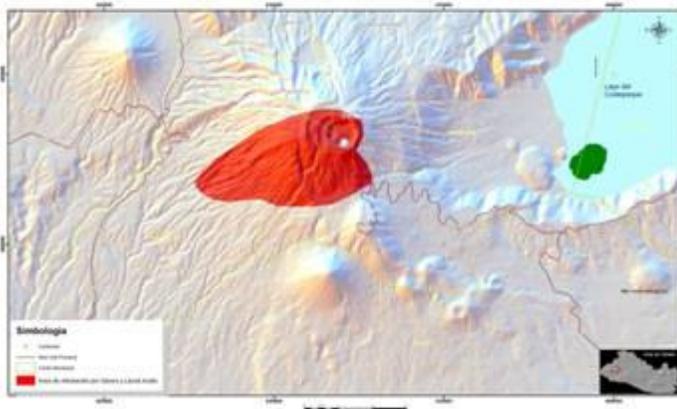


Figura 18 y foto 14. Izquierda en color rojo se muestra el área parcialmente afectada por gases y lluvia ácida. Derecha la vulcanóloga Dolores Ferrer impartiendo charla informativa de la actividad del volcán a pobladores de la Cooperativa de San Blas

Discusión

La actividad del volcán de Santa Ana, en el 2004, se caracterizó por una fuerte emisión de gases y vapores, que por el olor y color característico se habla de Dióxido de Azufre (SO₂), Ácido Sulphídrico (H₂S) y vapor de agua (H₂O). De hecho deben existir otros gases magmáticos como por ejemplo el Dióxido de Carbono (CO₂), Ácido Fluorhídrico (HF), Ácido Clorhídrico (HCL), etc.

La actividad se caracterizó además, por presentar pequeños cambios físicos químicos en la laguna, tales como: cambio en los sulfatos, cloruros, nivel del agua, color y acidez (pH).

Uno de los cambios mas interesantes que experimentó el volcán, fue el aparecimiento de microsismos volcánicos de baja frecuencia, que poco a poco se incrementó en número hasta alcanzar un máximo de 5000 eventos durante los meses de julio, agosto y septiembre.

En lo que respecta al monitoreo geoquímico, es decir, el control de los parámetros dióxido de carbono, dióxido de azufre, acidez, sulfatos, cloruros, temperatura del agua y fumarolas, etc, no se observaron mayores cambios.

La evidencia de campo y la interpretación de los datos del monitoreo, incluyendo el sísmico sugiere que la posible causa del aumento de actividad del volcán correspondiente con el aumento en la emisión de gases y vapor de agua sometidos a presión se debe a la obstrucción de grietas y fumarolas.

De acuerdo a lo anterior, se concluye que a finales del año, el volcán disminuye su actividad, posiblemente por la abertura de grietas y fumarolas a través de las cuales los fluidos hidrotermales logran escapar con mayor facilidad. Ya que por el momento la intranquilidad del volcán no puede relacionarse a una intrusión magmática. .

Comportamiento del Volcán de San Salvador

El volcán de San Salvador (Ver figura 19) mantuvo sus niveles normales de actividad sísmica y fumarólica. Presentó baja emisión de gases a través de las fumarolas existentes en el Cerro La Hoya, cono adventicio ubicado a unos 2 Km. de Santa Tecla, en la ladera sur del Volcán.

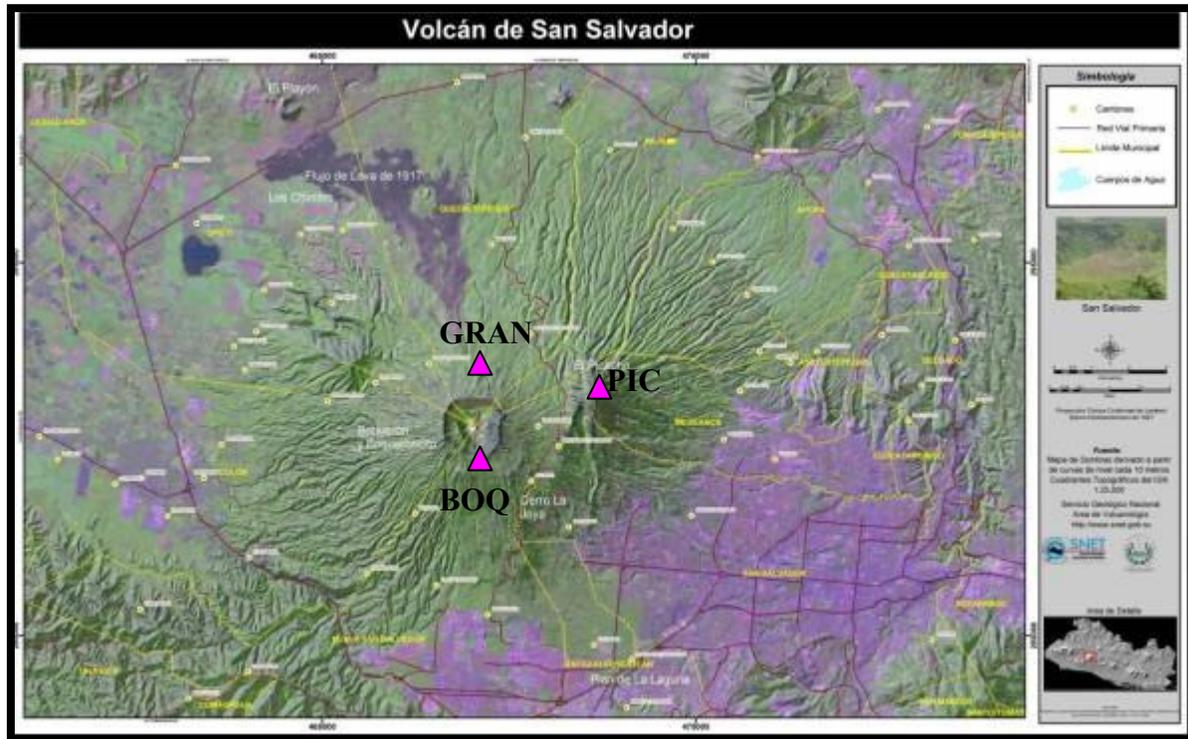


Figura 19. Modelo de Elevación Digital y Mapa del Volcán de San Salvador. Los triángulos rozados indican nombre y ubicación de estaciones sísmicas. En morado las ciudades alrededor del volcán, entre ellas al sur, sureste, San Salvador y Nueva San Salvador.

El volcán se vigila con tres estaciones sísmicas y por medio del muestreo de agua de una fuente de agua ubicada en El Jabalí y de los pozos de ANDA del Plantel Universitario y Pasaje Verde. También se realizaron inspecciones visuales periódicas al cráter del Boquerón.

Sismicidad

La sismicidad del volcán de San Salvador tuvo un comportamiento bastante similar a años anteriores, es decir, una media de 4-10 temblores volcano-tectónicos al mes (Ver figura 20).

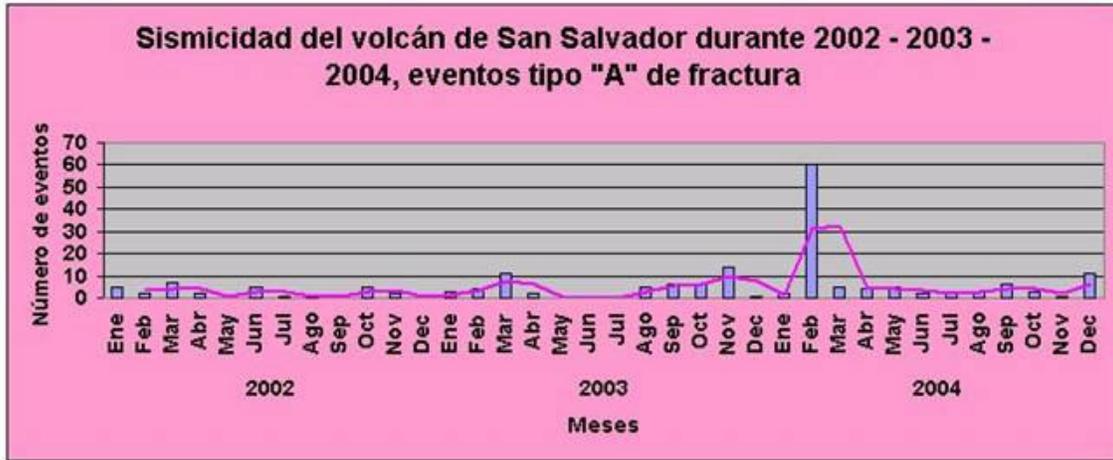


Figura 20. Comportamiento sísmico del volcán de San Salvador. Presenta un comportamiento sísmico que en general y en promedio, no supera los 10 eventos por mes. Nótese el incremento de eventos en febrero 2004, debido al enjambre de temblores con epicentros a unos 8 Km. del cráter, en el flanco sureste.

Cabe destacar la ocurrencia de un enjambre de aproximadamente 60 temblores (<http://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/sisextra2004.html>), la mayoría localizados en el flanco sureste del volcán del 16 al 24 de febrero de 2004 (Ver Figura 21). Todos los eventos fueron relacionados a fractura de rocas y a pequeños movimientos de cizalla en las fallas geológicas que atraviesan al edificio volcánico.

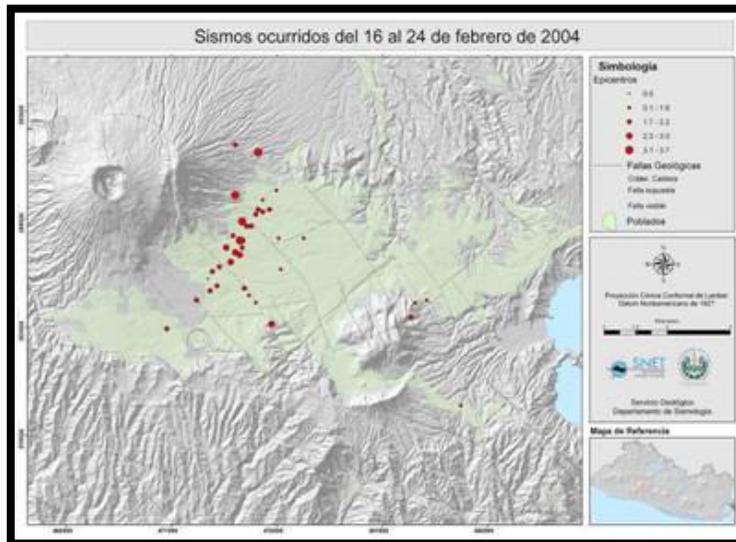


Figura 21. Círculos rojos indican los epicentros de los temblores clasificados como Volcano - Tectónicos (VT) por su relación con las fallas geológicas que afectan al volcán.

La energía liberada se reflejan en la figura del RSAM, la cual muestra el promedio de la amplitud de la señal sísmica por día (Ver figura 22).



Figura 22. Se observa que el promedio de las Amplitudes Sísmicas es de 25 cuentas RSAM. La mayoría de los picos arriba de 25 RSAM corresponden a interferencias, a excepción (ver flecha) de los picos asociados al enjambre de temblores del mes de febrero.

Aparte de los eventos volcano-tectónicos típicos del volcán de San Salvador, también se registraron otro tipo de sismos con características diferentes, que posiblemente obedecieron a presión de vapor de agua. Se parte de la premisa de que el agua que se infiltra hace contacto con rocas todavía calientes de la erupción de 1917. Eventos de esta clase no se habían observado antes y ocurrieron en número aproximadamente de 51 señales en noviembre (ver figuras 23 y 24).

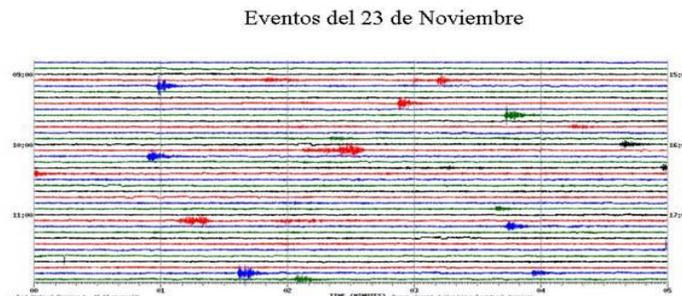


Figura 23. Posibles eventos volcánicos relacionados a presión

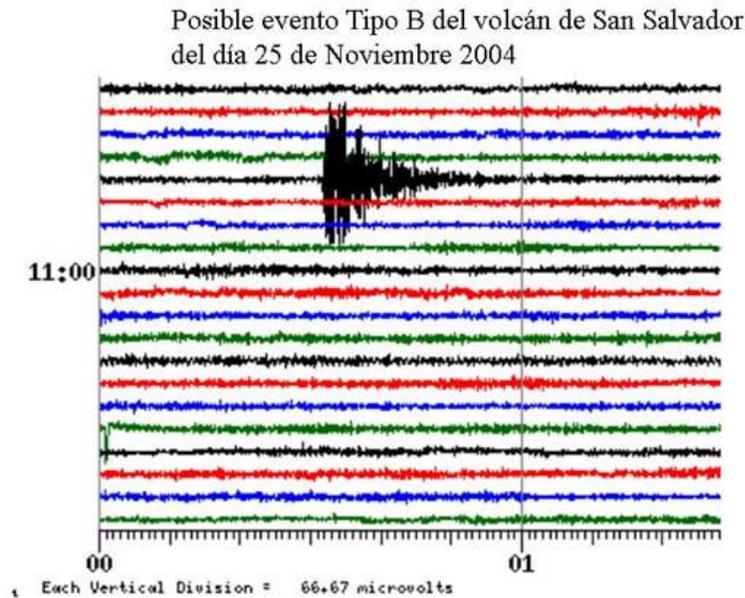


Figura 24. Evento del volcán relacionado a colapso de rocas de techo de conducto

Gases difusos

El monitoreo de la degasificación difusa (flujo de CO₂) en modo continuo, es realizado por el Grupo de Investigación Vulcanológica de la UES. Los resultados de este monitoreo han permitido tener una línea base preliminar de emisión de gases difusos en el área del Cerro la Hoya. Las emisiones de CO₂, no superaron los 14,000 gr. /m² /día (Figura 25), lo cual de acuerdo al grupo UES, son valores similares a los medidos en años anteriores.

La temperatura en las fumarolas del Cerro La Hoya tomadas con termocupla manual resultaron en promedio de 75.9°C. La temperatura del suelo medida en forma continua por la estación de monitoreo geoquímica resulto de en promedio entre 68 y 69 °C.

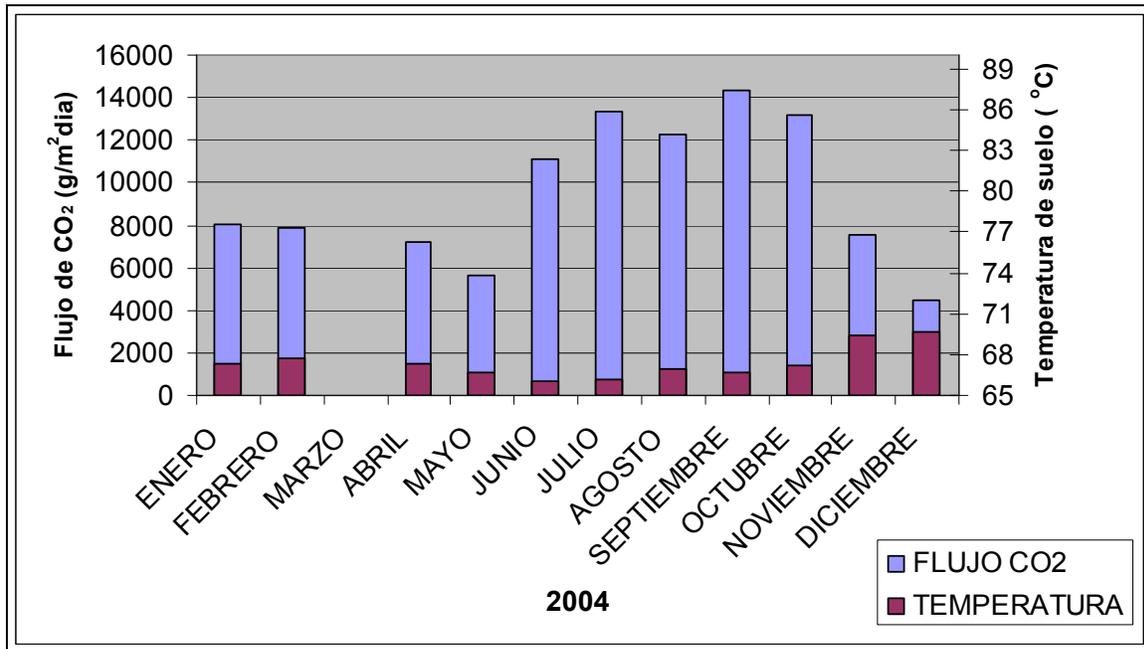


Figura 25. Comparación temporal entre los promedios mensuales de la temperatura de suelo y la degasificación difusa de Flujo de CO₂ medidos durante el año 2004 (UES, 2004).

Hidrogeoquímica

La toma de muestras de agua y los respectivos parámetros físicos-químicos se realizó de forma continua y sistemática. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas del SNET donde se obtuvieron los parámetros de pH, calcio, magnesio, cloro y sulfatos, además de la dureza.

La temperatura se tomó in-situ en cada pozo (Figura 6) Las figuras siguientes de la 3 a la 8 presentan los resultados de los análisis analizados en el laboratorio.

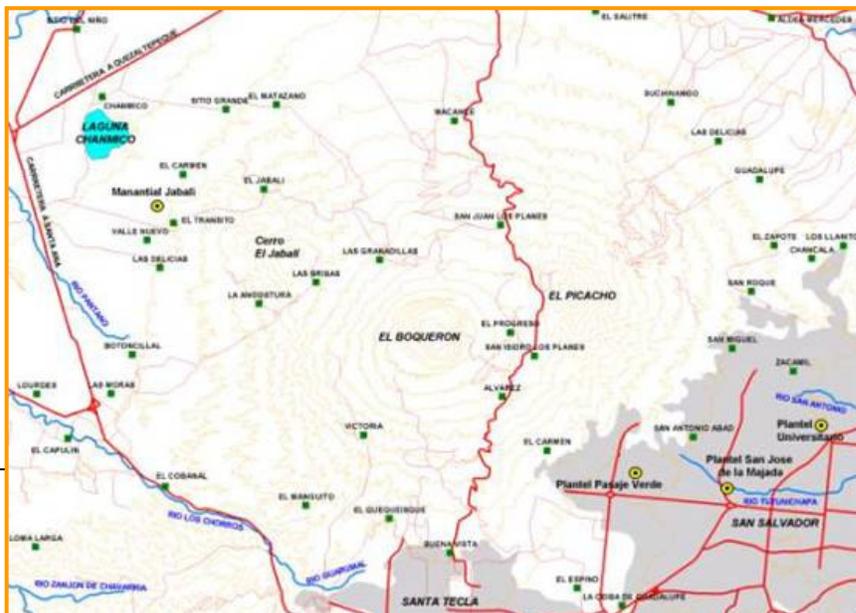


Figura 26. Mapa del volcán que ubica los sitios de muestreo de agua para los respectivos análisis químicos. El muestreo del pozo del Pasaje Verde fue interrumpido por problemas técnicos y de abastecimiento.

Resultados de los análisis químicos

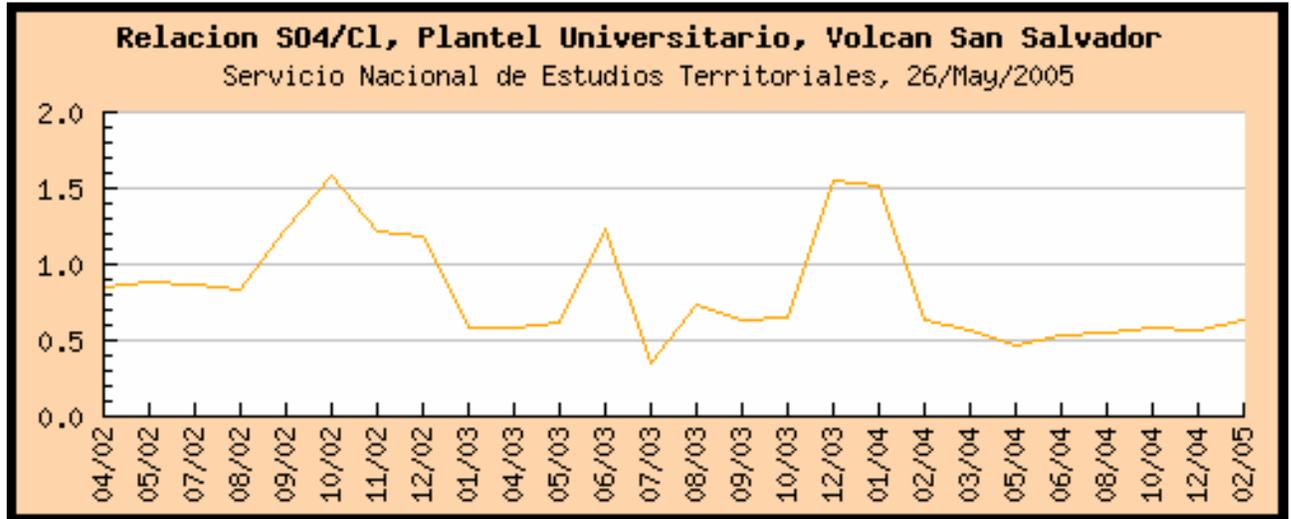


Figura 27. En años anteriores la relación Sulfato vs. Cloruros fluctúa entre 0.5 y 1.5, sin embargo, durante 2004 se mantuvo estable alrededor de 0.5.

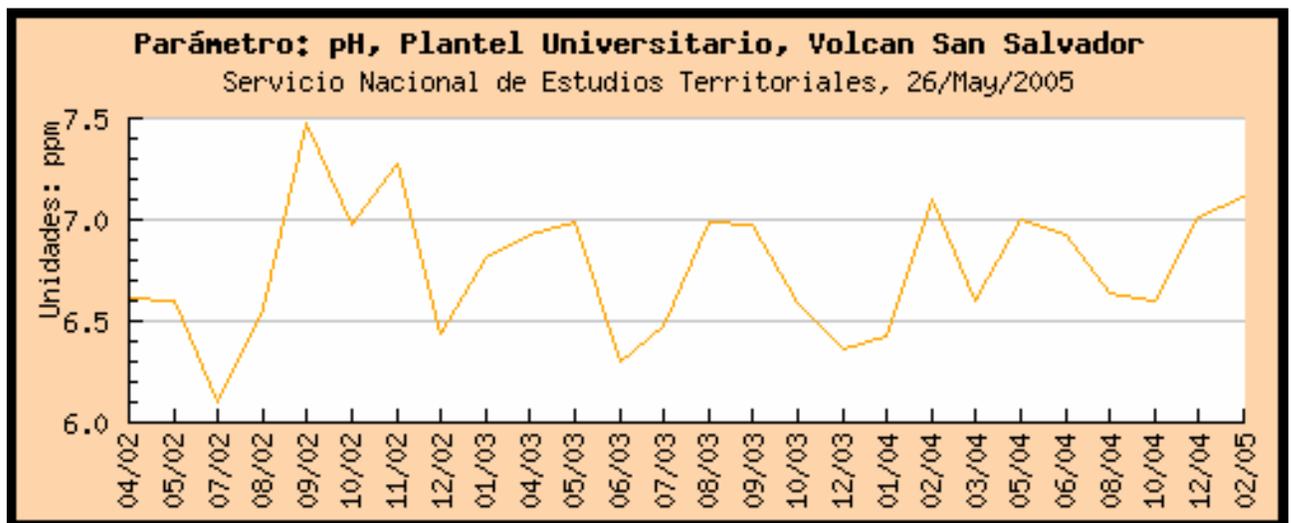


Figura 28. pH del agua del Pozo Plantel Universitario, fluctúa entre 6.5 y 7.

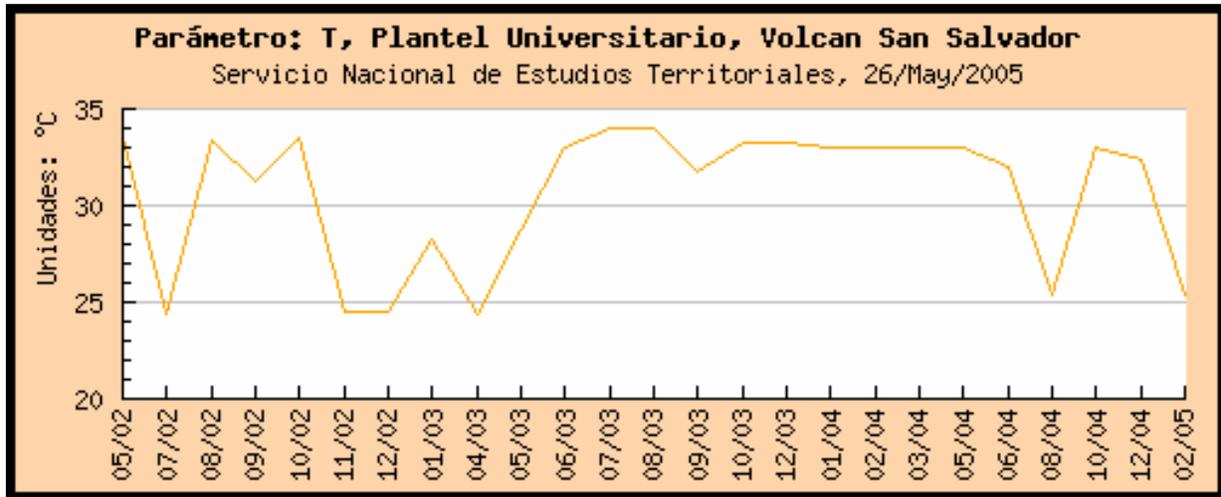


Figura 29. Se observa que la temperatura del agua del Pozo Plantel Universitaria fluctúa con el tiempo entre 24.9 y 34 °C

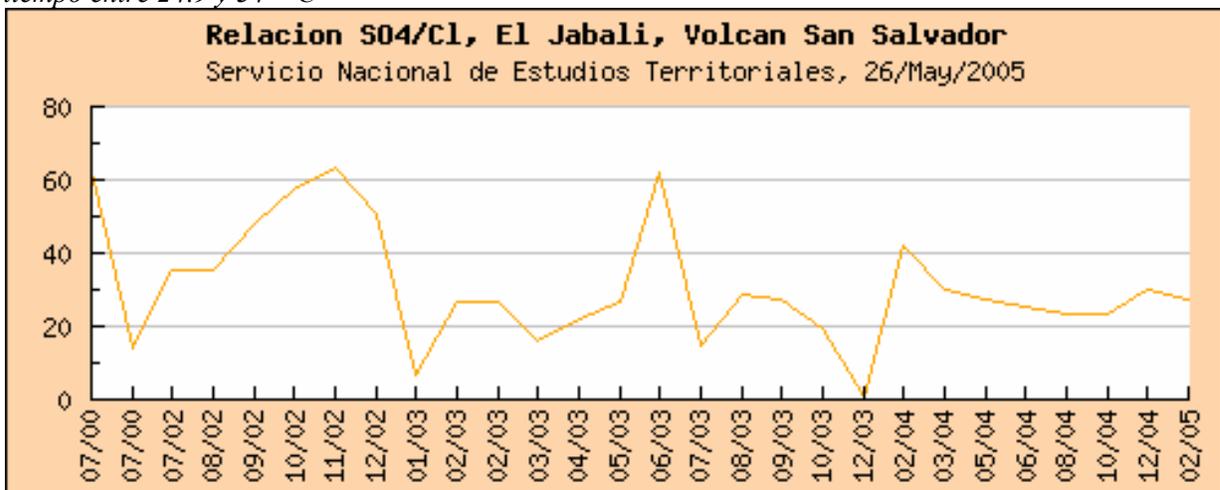


Figura 30. En años anteriores la relación Sulfato vs. Cloruros del manantial el Jabali, fluctúa entre 0.5 y 60, sin embargo, durante 2004 se estabiliza y se mantuvo estable entre 20 y 40.

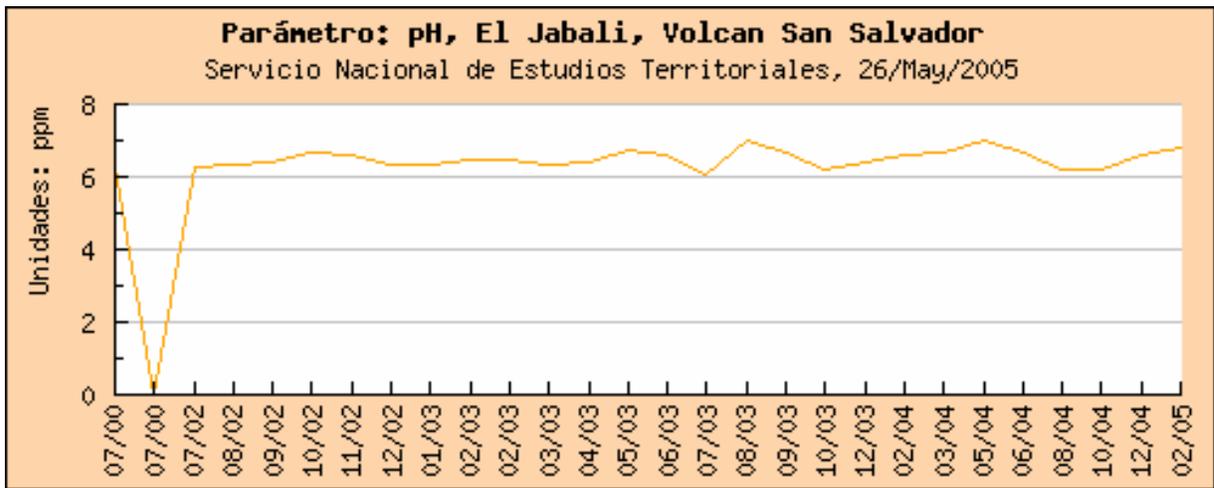


Figura 31. La acidez (pH) del agua del manantial El Jabali, es bastante estable, es decir ligeramente arriba de 6.0

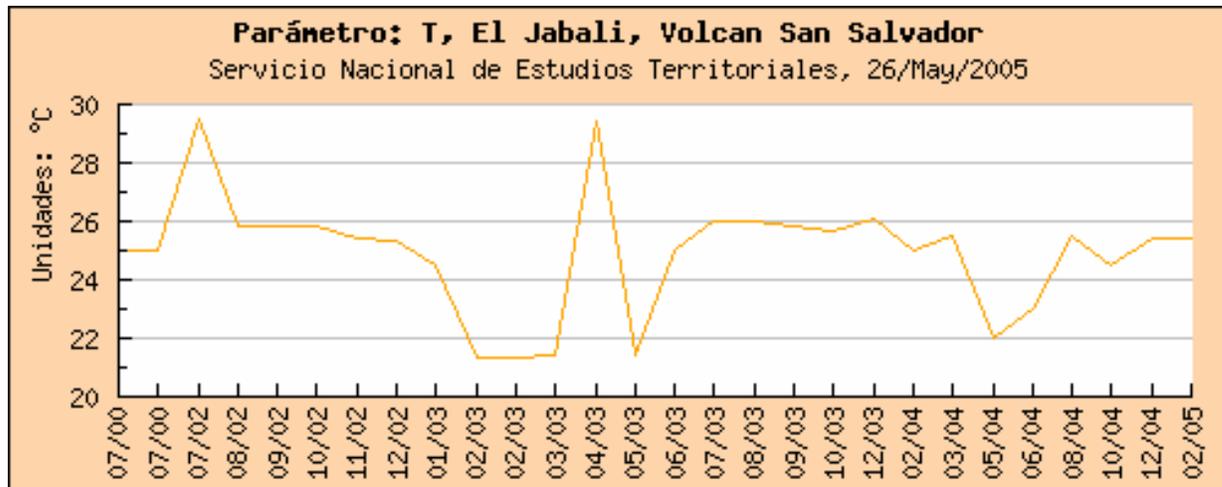


Figura 32. Se observa que la temperatura del agua del manantial El jabali, alcanza valores de hasta 29 °C, pero básicamente fluctúa entre 22 y 26 °C.

Deformación volcánica

Debido a que la deformación en las estructuras volcánicas parte del principio de que el movimiento del magma dentro de la cámara magmática de un volcán, antes, durante y después origina deformaciones en los flancos de los volcanes activos, se consideró necesario implementar una técnica para determinar deformaciones en la zona de la fractura eruptiva del flanco norte del volcán de San Salvador. Se realizaron mediciones de distancias entre bancos de marca previamente instrumentados haciendo uso de una estación total SOKIA.

El resultado final del trabajo fue una tesis titulada “*Metodología para el análisis de deformaciones en los volcanes activos del país*”, previa opción al título de Ingeniero Civil presentado por Julio Antonio Espinoza.

Con este trabajo se logró instrumentar dos redes de Banco de Marca instaladas en el flanco NW del volcán y se practicó la metodología para el análisis de deformaciones en distancias XYZ. La primera red fue conformada por los Bancos de Marca BM7, BM8 y ROCA y la segunda red por BM7, MILPA y PINO. El BM7 es común para ambas redes y cada red tiene su Banco de Marca Base (BMB) a partir del cual se realizan las mediciones.

Los resultados de las mediciones realizadas son mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Distancias obtenidas para cada componente a partir del respectivo BMB.

		1° RED			2° RED				
ΔX		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
		BM7	45.9	45.9	45.9	BM7		1046.5	1046.5
	BM8	112.5	112.5	112.5	MILPA		945.6	945.6	944.7
	ROCA	68.0	68.0	68.0	PERNO		1126.2	1126.2	1124.9
					PINO		1084.5	1084.5	1083.8

ΔY		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
		BM7	129.4	129.4	45.9	BM7		735.2	735.2
	BM8	42.6	42.6	112.5	MILPA		492.1	492.1	494.0
	ROCA	60.0	60.0	68.0	PERNO		693.8	693.8	695.9
					PINO		571.3	571.3	572.8

ΔZ		17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04			17-Jul-04	04-Sep-04	06-Nov-04
		BM7	13.2	13.2	45.9	BM7		266.1	266.1
	BM8	26.2	26.2	112.5	MILPA		206.2	206.2	206.1
	ROCA	10.4	10.4	68.0	PERNO		277.6	277.6	277.5
					PINO		240.2	240.2	240.0

Monitoreo Visual

Se realizaron inspecciones visuales al cráter del Boquerón. No se observaron cambios significativos en su interior, ni la ocurrencia de derrumbes de importancia. El monitoreo

visual se complementó con la información proporcionada por observadores locales, concretamente los empleados del Canal 12 contiguo al cráter.

Discusión

De acuerdo al monitoreo realizado y al análisis de datos, incluyendo la información verbal recopilada, se considera que el volcán se encuentra en un estado de baja actividad, presentando una microsismicidad y actividad que es usual para volcanes de este tipo. De hecho es importante dar atención a los enjambres de temblores y eventos discretos pequeños que a menudo ocurren ya que temblores de baja magnitud pueden ser precursores de una reactivación magmática.

Comportamiento del Volcán de Izalco

La actividad del volcán de Izalco se caracteriza por presentar fumarolas débiles de vapor de agua en el área del cráter y laderas occidental y norte. La roca que conforma el volcán esta fracturada y presenta moderada alteración hidrotermal. Es común observar rocas que se desprenden debido a las fuertes pendientes de sus laderas. No se tuvo reporte de temblores originados en el volcán y no se percibió olor a azufre en las fumarolas.

Durante 2004 se hicieron cuatro inspecciones al cráter y se tomaron temperaturas de las fumarolas (Ver tabla 2). Durante una de las inspecciones se tomo una muestra de condensados en una fumarola del borde norte del cráter (ver tabla 3).

Tabla 2. Datos de temperatura de las fumarolas. Cada fumarola se identifica con la letra F

Volcán de Izalco 2004		
Fecha	Temperatura fumarolas borde norte del cráter ° C	Temperatura fumarolas dentro del cráter ° C
Febrero 13, 2004	F1:75, F2: 71, F3:74, F5: 80.	Grieta NW: 80 Borde occidental del cráter interno 79 y 75
Abril 16, 2004	F1: 72:F2:72, F3:75, F4: 79, F5: 81, F6: 78 F7: 77. Grieta borde Norte F8: 78	Grieta NW: F9: 84. Grieta EW: F10:79, F11:70, F12:66. Borde sur: F13: 78. F14: 82
Julio 14, 2004	F1: 74, F3:78.8, F4: 80.7 F5:78, F6: 75.6, F7: 70.6. Grieta borde Norte F8: 80.9	
Octubre 15, 2004	F1: 75.3, F2:70.3, F3 :77.7, F4: 80.2, F5:79.9, F6:76.5, F7: 72.6. Grieta borde Norte F8: 77.2	Grieta NW: F9: 83. Grieta EW: F11: 68.9 F12: 62. Borde sur: 65.4

Monitoreo de grieta EW dentro del cráter:

Fecha	Medidas (metros)
Febrero 13, 2004	A- B:17.45 C- D: 22.29
Abril 16, 2004	A- B:17.45 C- D: 22.25
Octubre 15, 2004	A - B:17.45 C- D: 22.28

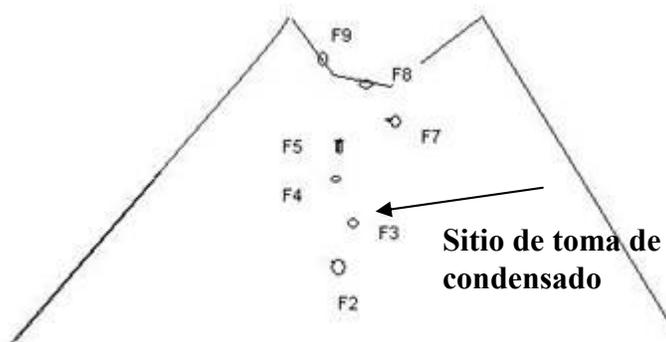
Tabla 3. Análisis químico de la muestra de condensado.

Fecha de muestreo: 14/07/04

Borde norte cráter volcán de Izalco a 1950 msnm (Ver esquema y foto 15)

Análisis	Unidades	Coordenadas fumarola 3
		13° 48' 53.2" N 89° 37' 57.1" W
pH lab	Unidades de pH	4.64
Dureza total	mg Caco3/L	ND
Calcio	mg Ca/L	ND
Magnesio	mg Mg/L	ND
Nitratos	mg NO3/L	4.0
Cloruros	mg CL/L	ND
Sulfatos	mg SO4/L	1.0
Fluor	mg F/L	ND
Boro	mg B/L	0.1
Sílice	mg SiO2/L	8.08

FLANCO NORTE DEL VOLCAN DE IZALCO



Esquema del volcán de Izalco que muestra el sitio de toma de condensado en la fumarola 3 del borde norte. A la derecha la foto 15, muestra el equipo en el momento de la toma del condensado

Discusión

En el volcán de Izalco, la temperatura de las fumarolas es baja y no emiten olor a azufre, los resultados del análisis de los condensados y olor de los gases sugieren que estos son principalmente constituidos por vapor de agua, lo cual indica que el volcán está en un proceso de reposo eruptivo. El cono volcánico tiene laderas empinadas, razón por lo que a menudo ocurren avalanchas de rocas.

Comportamiento del Volcán de San Vicente

La vigilancia a este volcán se realiza a través de 1 estación sísmica y toma de muestras de agua del campo fumarólico de Los Infiernillos, cercanos a San Francisco Agua Agria, en el flanco norte del volcán

Actividad sísmica

La sismicidad del volcán de San Vicente mostró un comportamiento similar a los años 2002 y 2003, es decir, una media de 2 a 6 temblores por mes (Figura 1). En total se registraron entre 80 y 88 temblores en la zona, algunos de ellos fueron sentidos por la población entorno al volcán. Este tipo de temblores tienen origen tectónico, pero son clasificados como Volcano – Tectónicos (VT) por estar localizados a 15 Km. dentro de la zona de influencia del volcán. Además son temblores relacionados con la dinámica del sistema de fallas geológicas de la zona. La energía liberada por el volcán de San Vicente se refleja en la figura de Amplitudes RSAM, la cual muestra el promedio de la amplitud de la vibración sísmica por día (Ver figura 33).



Figura 33. La sismicidad mostró un comportamiento similar a los años 2002 y 2003, Sin embargo, en julio alcanzó un total de 42 eventos, lo cual pone en evidencia el aspecto sísmico de la zona entorno al volcán.

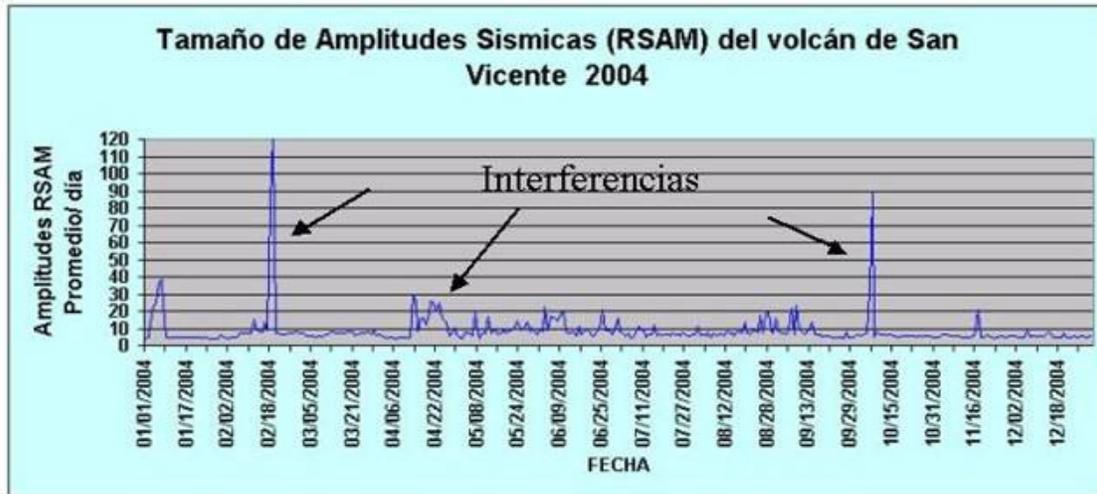


Figura 34. La línea base del tamaños de las Amplitudes Sísmicas del volcán de San Vicente es en promedio 10 cuentas de RSAM. Los picos arriba de 10 cuentas corresponden ya sea a eventos regionales, como también a interferencias.

Hidrogeoquímica

La toma de muestras de agua y los respectivos parámetros físicos–químicos se realizó de forma continua y sistemática. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Aguas del SNET donde se obtuvieron los parámetros de pH, nitratos, magnesio, calcio y dureza, entre otros (Ver figuras 35 y 36).

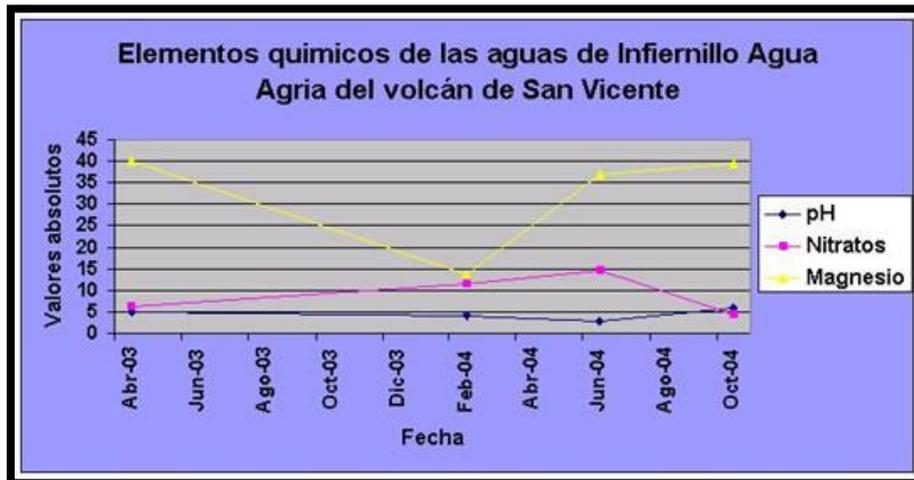


Figura 35. Mientras el pH y los Nitratos se comportan relativamente estables, el magnesio sufre una caída brusca en febrero de 2004. Posiblemente tenga relación con la época seca.



Figura 36. Los analitos dureza y calcio muestran una tendencia uniforme, acorde con los meses de la época seca y lluviosa.

Discusión

En lo que respecta a la sismicidad entorno al volcán de San Vicente, la estación sísmica SVTE registró un total de 88 temblores. En su mayoría asociados con la **tectónica local** y no a la actividad propia del volcán. La temperatura de los Infiernillos de Aguas Agrias se mantuvo estable, es decir entre los 95 y 99 ° C. Los elementos químicos fluctuaron en función de la época del año. De manera que con base al análisis del monitoreo se concluye que el volcán se encuentra en proceso de reposo eruptivo.

Comportamiento del Volcán de Ilopango

El Volcán de Ilopango es una caldera activa y dinámica y se caracteriza por presentar erupciones altamente explosivas. El volcán se localiza a 14 Km. de la capital San Salvador y su última erupción ocurrió en 1880, precedida por mas de 600 temblores.

Monitoreo sísmico

La caldera de Ilopango se vigila con cuatro estaciones sísmicas: La Ceiba, La Fuente, El Faro y Las Brisas, las cuales en 2004 registraron un total de 184 eventos, es decir, un promedio de 15 temblores mensuales, clasificados como volcano-tectónicos y asociados al sistema de fallas que afectan la zona de la caldera. Los registros sísmicos desde 1984 (Figura 37) en la zona de la cuenca de la caldera revelan la influencia de la tectónica en la actividad de la caldera.



Figura 1. La sismicidad Volcano -Tectónica en la zona de la caldera de Ilopango ha sido fluctuante y numerosa durante los últimos 20 años. La actividad se incrementa a partir de 1997 y alcanza un máximo con los terremotos de Enero y Febrero de 2001. Lo anterior pone en evidencia lo tectónicamente activa que es la zona de esta caldera volcánica.

Discusión

El hecho que la caldera de Ilopango se haya reactivado con gran explosividad en el año 430 DC (Dull, A, et al; 2001) y que además haya presentado actividad efusiva en 1880 (Goodyear, 1880) permite interpretar que actualmente es un sistema potencialmente activo y por el tipo de erupciones conocidas es un mega volcán muy peligroso.

Referencias

- Curso Internacional de Posgrado sobre metodologías de vigilancia volcánica:
Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. 9 –19 Noviembre de 2003.
- Dull, R., Southon, J., and Sheets, P., 2001., Volcanism, ecology and culture: a reassessment of the Volcan Ilopango TBJ eruption in the southern Maya realm
- Escobar, C, D, 2003., San Miguel Volcano and its Volcanic Hazards, El Salvador. Thesis for the requirement of the degree of Master of Science. Michigan Technological University, USA
- Espinoza, J. A., 2005., Metodología para el análisis de deformaciones en los volcanes activos de El Salvador. Tesis, para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad Albert Einstein de El Salvador
- Goodyear, W. A., 1880., Earthquake and volcanic phenomena. December 1879 and January 1880 in the Republic of El Salvador.
- Mann, P. C. 2003., Intracaldera geology of the Ilopango Caldera, El Salvador, C.A. Thesis for the requirement of the degree of Master of Science. McGill University, Montreal Quebec, Canada.
- Tilling, R. 1993., Los Peligros Volcánicos.
- Vigilando volcanes. Técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Vulcanológico Cascades , 1980 – 1990.