Introducción

En 2005, se dedicó especial atención a la vigilancia de los volcanes de **Santa Ana y San Miguel** debido a los niveles significativos de actividad hidrotermal, térmica, sísmica y fumarólica que los caracteriza. En adición a ello, también se vigilaron los volcanes de **Izalco, San Salvador Ilopango y San Vicente** a través de inspecciones visuales, estaciones sísmica y muestreos bimensuales.



Foto 1. Columna de vapor y ceniza del volcán de Santa Ana, el día de la erupción (01/10/05), cortesía de El Diario de Hoy. Foto tomada desde la ciudad de Sonsonate, a unos 15 Km. al Suroeste del volcán

Con respecto a la erupción del volcán de Santa Ana ocurrida, entre las 08:05 y 09:05 AM del día 01 de Octubre, el equipo en la central sísmica vibró intensamente, a partir de esa hora, minutos después, observadores del volcán reportaban una densa columna eruptiva que alcanzó aproximadamente 10 Km. de altura (Foto 1).

El colapso de la fase inicial de la columna eruptiva formó una corriente piroclástica densa de gases y ceniza húmeda que impacto unos 1500 metros en dirección Este del cráter. La erupción lanzó rocas de hasta 1 m de diámetro en dirección Este- Sureste, a distancias de 2.5 Km. del cráter. Se depositaron aproximadamente 1.5 millones de metros cúbicos de ceniza gris con intensa alteración hidrotermal. La columna eruptiva en altura fue transportada por el viento hacia el Oeste – Sur Oeste, depositando milimétricos espesores de ceniza sobre poblados como Ahuachapán y la Hachadura y otros ubicados en esa dirección (Figura 1).

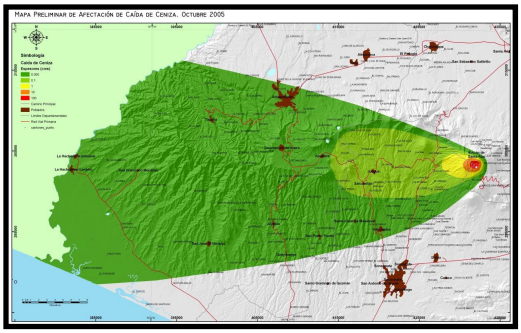


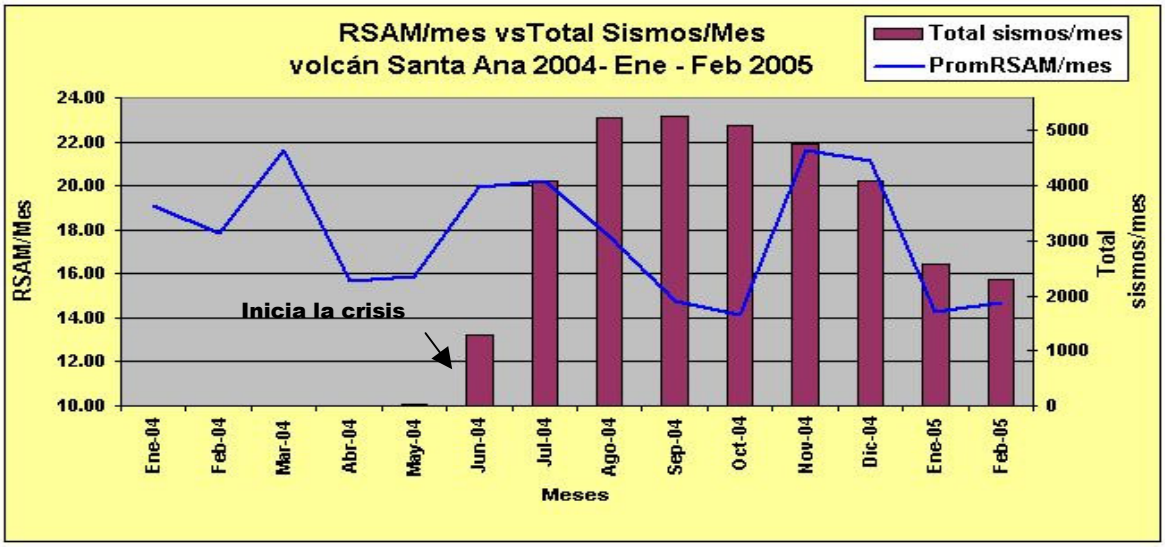
Figura 1. Zona de caída y distribución de ceniza por la erupción del volcán de Santa Ana la mañana del 01/10/05. Los vientos predominantes a la hora de la erupción dispersaron la ceniza en dirección a los poblados ubicados al occidente del volcán.

Evolución de la actividad del volcán de Santa Ana

Los cambios en sismicidad, emisiones de gases y niveles de la laguna que se habían registrado desde junio 2004 hasta finales de febrero 2005 se mantuvieron estables. Sin embargo, desde inicios de marzo, se observó que la actividad del volcán cambió significativamente, aumentando el número de sismos, ruidos y la emisión de gases. Dos meses mas tarde, el 16 de junio, ocurre una pequeña erupción freática. Un mes después, el volcán inicio un aumento gradual de actividad, hasta culminar con la fase eruptiva de 01 de Octubre 2005.

Monitoreo sísmico:

Los primeros dos meses de 2005, el promedio mensual del tamaño de las amplitudes sísmicas (RSAM) y el número de sismos del volcán descendió con respecto a los valores registrados los últimos seis meses del año 2004 (Gráfica 1).



Gráfica 1. Nivel de actividad sísmica del volcán de Santa Ana en 2004 y enero – febrero 2005. Nótese que los sismos inician en junio 2004 (Flecha). Gradualmente el número de sismos se incrementó, alcanzando un número mayor a 5,000 sismos en los meses de agosto, septiembre y octubre. Sin embargo, las Amplitudes sísmicas no superaron las 22 unidades RSAM. Es decir, valores considerados dentro la línea base sísmica del volcán. De acuerdo a la gráfica, en los meses de enero y febrero 2005, la actividad del volcán mostró clara tendencia a disminuir.

Desde inicios de marzo, se observó que la columna de gases del volcán y el número de sismos incrementó significativamente en relación a enero y febrero.

Cabe mencionar que a las 4:00 PM del día 27 de febrero con un evento de **magnitud 2.8** inició un enjambre de 21 sismos relacionados con rompimiento de fallas geológicas a unos 8 Km. del flanco Noroeste del volcán (Figura 2).

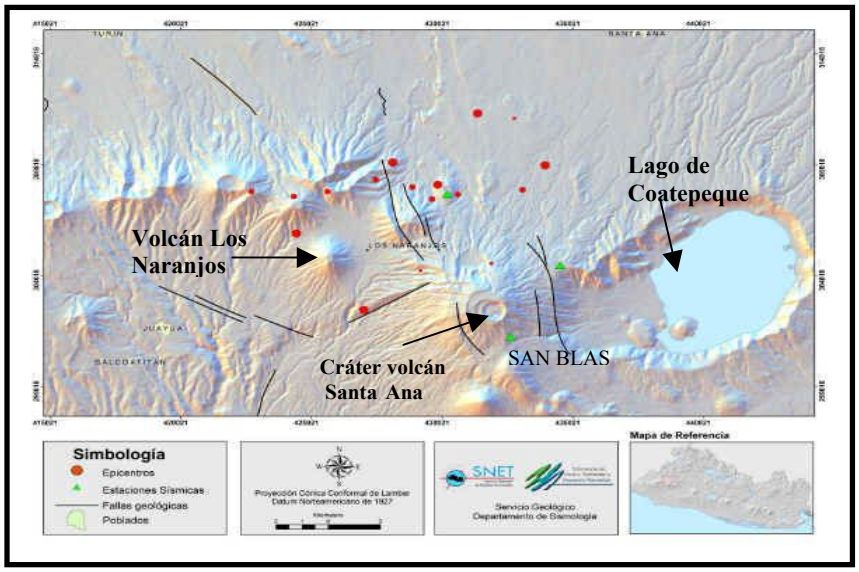


Figura 2. Zona del flanco Noroeste del volcán de Santa Ana y la distribución del enjambre de sismos registrados del 27 de febrero al 01 de marzo 2005. Círculos verdes representan las estaciones sísmicas ubicadas en el volcán.

Esta sismicidad anómala finalizo la mañana del 01 de Marzo. Para mayor detalle favor visitar la página http://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/sisextra12005.html).

Relevante es mencionar que mes y medio después del pequeño enjambre, durante algunas horas de los días 16,17,18,19 y 22 de abril la estación sísmica de San Blas registro períodos cortos de bandas de tremor (Figura 3, 4 y 5), que incrementaron el RSAM promedio día de 20 a un valor máximo de 36 unidades. Los días 16 y 17, lugareños de las fincas San Blas, Macarena y cuerpos de Policía Nacional Civil reportaron pequeñas caídas de ceniza en dichas áreas. Se observo además, que el bosque y especies vegetales de la zona alta de los flancos Occidental, Sur y Sureste del volcán continuaban siendo afectados debido al aumento de los gases emitidos por el volcán.

Debido a los cambios antes observados, se incremento el monitoreo y se procedió a impartir charlas a los pobladores de ciudades, caseríos y cantones ubicados en un radio de acción de 15 Km. del cráter del volcán. Se informo a la población y cuerpos de seguridad de los cambios que estaba presentando el volcán. Se explicaron los procesos de monitoreo que realiza el SNET y lo importante que es mantener informados a los pobladores para que se preparen en caso de un incremento repentino de la actividad volcánica.

Sismogramas del día 16 de abril

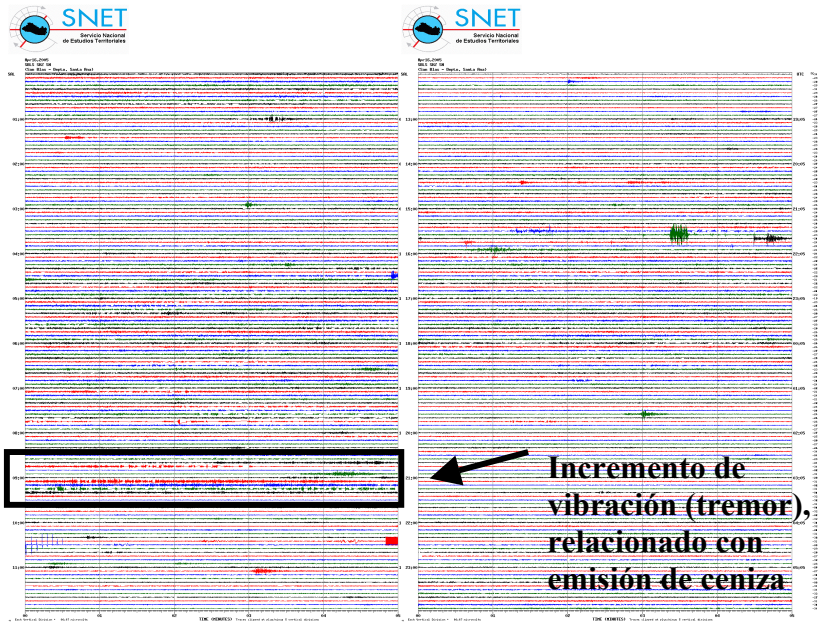
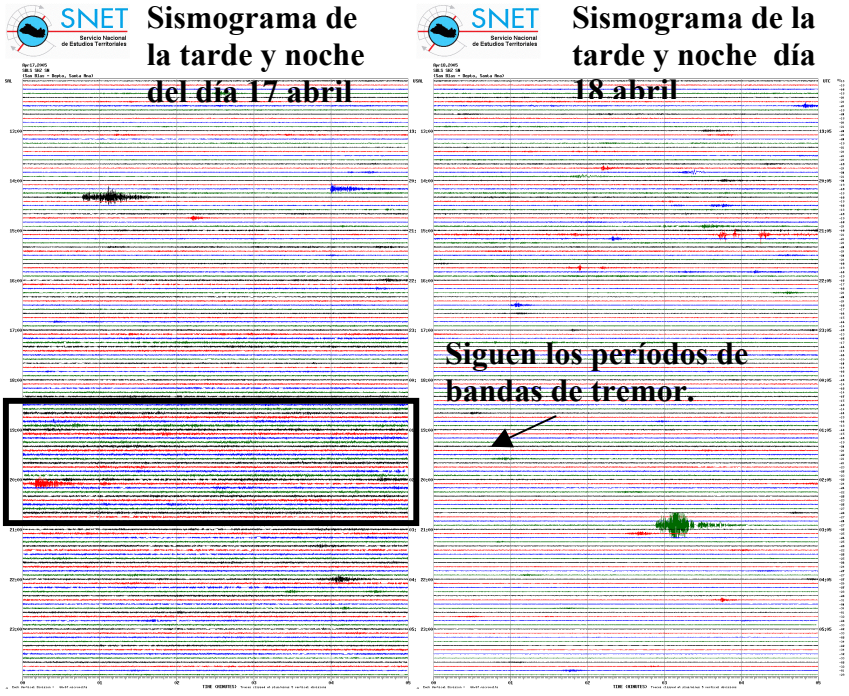


Figura 3. Señal de tremor el día y hora que fue reportada por agentes de la Policía Nacional Civil de San Blas y residentes del lugar una pequeña emisión de ceniza, la mañana del 16 de abril 2005



.

Figura 4. Período de tremor relacionado con actividad hidrotermal. Lugareños reportaron otra pequeña emisión de ceniza, la tarde del día 17.

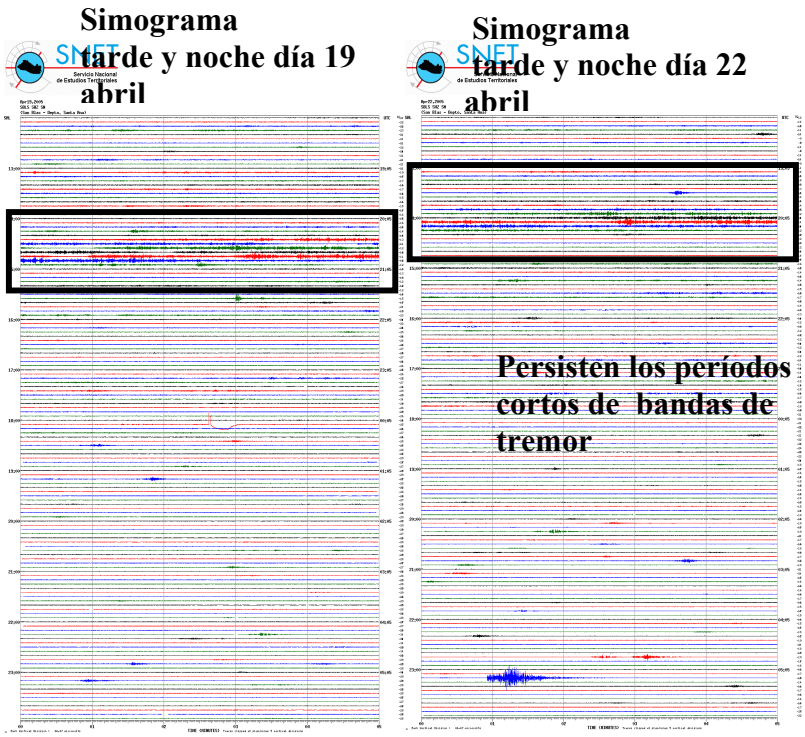


Figura 5. Esporádicos períodos cortos de tremor, relacionados con actividad hidrotermal.

En mayo, otro enjambre sísmico cerca del volcán, el mayor del que se tiene conocimiento. Se desarrollo del 03 al 15, localizado en la zona Nor-Occidente del volcán, es decir, con epicentros en las localidades de Juayúa, Apaneca, Los Naranjos y poblados aledaños (Figura 6). El sismo principal de la serie ocurrió a las 07:55 AM del día 04 de Mayo, con una **magnitud de 5.0,** el cual tuvo como premonitores una serie de sismos de menor magnitud. Siendo el primero de ellos el que se registró a las 23:41 (hora local) del día 03 de mayo con magnitud igual a 2.4. Posteriormente al sismo principal, se registraron más de 700 réplicas de diversas magnitudes. A raíz de ello, se reportaron daños a viviendas y pequeños deslizamientos de tierra en carreteras, pero sobre

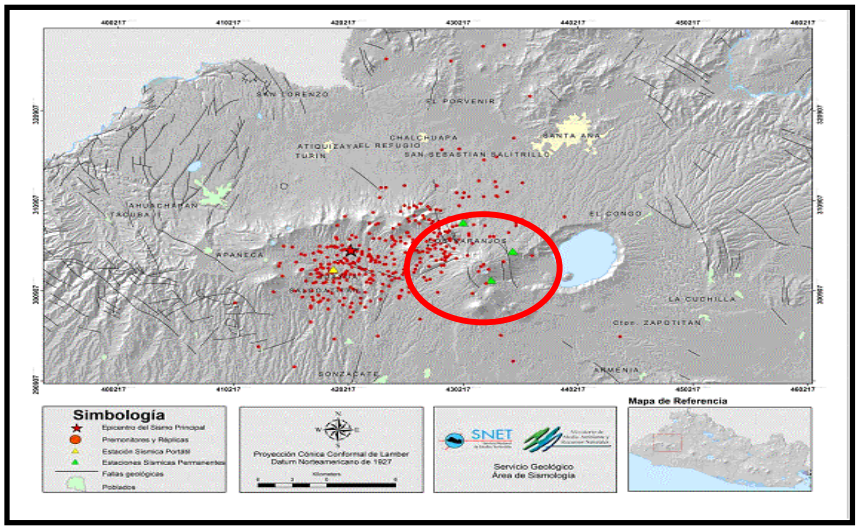


Figura 6. Zona del flanco NW del volcán de Santa Ana. Puntos rojos representan la distribución de epicentros del enjambre de sismos registrados del 03 al 15 de mayo de 2005. El círculo rojo delimita el cono volcánico

todo pánico en la población, para mayor detalle favor leer reporte sismológico en la dirección siguiente:
(http://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/sisextra32005.html)

Debido a este enjambre las Amplitudes Sísmicas RSAM de las estaciones del volcán se incrementaron significativamente durante los días 4, 5 y 6 de mayo, pero luego regresaron a los niveles normales (inferiores a 20 unidades). Es importante mencionar que durante mayo la sismicidad propia del volcán, la emisión de gases y los parámetros químicos de la laguna no experimentaron cambios inmediatos, al menos perceptibles.

Pocos días después del enjambre, el 18 y 19 de mayo entró al país la tormenta tropical Adrián, generando fuertes vientos y tormentas de lluvia ácida que terminaron de dañar fincas de café y bosque del flanco Suroeste del volcán. Entre las zonas mas afectadas se mencionan, La Finca Macarena y Finca Campo Bello (Foto 2 y 3)

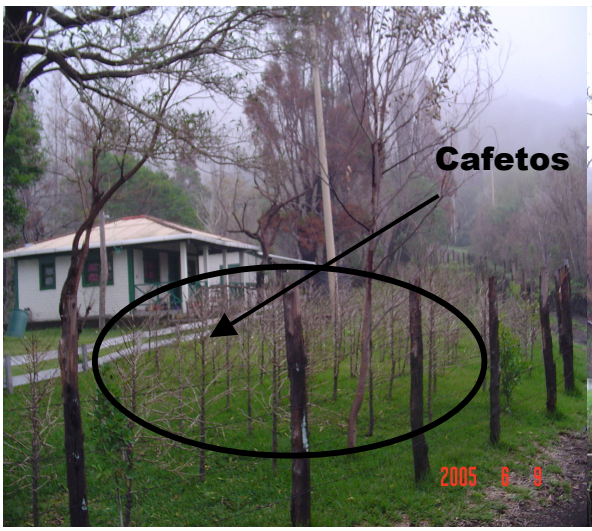


Foto 2. Arbustos de café y Pinos quemados por lluvia ácida de los días 18 y 19 de mayo en la Finca Macarena.



Foto 3. Árboles y Pinos quemados por lluvia ácida de los días 18 y 19 de mayo en la Finca Campo Bello.

En junio, además de los daños causados por la lluvia ácida, lo más interesante fue el registro de una señal sísmica con amplitud y duración diferente a las anteriores (Figura 7 y 8). Señal que fue asociada con la pequeña erupción freática que el 16 de junio de 2005 emitió ceniza alterada en dirección Norte, a una distancia de 7 Km. del cráter del volcán

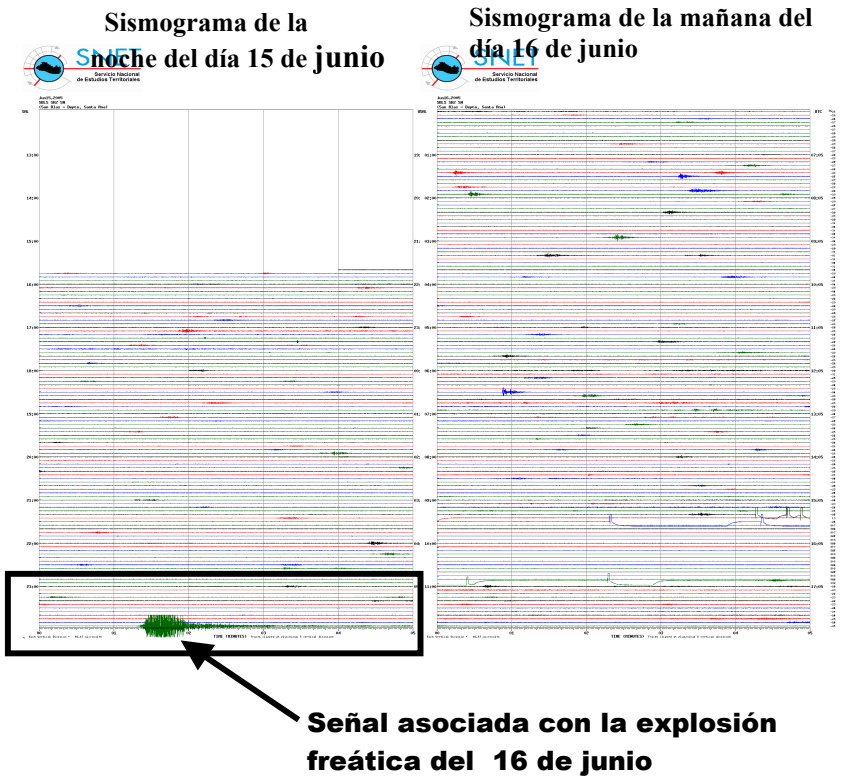


Figura 7. Registro de la actividad del volcán, antes, durante y después de la erupción freática que depositó ceniza en dirección norte del volcán, el día 16 de junio de 2005

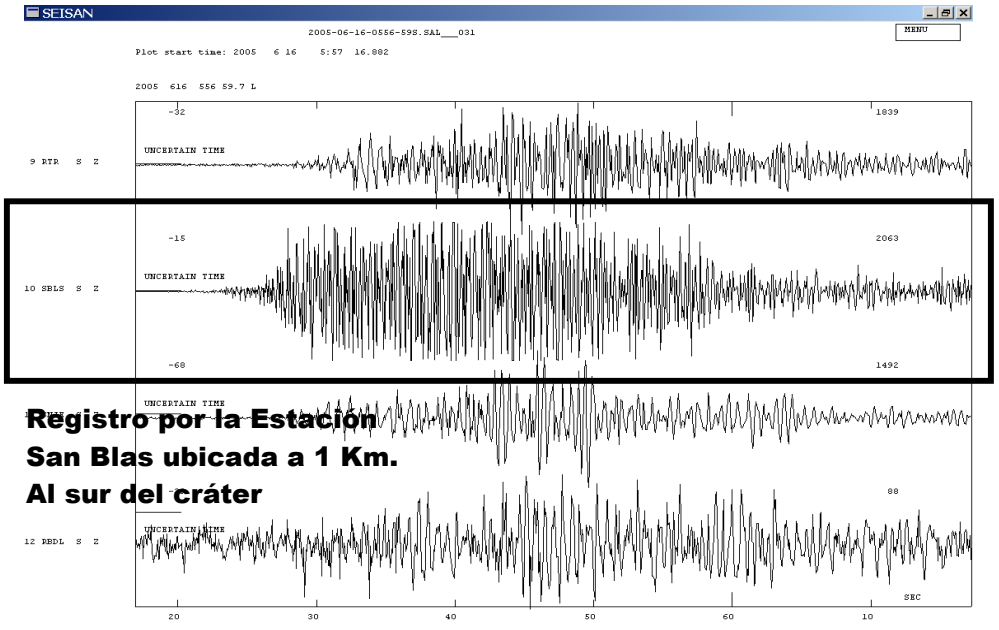


Figura 8. Señal sísmica de la erupción freática del 16 de junio, registrada por 4 estaciones. Nótese la forma elíptica de la señal, la cual será característica de este tipo de actividad.

Es de mencionar que el número de sismos, las amplitudes RSAM, la emisión de gases y la química del agua de la laguna no experimentaron cambios ante la pequeña erupción. Los cambios en la sismicidad, degasificación, ruidos y formación de grietas dentro del cráter del volcán comenzaron a ser evidentes desde finales de julio.

A partir del 18 de agosto los parámetros antes mencionados aumentaron. Se registraron enjambres de sismos, así como tremor volcánico (Figura 9, 10, 11 y 12). Se observó incandescencia en el campo fumarólico (Foto 4, 5, 6) y se escuchó fuerte sonido a turbina de avión jet.

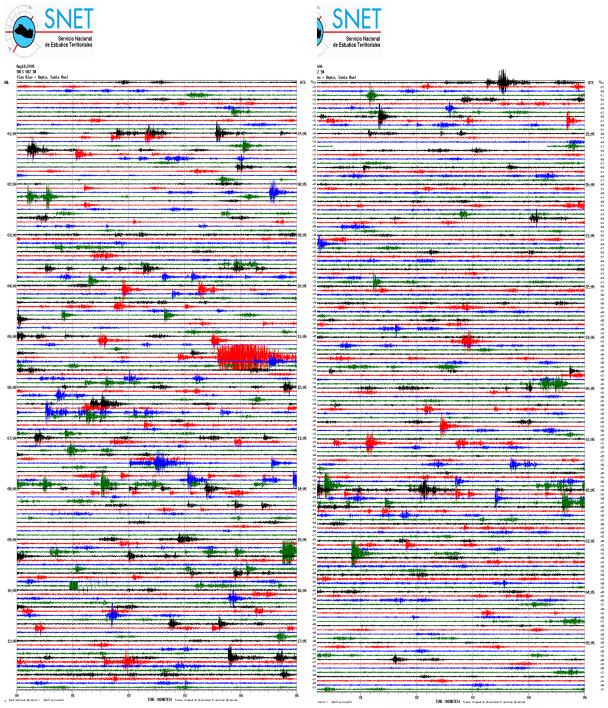


Figura 9. Sismogramas del día 18 de agosto. Se observan numerosos sismos vinculados con presión de vapor y fracturamiento de rocas de techo. El día 23 se observó por primera vez de día incandescencia en el campo fumarólico

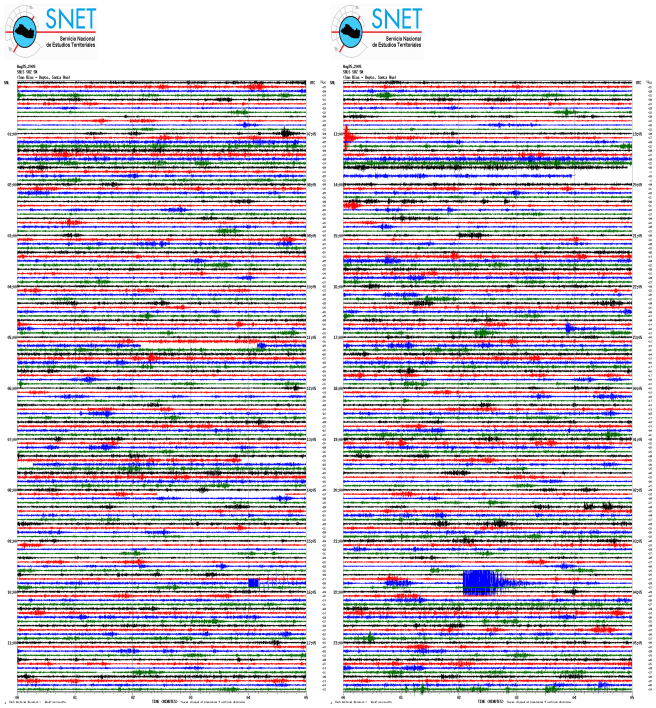


Figura 10. Sismogramas del día 25 de agosto. Se observa claramente la presencia de bandas de temor con pequeñas señales relacionadas a vibración por presión de vapor

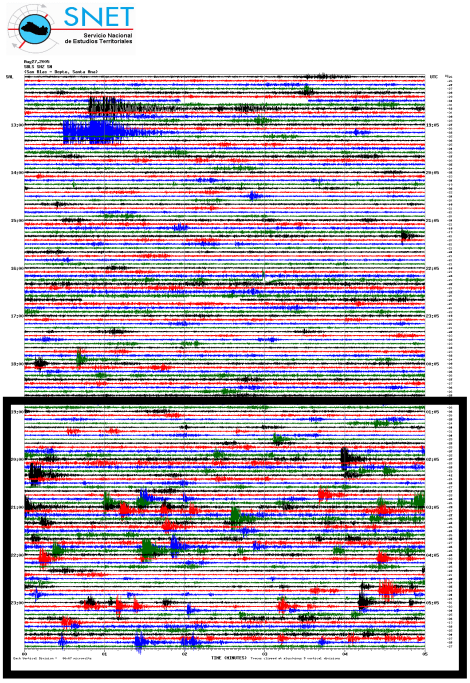


Figura 11. Sismograma de la tarde y noche del día 27 de agosto. Significativo enjambre de sismos y bandas de tremor relacionados con fractura de rocas por aumento de esfuerzos internos.

.

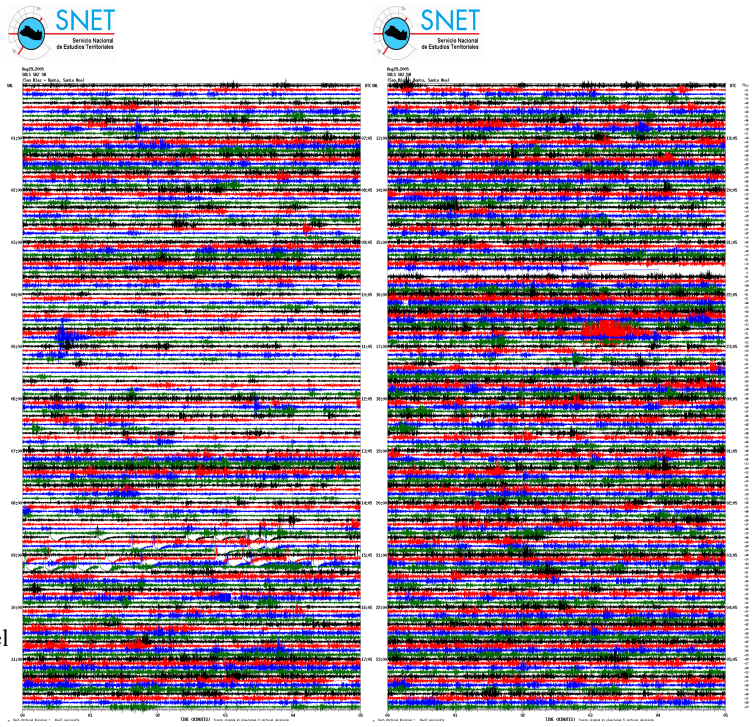


Figura 12. Sismogramas del día 29 de agosto. Intensa vibración del volcán, el RSAM alcanza un máximo de 160 unidades

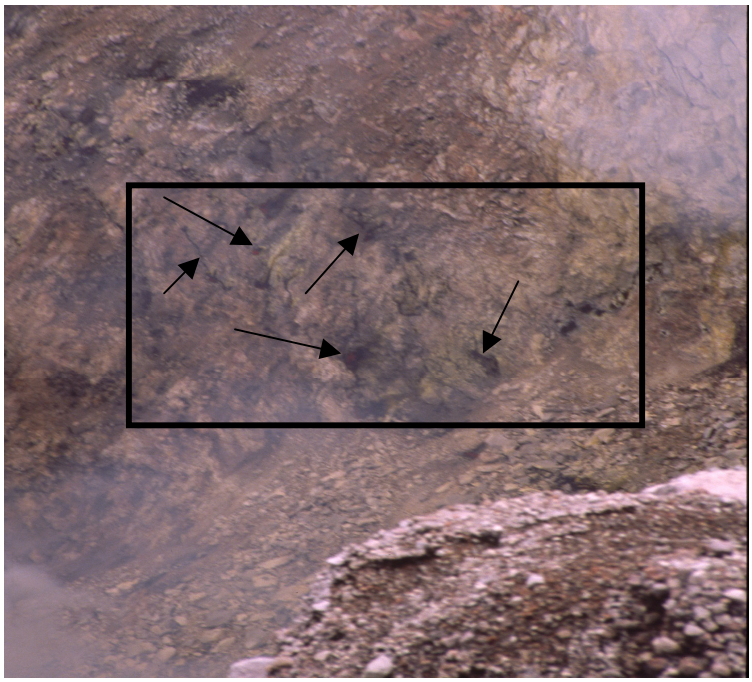


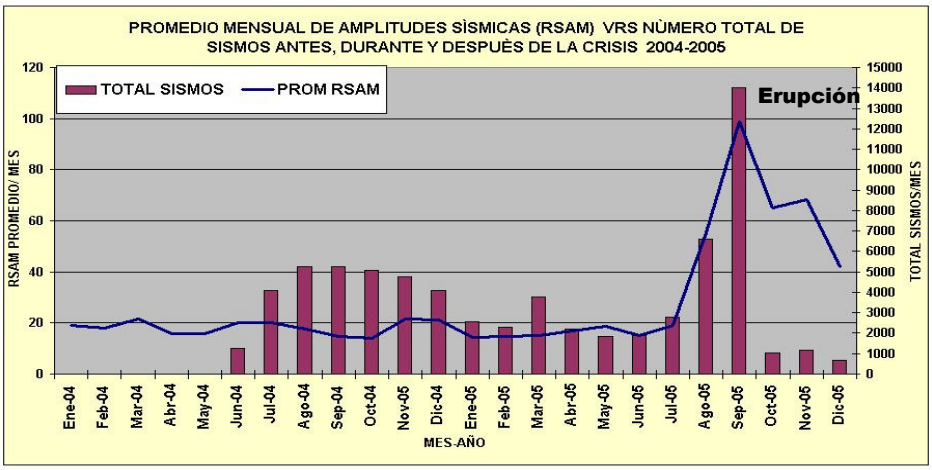
Foto 4. Día 23 de agosto, las flechas señalan grietas y fumarolas con evidencia de incandescencia.





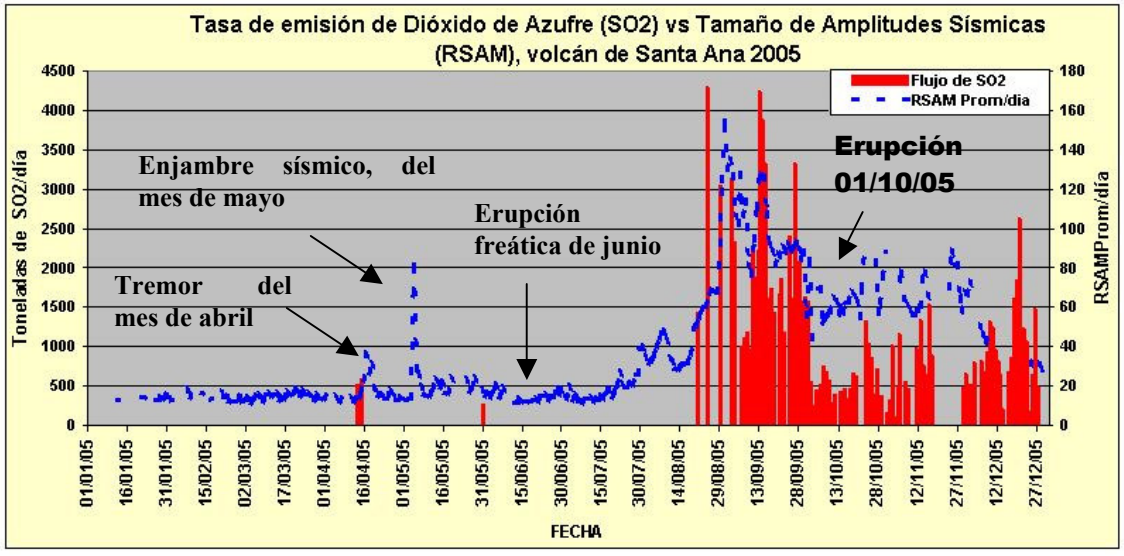
Foto 5 y 6: Tarde del 29 agosto: Incandescencia en el campo de fumarolas adyacente a la laguna

Los valores de RSAM y las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) se incrementaron (Gráfica 2 y 3). El día 29 de agosto las amplitudes del tremor volcánico de alta frecuencia alcanzaron un máximo de 160 unidades (Figura 13). En septiembre, las mediciones de SO_2 realizadas con DOAS y COSPEC por técnicos de la UES y del INSIVUMEH reportaron valores de hasta 4000 toneladas por día. La pluma de gases y las emisiones de SO_2 eran muy fuertes (Fotos 7,8,9,10).



Gráfica 2. Comportamiento sísmico del volcán de Santa. Nótese el cambio en la sismicidad en términos de número de sismos y amplitudes (RSAM). Ambos parámetros se incrementaron a partir de julio 2005, alcanzando en septiembre un máximo de 14,000 sismos, y RSAM de 100 unidades. De acuerdo a la gráfica, la erupción ocurre inmediatamente después de la caída abrupta de ambos parámetros.

Vinculado a ello, el sismograma del día 27 de septiembre registró bandas de tremor bien claras (Figura 14).



Gráfica 3. Amplitudes Sísmicas (RSAM) y emisiones de Dióxido de Azufre (SO_2) del volcán de Santa Ana. Véase el aumento de ambos parámetros a partir del 18 de agosto, y el descenso pocas horas antes de la erupción del 01/10/05.

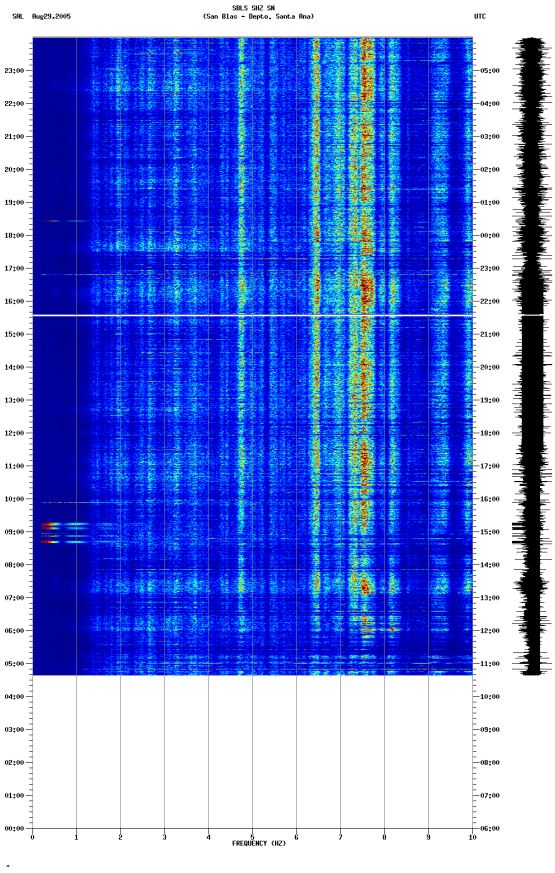


Figura 13. Espectro de frecuencias del día 29 de agosto. Las franjas intensas corresponden a bandas de alta frecuencias, que horas antes de la erupción cambiaron a frecuencias bajas









Fotos. 7, 8, 9 y 10: Técnicos del INSIVUMEH realizan campañas de monitoreo de dióxido de azufre, durante jornadas de trabajo

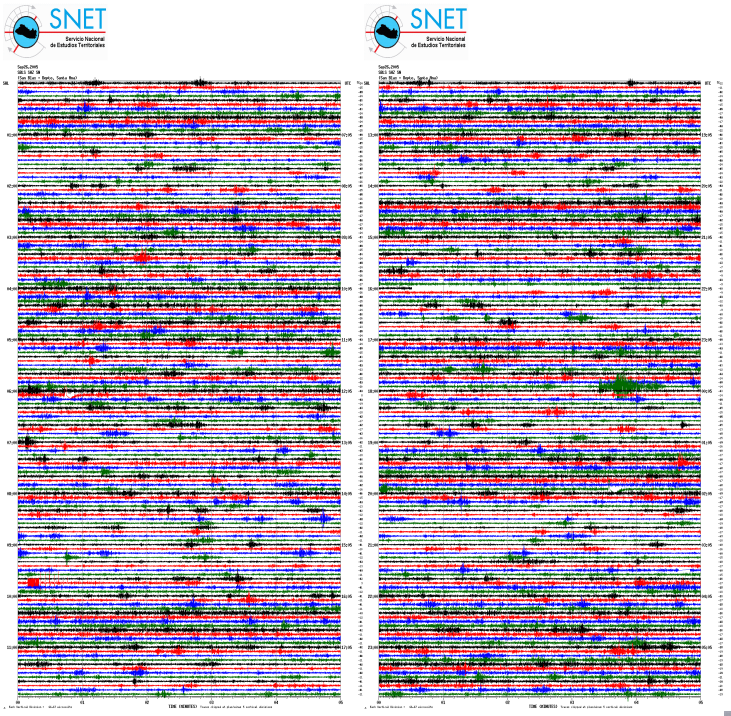


Figura 14. Sismogramas del 27 de septiembre. Registro de tremor bandeado con señales asociadas a pulsos de vapor, indicando actividad hidrotermal

El día 27 de septiembre, se realizo una nueva y última inspección al cráter, durante la cual se percibió intensa actividad volcánica, es decir, persistencia de ruido fuerte a turbina de jet, fuerte olor a azufre y la incandescencia de fumarolas. La laguna parecía tranquila (Fotos 11 y 12). La columna de vapor alcanzaba altura aprox. de unos 800 m, visible desde Sonsonate (Foto 13). Cabe mencionar que no se sintieron temblores.



Fotos 11 y 12. Tomadas el 27 de septiembre de 2005: Se observa calma relativa en la la laguna



Foto 13. Columna de vapor dirigida al occidente, captada por un aficionado desde Sonsonate el 29 de septiembre, dos días antes de la erupción.

La sismicidad del día 30 de septiembre (Figura 15), se caracterizó por la presencia de un enjambre de sismos con características de ser originados por fracturamiento de rocas. Además se registraron numerosas señales relacionadas con actividad hidrotermal y la presencia de frecuencias bajas (Figura 16), con reducción de la amplitud del temor.

Madrugada y día del 30 de septiembre

Tarde y noche del 30 de septiembre

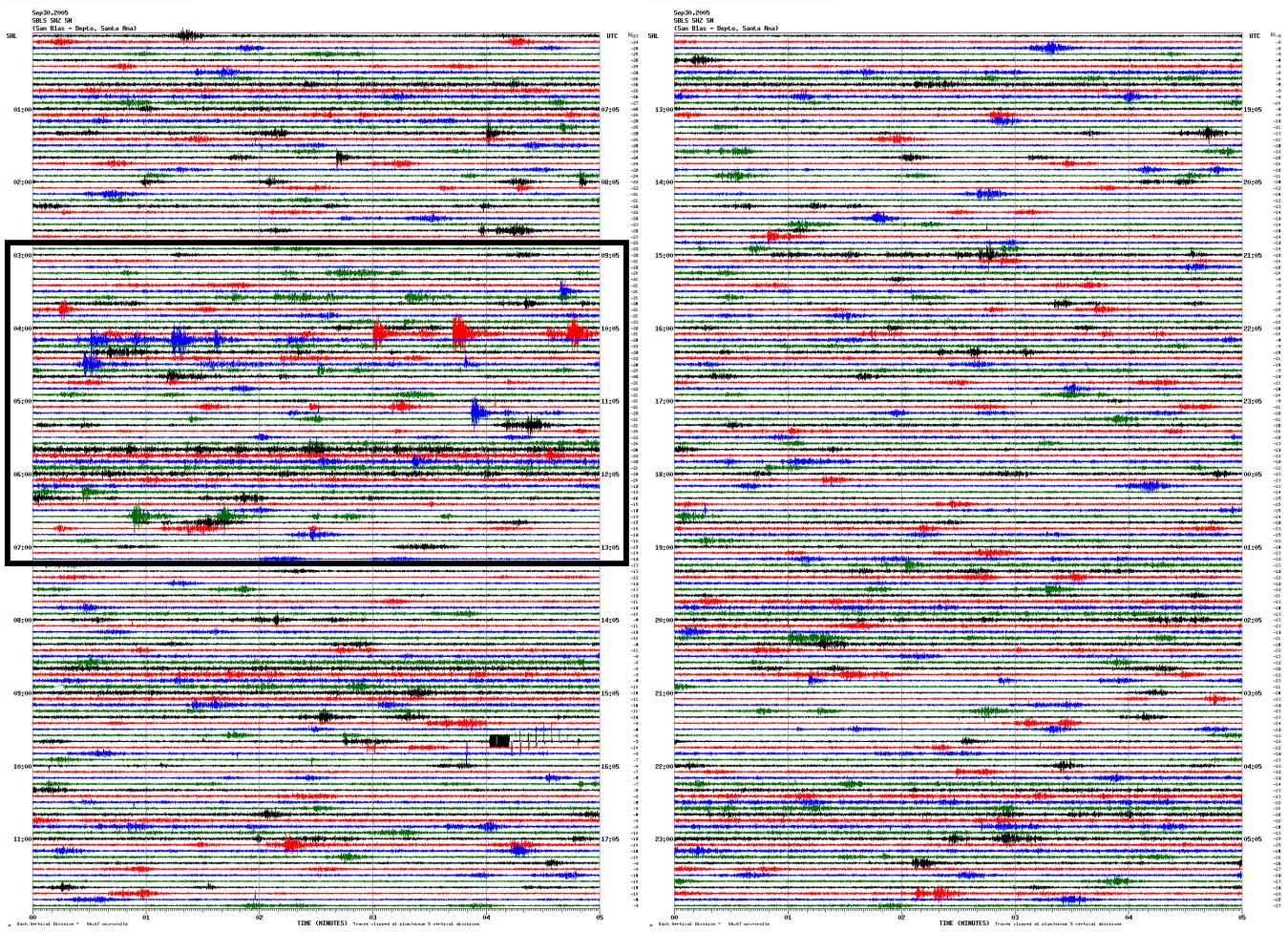


Figura 15. Sismogramas del día 30 de septiembre. El cuadro encierra el enjambre de pequeños sismos asociado a fractura de rocas y sismos causados por presión de vapor, seguido de tremor bandeado, la mañana del día 30. Por la tarde y noche, se presento un descenso de la frecuencia y amplitud del tremor bandeado.

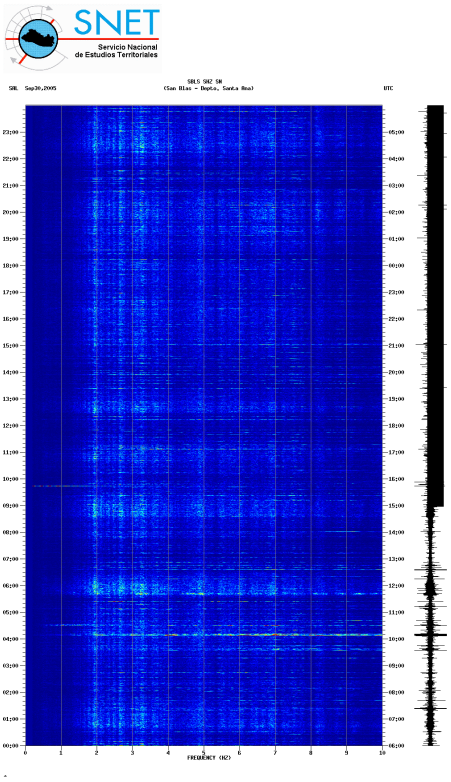


Figura 16. Espectro de frecuencias del día 30 de septiembre. Predominan con mayor intensidad las frecuencias entre 2 y 3 hz

Las acciones de comunicación y la relativa buena coordinación con el sistema de Protección Civil, cuerpos de socorro, cuerpos de seguridad (PNC) y la población cercana al volcán, fueron clave para la alerta temprana ante la posible erupción del volcán. De manera que 41 horas después de registrarse una serie de cambios en el tamaño de las amplitudes de las frecuencias (Figura 17) y cambios en la forma y tamaño de las señales (Figura 18), con cambios en el contenido de las frecuencias (Figura 19), súbitamente el volcán entra en erupción la mañana del 01 de octubre (Foto 14, 15). La inspección de campo realizada 2 ½ horas después de la erupción, permitió observar caída de balísticos de hasta 1 m de diámetro a distancias de 2.5 Km. al Este- Sureste del cráter (Foto 16). Se observó también la zona de impacto por una corriente densa de gases y ceniza húmeda (Foto 17). Se identificó además el depósito de un flujo de escombros con agua caliente proveniente de la laguna (Foto 18 y 19). De acuerdo al monitoreo sísmico se determinó que 3 ½ horas después de la erupción, la actividad del volcán mostró tendencia a disminuir Durante la tarde y noche iniciaron lluvias intensas que generaron correntadas de agua con lodo provenientes de la cima del volcán. El día 02 de octubre, la situación lluviosa en la zona el volcán se tornó intensa, generándose flujos de escombros desde muy temprano del día. De acuerdo a moradores del cantón y caserío Planes de la Laguna, ubicado en el flanco oriental del volcán, a partir de las 19:20 horas, la situación se volvió caótica debido a una serie de intensas tormentas eléctricas que produjeron enormes lahares, que inundaron sus terrenos y viviendas, obligándolos a evacuar inmediatamente. El registro sísmico de los lahares antes mencionados son presentados en las figuras (20 y 21). Dos días después de la erupción, es decir el día lunes 03, SNET reportó oficialmente la entrada al país de la tormenta tropical Stan. Razón por lo que aumentó el número de personas evacuadas ante la amenaza por lahares y derrumbes. La tarde del lunes, la actividad del volcán un aumentó, es decir, se registró un enjambre de sismos acompañado de aumento en las amplitudes del tremor (Figura 22, 23). Durante el día y la noche, se tuvo reporte de lluvias intensas y lahares en la zona. El día 04, el número de sismos disminuyó, pero la amplitud del tremor se mantuvo alta. Las señales asociadas con lluvias continuaron (Figura 24 y 25). El día 05, la actividad del volcán en términos de tamaño y número de sismos se incrementó, en cambio, la amplitud del tremor disminuyó. Las señales asociadas con lluvias y lahares son claramente visibles en los sismogramas (Figura 26 y 27). El Día 06, se observó disminución en la actividad del volcán, reflejada en las amplitudes del tremor y el tamaño y número de sismos. Además el sismograma no presentó registro de lahar (Figura 28 y 29).

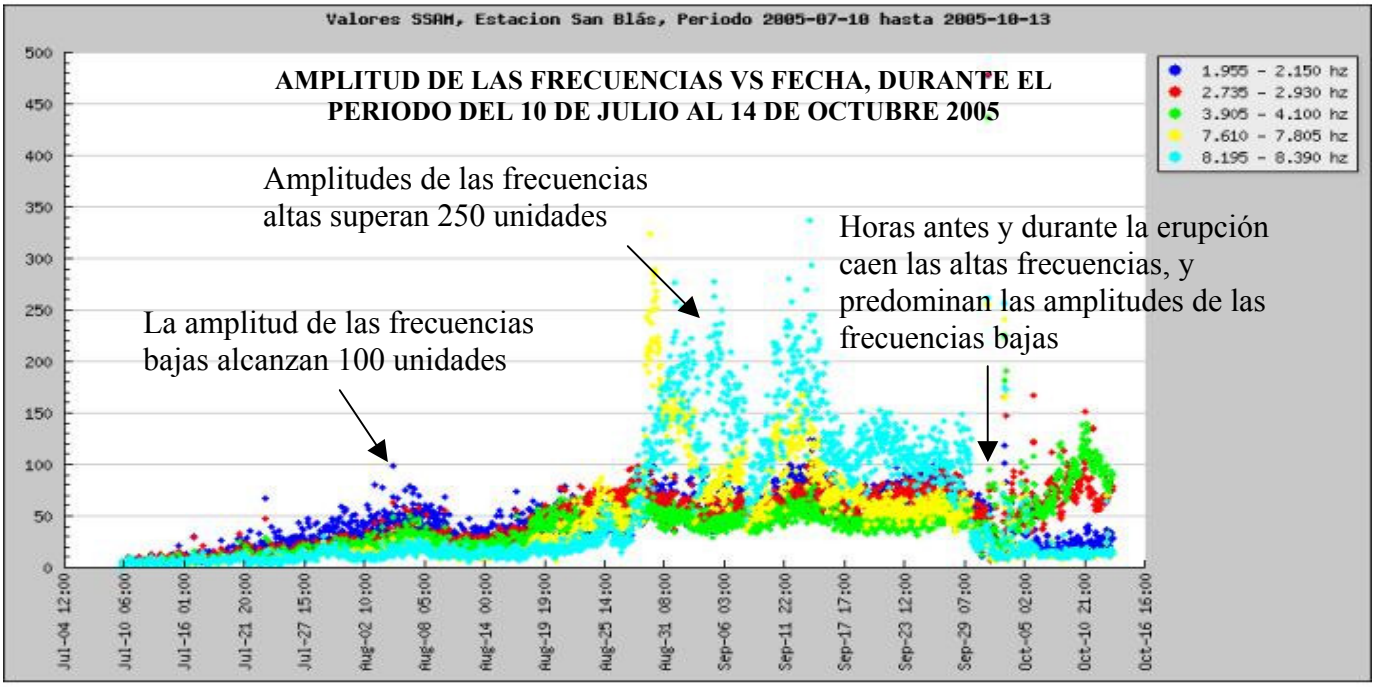


Figura 17. Cambio en las Amplitudes Sísmicas de las Frecuencias (SSAM), antes, durante y después de la erupción.

Sismograma de la madrugada y mañana del día 01/10/05

Sismograma de la tarde y noche del día 01/10/05

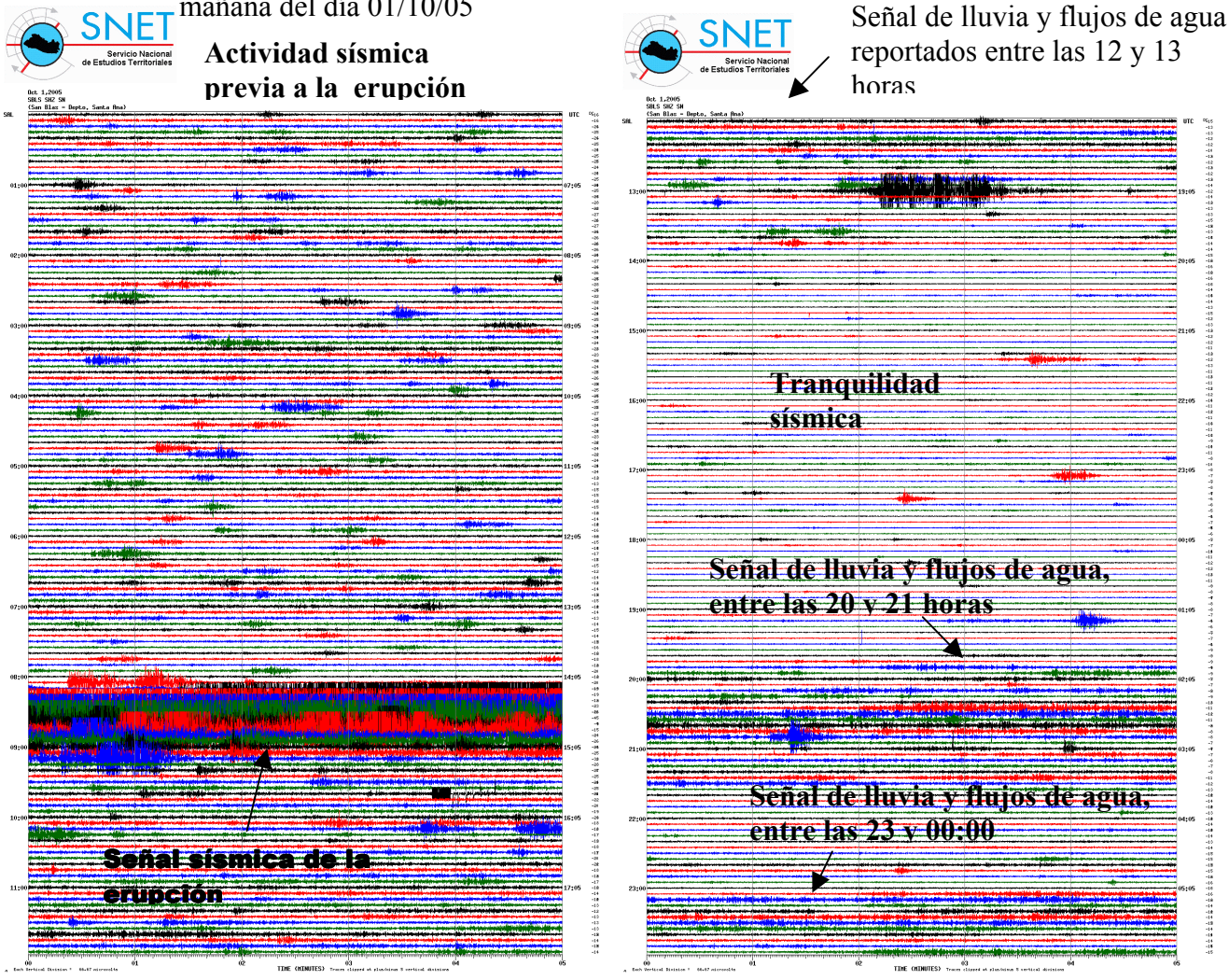


Figura 18. Sismogramas del día (01/10/05). Registro de la actividad del volcán horas antes, durante y después de la erupción. Después de cuatro horas, se observa un descenso paulatino de la sismicidad del volcán. De las 14 las 20 horas el volcán mostró señales claras de tranquilidad sísmica Posteriormente a partir de las 20 horas aparecen señales asociadas con lluvia y flujos de agua..

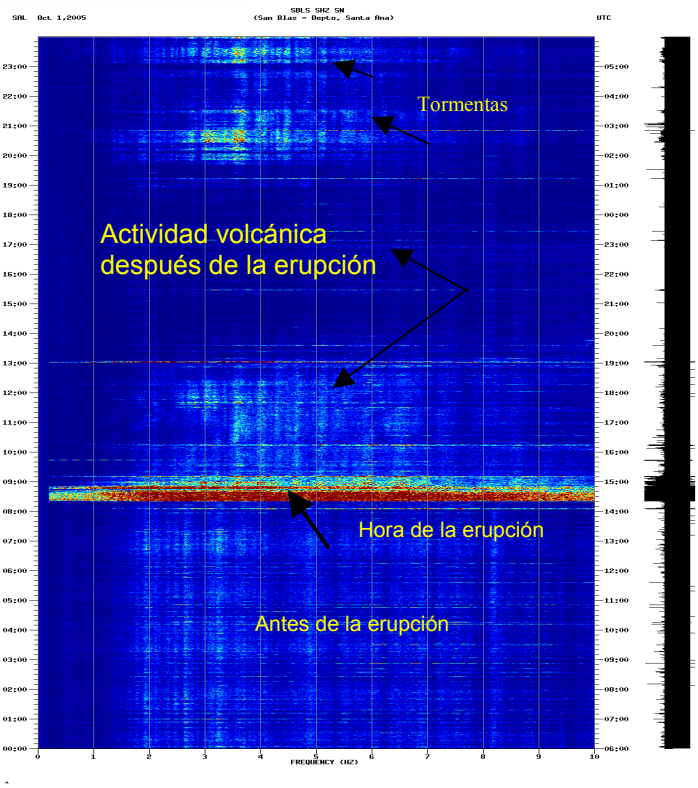


Figura 19. Espectro de frecuencias de la actividad sísmica del volcán antes, durante y después de la erupción. De acuerdo a la intensidad de las bandas de frecuencias registradas pocas horas antes de la erupción, esta inició súbitamente.



Foto 14. Fase inicial de la erupción desplazándose en dirección oriental . Foto desde Sonsonate , cortesía de El diario de Hoy.



Foto 15. Columna eruptiva en proceso de ascenso vertical. Foto desde Sonsonate, cortesía de El Diario de Hoy.



Foto 16. Balístico de 1 metro y su cráter de impacto, encontrado sobre la carretera al Cerro Verde, a 2.5 Km. del cráter. Cortesía de un aficionado (01/10/05).

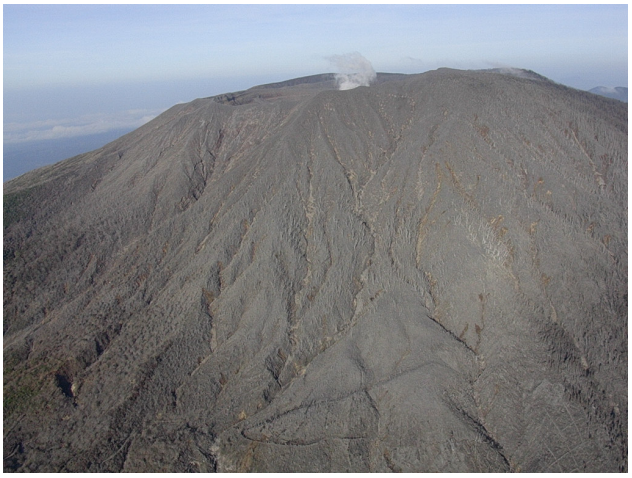


Foto 17. Zona del flanco oriental del volcán impactada por la erupción (01/10/05).



Foto 18. Lahar generado con agua caliente de la laguna a la hora de la erupción el 01/10/05



Foto 19. Depósito de lahar generado con agua de la laguna a la hora de la erupción el 01/10/05. Recorre 2 Km. a partir del cráter.

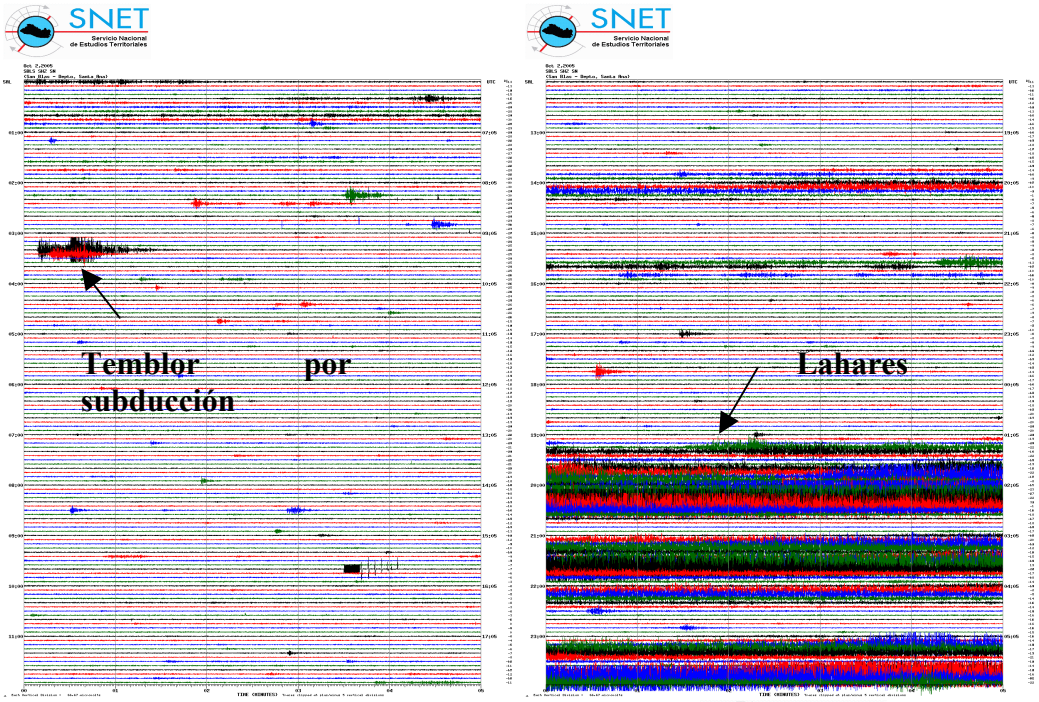


Figura 20. Sismogramas del día 02 de octubre 2005. Franjas con gran intensidad corresponden a registro de fuertes tormentas y lahares reportados por lugareños.

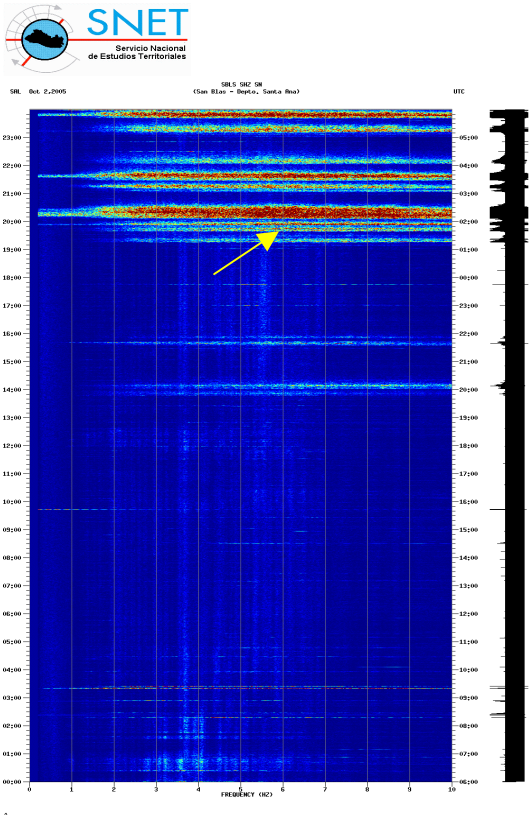


Figura 21 Espectrograma del día 02 de octubre 2005. Franjas horizontales de mayor intensidad corresponden a las frecuencias generadas por la vibración causada por tormentas y lahares.

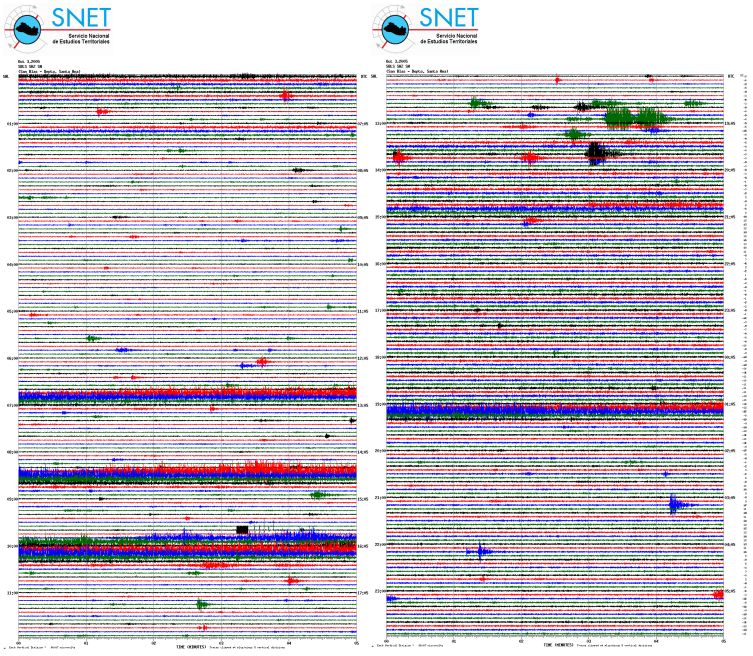


Figura 22. Sismogramas del dia 03 de octubre 2005. El número de sismos y la vibración del volcán se incrementó significativamente por la tarde y noche. Las franjas horizontales intensas son señales de tormentas y lahares.

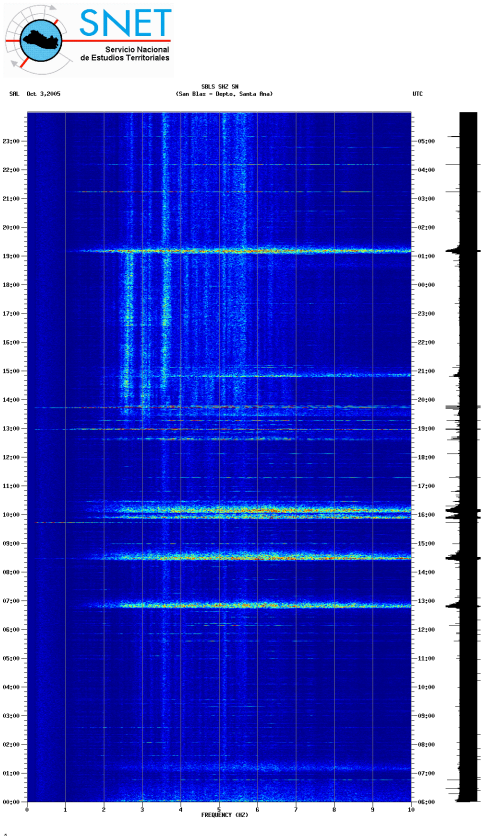


Figura 23. Espectrograma de frecuencias dominantes del día 03 de octubre. Franjas intensas horizontales corresponden a vibración por lluvia y lahares, las franjas verticales intensas son las frecuencias que indican aumento de la de actividad del volcán

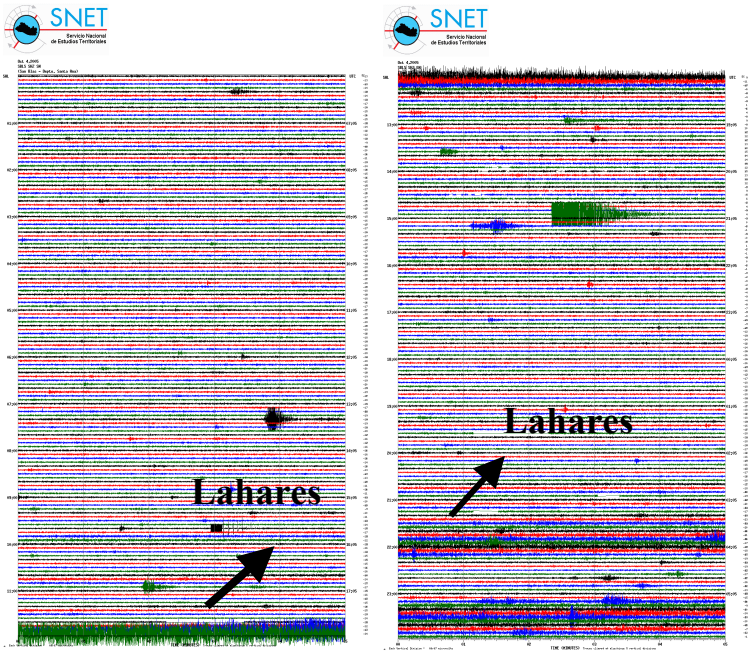


Figura 24. Sismogramas del día 04 de octubre 2005. La presencia de franjas de mayor intensidad corresponden a tormentas y lahares reportados por lugareños del Cantón Planes de la Laguna.

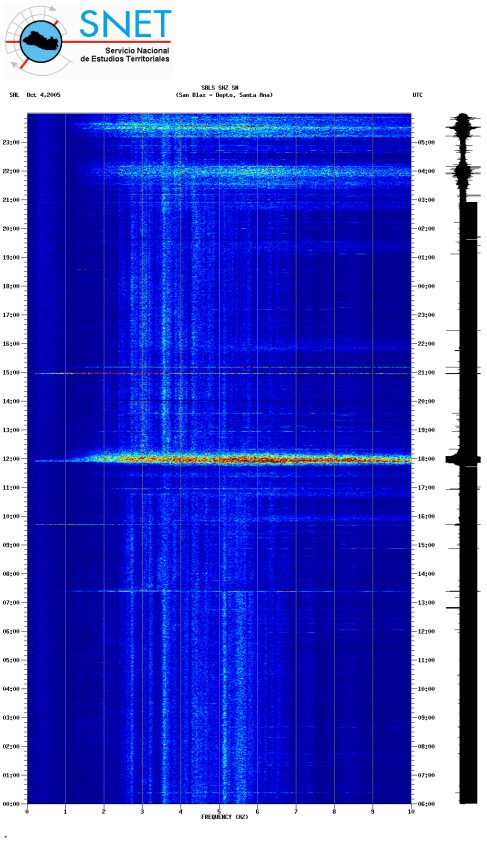


Figura 25. Espectro de frecuencias día 04 de octubre 2005. Las franjas horizontales de mayor intensidad corresponden a la vibración asociada con tormentas y lahares. La presencia de frecuencias menores a 4 hz, sugiere que a pesar de disminuir el número y tamaño de los sismos, persiste la vibración (tremor) propia del volcán

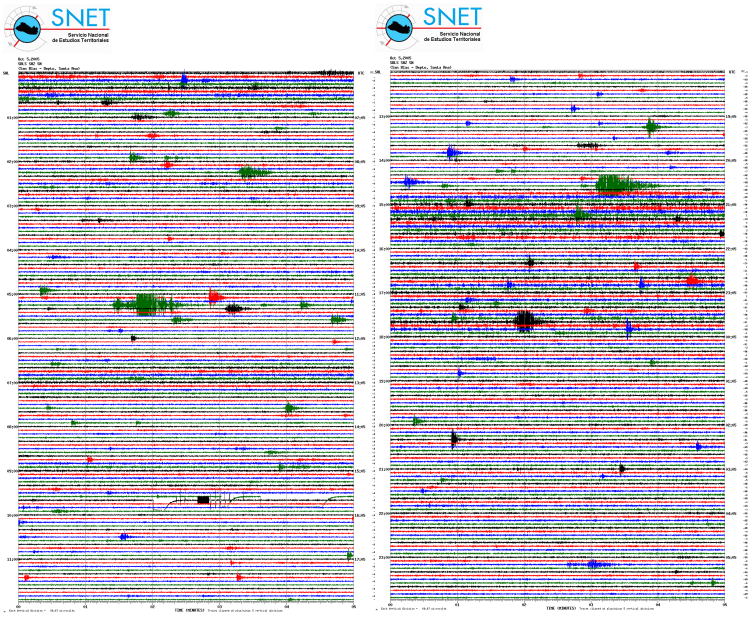


Figura 26. Sismogramas del 05 de octubre 2005. Incrementa la actividad del volcán. Aumenta el número y tamaño de los sismos y disminuye la amplitud del tremor. Se calma la lluvia y no se registran señales relacionadas con lahares

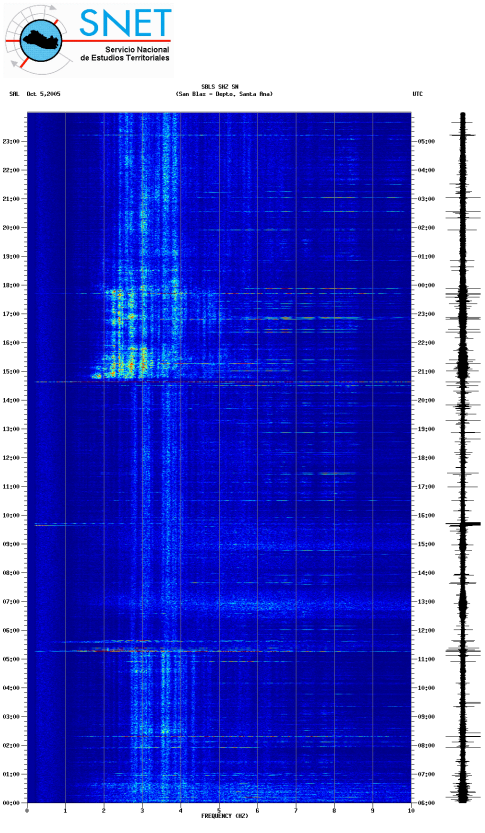
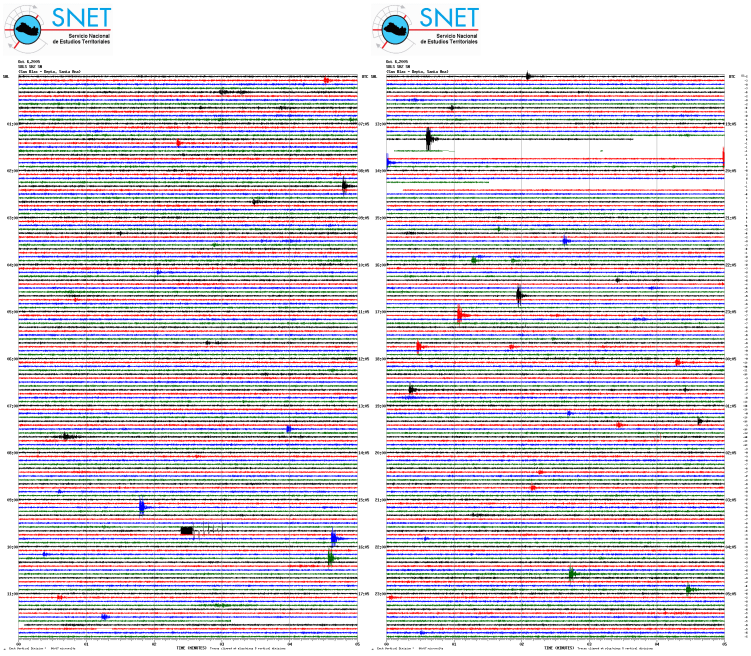


Figura 27. Espectro de frecuencias día 05 de octubre 2005. A excepción de las poco intensas franjas horizontales relacionadas con lluvia, viento y moderados flujos de agua, las frecuencias de las franjas verticales se intensifican indicando aumento en la energía del volcán.

Figura 28. El Día 06, la vibración del volcán (tremor) persiste con presencia de pequeños y esporádicos sismos. Nótese que no aparece señal asociada con lahar. De hecho, las condiciones meteorológicas mejoraron sustancialmente a partir de esta fecha..



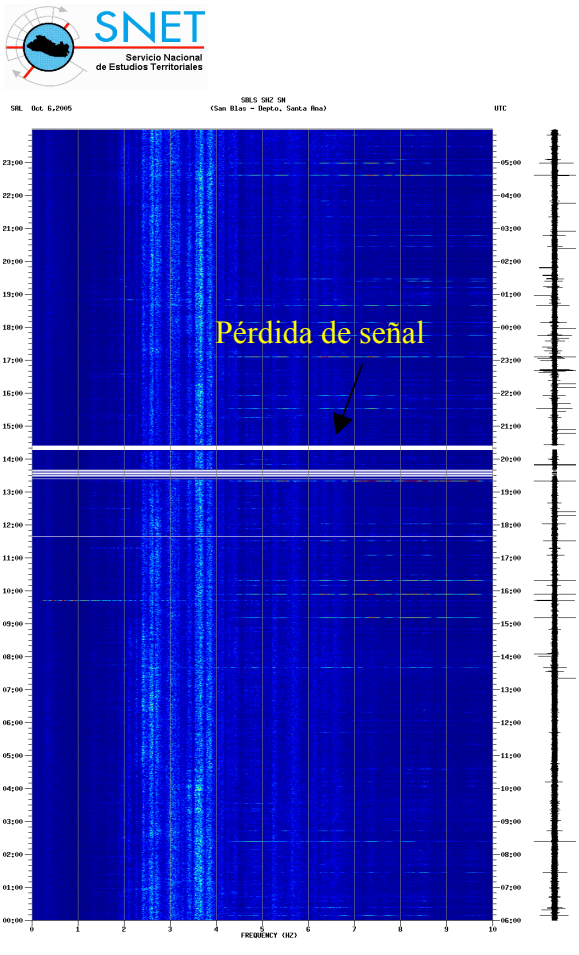


Figura 29. Espectrograma del día 06. La intensidad de las franjas verticales en el orden de 2 a 4 hz., representan actividad volcánica con predominio de bajas frecuencias

Durante los primeros 7 días después de la erupción, la actividad del volcán en términos de su propia energía descendió a 50 unidades RSAM, a excepción de los picos de los días 02 y 04, que definitivamente obedecieron a la ocurrencia de lahares.

Del 7 al 20 de octubre, se registró tremor y una serie compleja de pequeños sismos aislados. La actividad del volcán se volvió cambiante e impredecible, fluctuando entre 50 y 70 unidades RSAM.

A partir del día 20, la actividad sísmica del volcán cambió. De hecho, las amplitudes de las frecuencias bajas se incrementaron significativamente, el tamaño de los sismos aislados aumentó y se incrementó la amplitud del tremor (Figura 30).

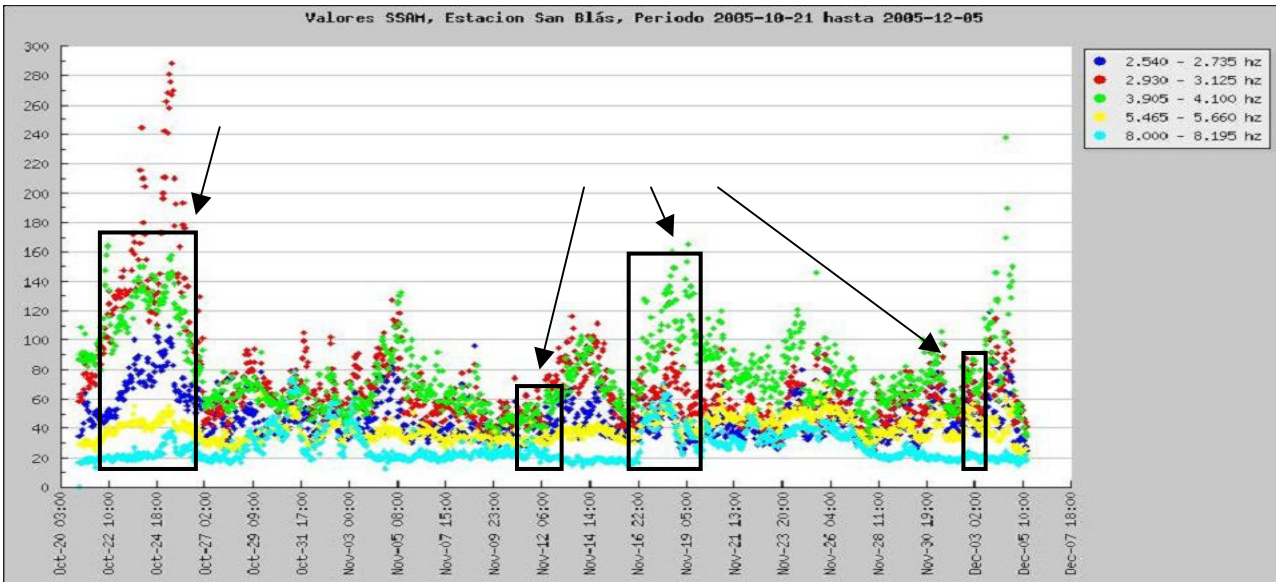


Figura 30. Gráfica de Amplitudes de frecuencias vs fecha, correspondiente al periodo del 20 de octubre al 07 de diciembre 2005. Cada color indica un rango de amplitudes de frecuencias. El color celeste en la gráfica representa las frecuencias altas (8hz). Aunque la actividad del volcán presento frecuencias altas, algunos de los picos se deben a influencia de fuertes vientos.

Lo máximo de esta nueva crisis tuvo lugar el día 25 de octubre alcanzando un promedio de 120 unidades RSAM. Actividad que el día 27, ya había descendido a 60 unidades y que el día 30 de octubre superó las 90 unidades. Gradualmente, el 9 de noviembre la energía sísmica del volcán había descendido a 55 unidades. A partir del 09, se complico entender los cambios en la actividad del volcán, básicamente debido a la influencia de agentes externos como los fuertes vientos de la época. De acuerdo al reporte meteorológico, a partir del día 12 de noviembre, los vientos se incrementaron en la zona del volcán, alcanzando el día 18 los 60 Km. por hora, lo cual duplico el RSAM a 110 unidades. Al disminuir el viento, el 22 de noviembre la vibración del volcán se había reducido a 60 unidades.

Sin embargo, súbitamente la actividad volcánica aumento los días 23, 24 y 25, superando las 80 unidades (Figura 31,32 y 33). El 25 de noviembre, la energía del volcán inicio un descenso gradual con picos altos y bajos, algunos de los cuales relacionados con vientos y otros con la persistente actividad del volcán. Finalmente, un mes después, es decir, ya para finalizar el año, la actividad el volcán cambió con clara tendencia a disminuir.

Cabe mencionar que según el reporte de la procuradora de lo derechos humanos, por causa de la erupción murieron dos personas soterradas, tres desaparecidas, entre 4 y 10 heridos, unas 5,000 personas fueron evacuadas por el COEN, 15,000 personas evacuaron por su propia cuenta. Aproximadamente 140 manzanas de café fueron afectadas por lluvia ácida y 15,000 afectadas por impacto de la erupción.



Figura 31. Nivel de energía sísmica del volcán de Santa Ana, desde un día antes de la erupción (01/10/05), hasta el 31 diciembre de 2005. Algunos de los picos que se observan en la gráfica señalados con flechas, no obedecen del todo a la actividad del volcán, si no que en gran medida a vibración originada en el terreno por efecto de los vientos de l a época.

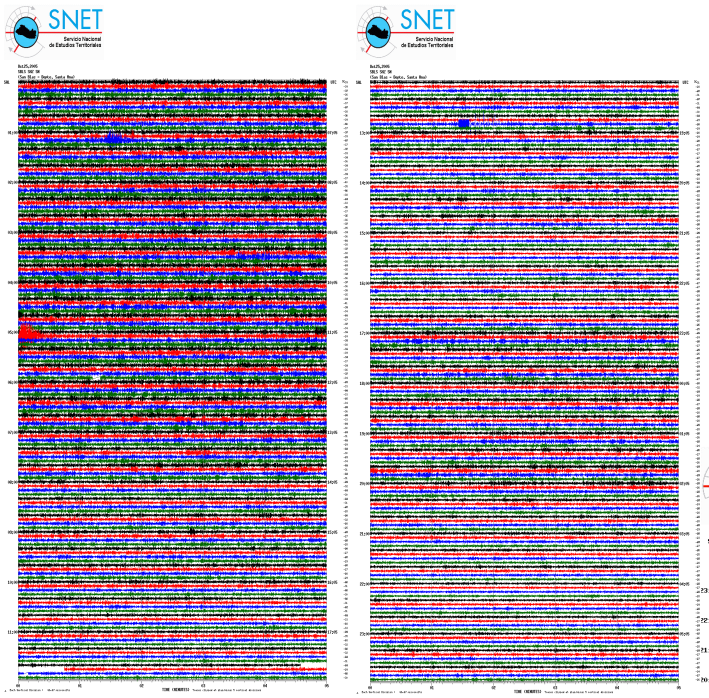


Figura 32. Sismograma del día 25 octubre. Desde el 22 de octubre gradualmente se incrementó la vibración (tremor) del volcán, alcanzando el día 25 un máximo de 120 unidades RSAM.

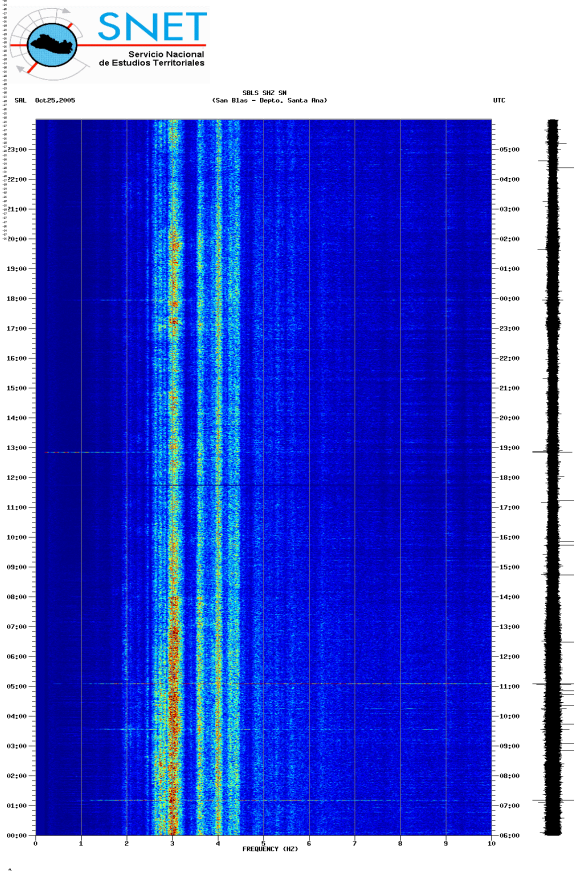


Figura 33. Espectrograma del día 25 octubre. Predomina con mayor intensidad la banda de frecuencias de 3 hz, típica de actividad volcánica relacionada con dinámica de fluidos.

Comportamiento del volcán de San Miguel en 2005

Resumen

En relación a la actividad hidrotermal y erosiva dentro y fuera del cráter del volcán de San Miguel, se ha observado que cada año es mas intensa. Es común observar roca alterada agrietada, color roja amarillento y la ocurrencia de pequeños derrumbes. Esto sumado a la altura del volcán y la sismicidad regional incrementan la inestabilidad estructural del volcán. Sin embargo, en 2005, el volcán mantuvo su nivel de actividad habitual, similar a años anteriores. Habla en favor de ello, el hecho de que no se registraron cambios mayores en la a actividad de las fumarolas, temperatura y abertura de grietas.
En comparación a 2004, el rasgo sobresaliente de la actividad del volcán fue la ocurrencia de enjambres de sismos de pequeña magnitud asociados a fracturamiento de rocas y tremor con paquete de eventos con forma de tornillos. Durante el ultimo trimestre del año la actividad sísmica del volcán fue mas intensa que otros meses, pero no superó los niveles de energía alcanzados en 2004.

Monitoreo sísmico.

El volcán de San Miguel presentó un total de 64,851 sismos (LP y VT), es decir, un 24.46 % menos que 2004, con un promedio de 5,404 por mes, y 180 por día. Total que resulta inferior a los 200 sismos por día que es la línea base sísmica del volcán. Ninguno fue reportado como sentido por la población que vive entorno al volcán.

Marzo, noviembre, y diciembre fueron los meses con mayor número de sismos, fluctuando entre 10,394 y 12,058 eventos por mes. Para otros meses, la sismicidad volcánica osciló entre 2,968 y 7,084 eventos (Figura 1).

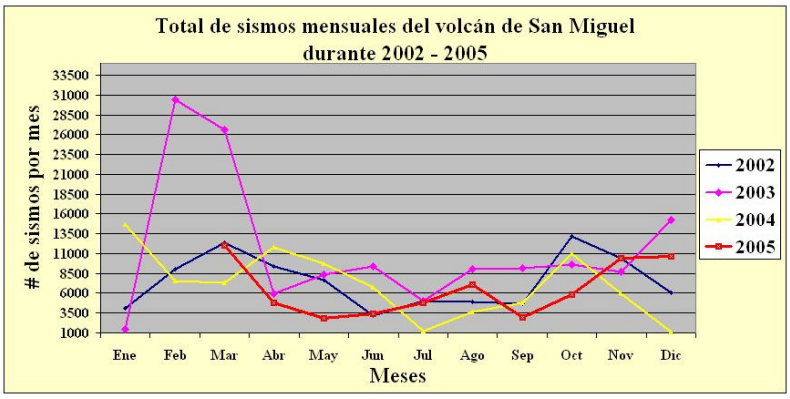


Figura 1. Se presenta el total de sismos por mes desde 2002 a 2005.

Cabe señalar que en enero y febrero se presentaron problemas técnicos en las estaciones sísmicas y no se tuvo registro. Por otro lado, lo numeroso de la sismicidad de este volcán, aun es motivo de discusión, debido a que la mayoría de sismos no presentan fases claras y ocurren en enjambres con formas distintas. Predominan los tipo tornillos y tremor. La frecuencia predominante de estos sismos fluctúa entre 2 y 8 Hz.

Lo mas relevante de la sismicidad del volcán tuvo lugar el 29 de julio y 11 y 12 de octubre, se registraron vibraciones (tremor) con paquete de microsismos de período largo (LP) relacionados con actividad hidrotermal y una serie de enjambres de sismos asociados con fracturamiento de rocas (sismos VT) propios de la zona alta del cono (Figura 2 y 3).

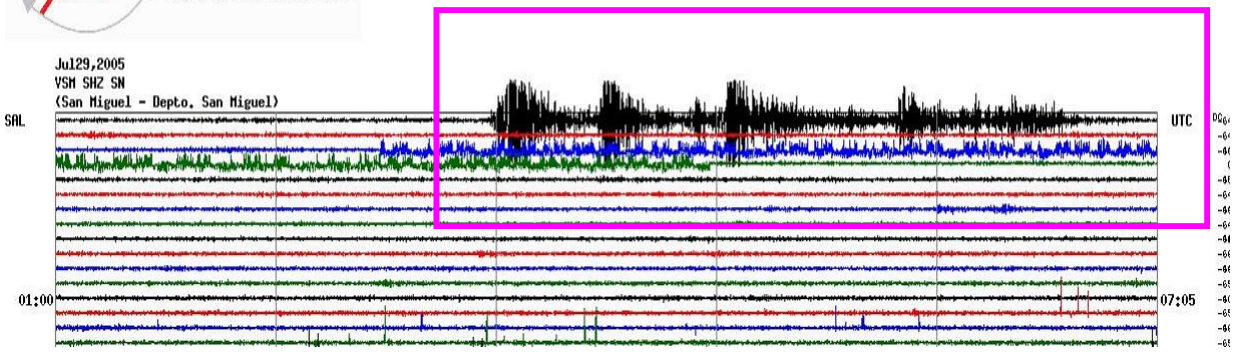


Figura 2. Sección del sismograma de la madrugada del día 29 de julio. Se presenta una vibración durante 3 minutos (Tremor), con un paquete de 4 sismos con forma de tornillos (LP).

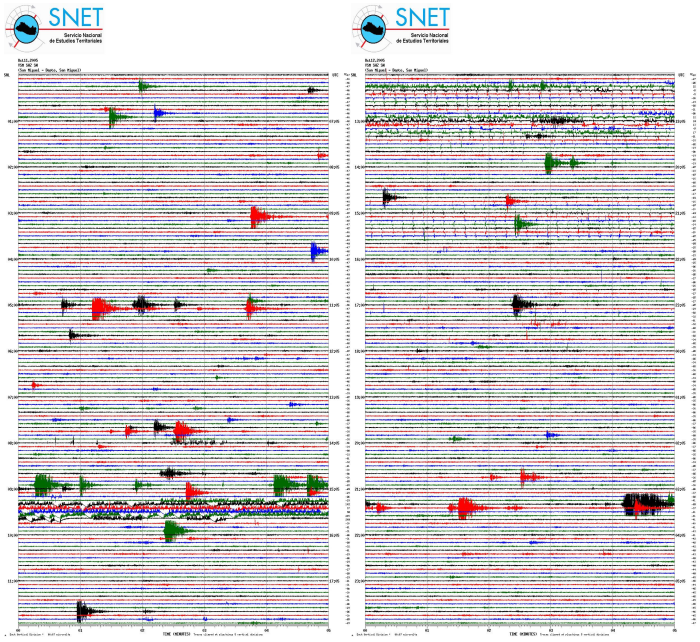


Figura 3. Sismogramas del 11 y 12 de octubre. Se observa la presencia de enjambres de sismos, algunos de ellos, relacionados con fractura de roca (VT). Otros asociados con actividad hidrotermal (LP)

Una de las características que hace diferente al volcán de San Miguel de otros volcanes de El Salvador es su alto nivel de actividad sísmica. La sismicidad del volcán es compleja por la variedad de tipo de sismos con diferentes formas, tamaños y duraciones. Uno de los tipo de sismos de este volcán son los clasificados como volcanotectónicos (VT), los cuales por su forma y arribo claro de fases son relacionados con fracturamiento de rocas (Figura 4).

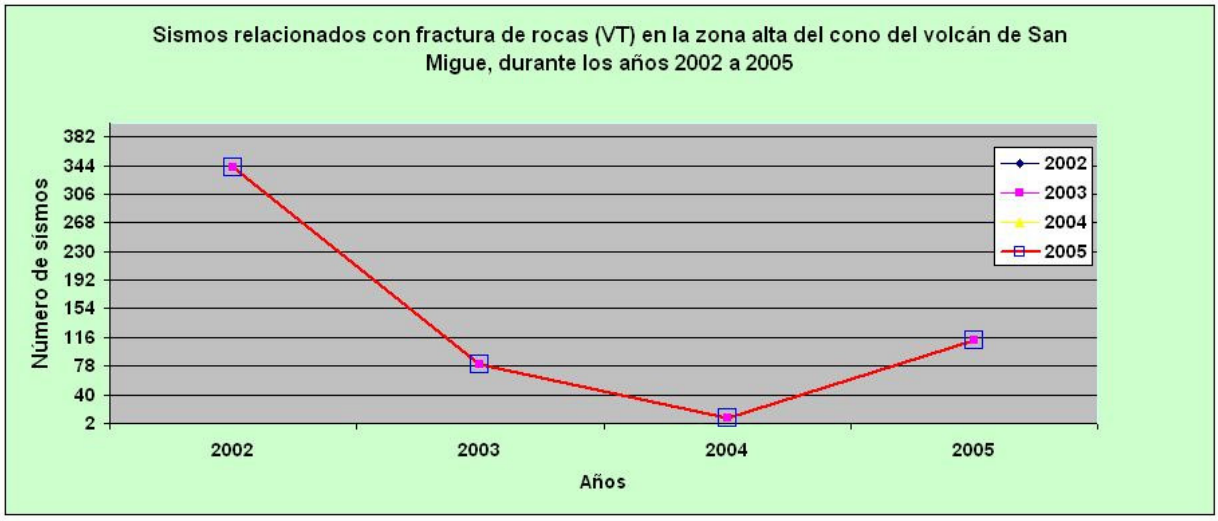


Figura 4. Total de sismos VT por año. En 2002, se registraron 344 eventos, cantidad que supera a los reportados en los años siguientes.

Con el objetivo de encontrar alguna influencia del agua lluvia en el sistema volcánico, se grafican los datos de lluvia diaria vrs Número de sismos de fractura registrados en 2005.

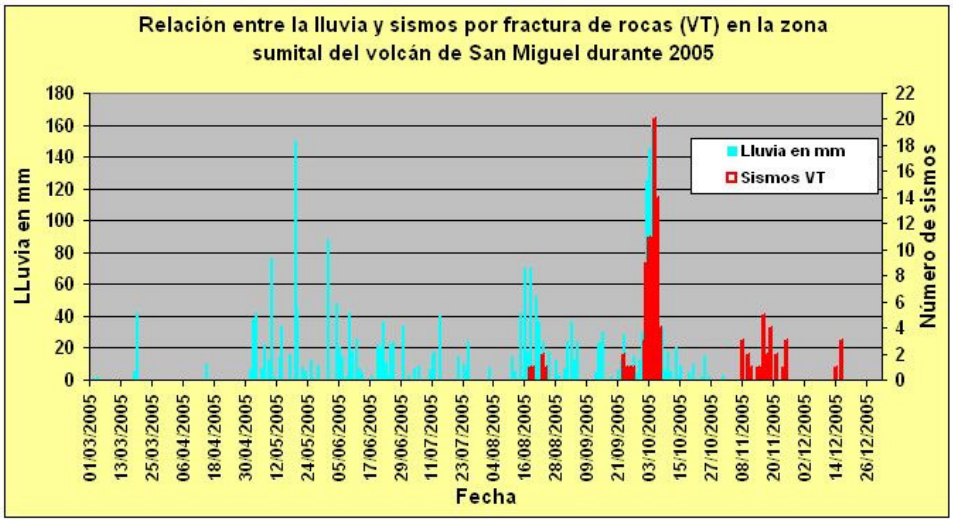


Figura 5. Datos diarios de lluvia vs Número de sismos por día. Se observa bien claro que en octubre, con la influencia de la tormenta Stan, ambos parámetros aumentaron. Datos de lluvia proporcionados por el mandador de la Finca Santa Isabel, ubicada al norte del cráter a 750 m.n.s.m

Amplitudes sísmicas RSAM: Durante 2005**,** El tamaño de las amplitudes de las señales sísmicas del volcán de San Miguel fue ligeramente menor que en 2004 (Figura 6).

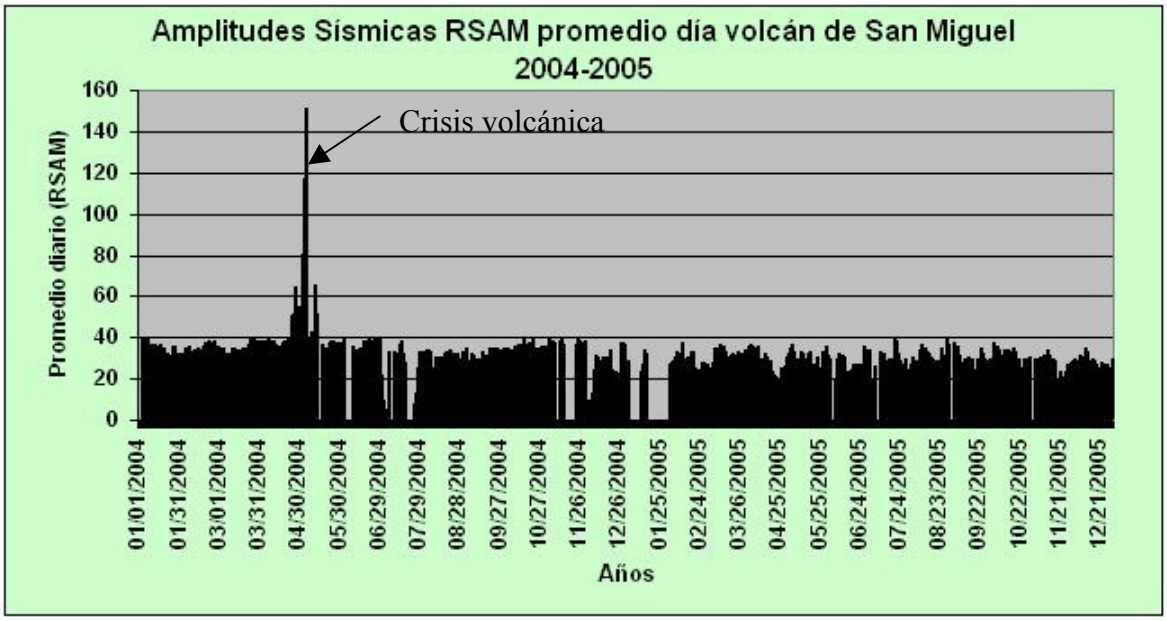


Figura 6. Comparación del nivel de energía alcanzado por el volcán en los años 2004 y 2005, en función del tamaño de las amplitudes de las señales sísmicas. Nótese el pico del RSAM debido a la crisis volcánica registrada en mayo 2004

Monitoreo visual:

Dentro del cráter, no se identificaron mayores cambios visuales, sin embargo, se observó que la roca poco a poco se reacomoda formando un pequeño embudo (Foto 1). Lo anterior es evidencia clara de subsidencia que puede vincularse con periodos de Sismicidad. Por otro lado, tampoco se registro cambio en la temperatura de las fumarolas. La emisión de gases permaneció débil durante el año.



Foto 1. Área del fondo del cráter del volcán de San Miguel mostrando subsidencia y sus fumarolas débiles.

Derrumbes y grietas

No se reportaron derrumbes de consideración, sólo pequeñas 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.

Los observadores del volcán no reportaron flujos de escombros y argumentaron que las obras físicas (muros de derivación y resumideros) de mitigación construidas en la quebrada La Arenera funcionaron bien, debido a que en 2004 fueron limpiadas por la comunidad. Tampoco se tuvo reporte de situaciones anómalas propias de la actividad del volcán.

Conclusion

Basados en el monitoreo realizado, se concluye que en 2005, a excepción del enjambre de sismos VT registrados en octubre y noviembre, la actividad del volcán fue baja comparada con 2004. De todas maneras, ante las circunstancias actuales como obstrucción del conducto por derrumbes, y poca degasificación, en cualquier momento podría ocurrir una descompresión y generar una erupción, similar a la del volcán Santa Ana, al liberarse la presión de manera instantánea.

Comportamiento del Volcán de San Salvador

El análisis de los resultados obtenidos del monitoreo indica que el volcán se encuentra activo y tranquilo, en su tiempo de reposo. La pregunta es cuando despertara, la respuesta la dará el monitoreo sistemático que se realice.

Actualmente se vigila con una estación sísmica y por toma de muestras de agua de una fuente natural ubicada en El Jabalí y los pozos de ANDA del Plantel Universitario y el pozo 4 ubicado en ciudad Merliot. También se realizan inspecciones visuales periódicas al cráter del Boquerón y al cono de escorias la Holla..

Sismicidad

La sismicidad del volcán de San Salvador sigue estable con su nivel habitual, similar a años anteriores, es decir, una media de 4-10 temblores volcano-tectónicos al mes (Ver figura 1).

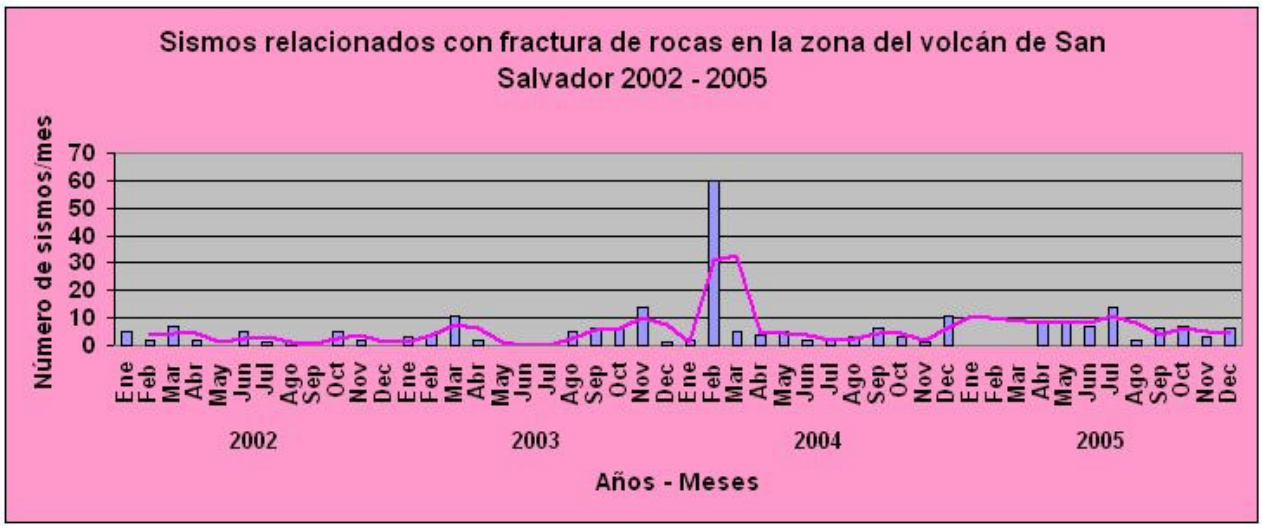


Figura 1. Total de sismos VT del volcán de San Salvador en el periodo 2002-2005. Véase el pico en febrero 2004, debido a un enjambre de aproximadamente 60 temblores con epicentros a unos 8 Km. del cráter, localizados en el flanco Sureste del volcán. Todos los eventos fueron relacionados a fractura de rocas y a pequeños movimientos de cizalla en las fallas geológicas que atraviesan al edificio volcánico.

Con respecto a 2004, la amplitud de las señales sísmicas RSAM (Figura 2) descendieron a partir de mayo 2005.

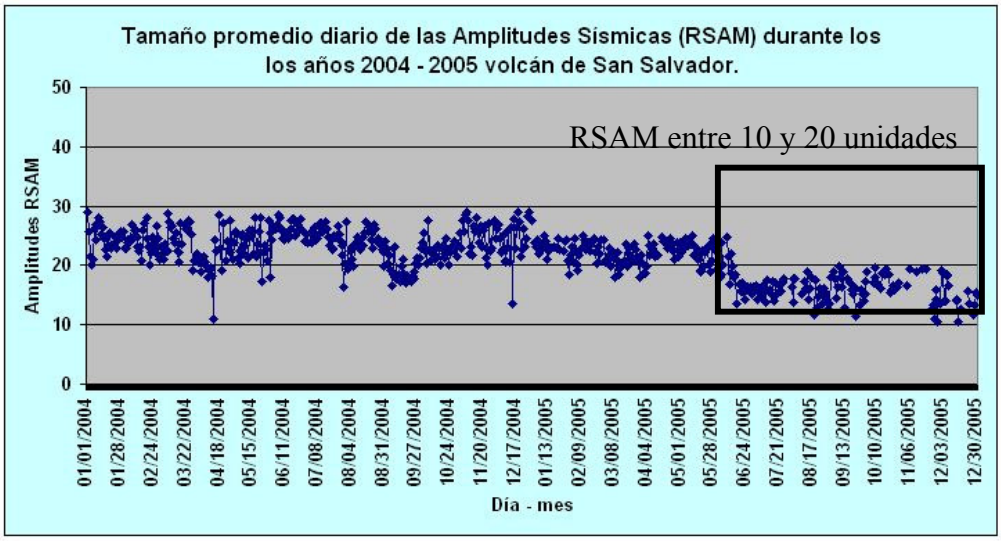


Figura 2. Se observa un descenso en la energía liberada por el volcán, a partir de mayo 2005.

Gases difusos

No se cuenta con los datos

Hidrogeoquímica

Se presenta las graficas de los resultados de los análisis químicos de las muestras de agua tomadas en Plantel Universitario y Nacimiento de agua El Jabalí.

Pozo Plantel Universitario

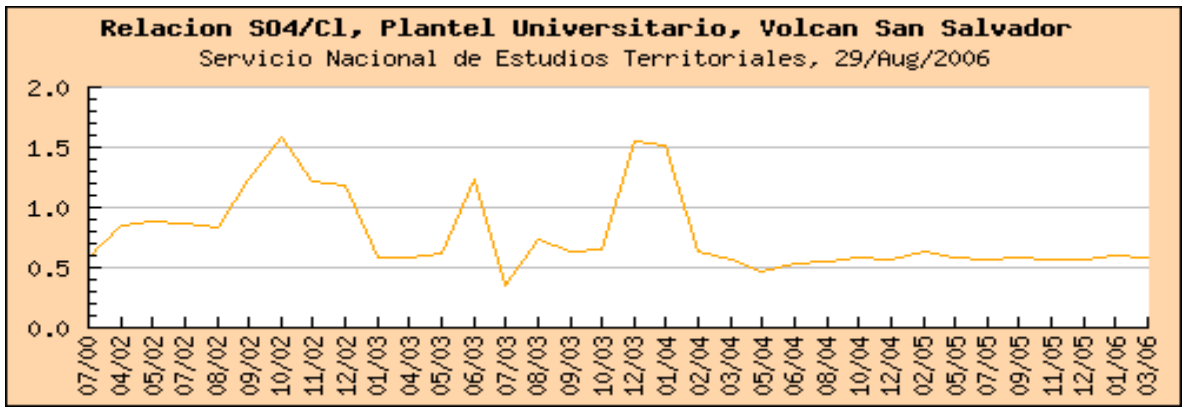


Figura 3. El monitoreo realizado desde 2002 a marzo 2006 indica que la relación sulfato/cloruro del pozo de agua ubicado en Plantel Universitario varia entre 0.4 y 1.5 y se ha mantenido bastante estable desde marzo 200 5 al presente.

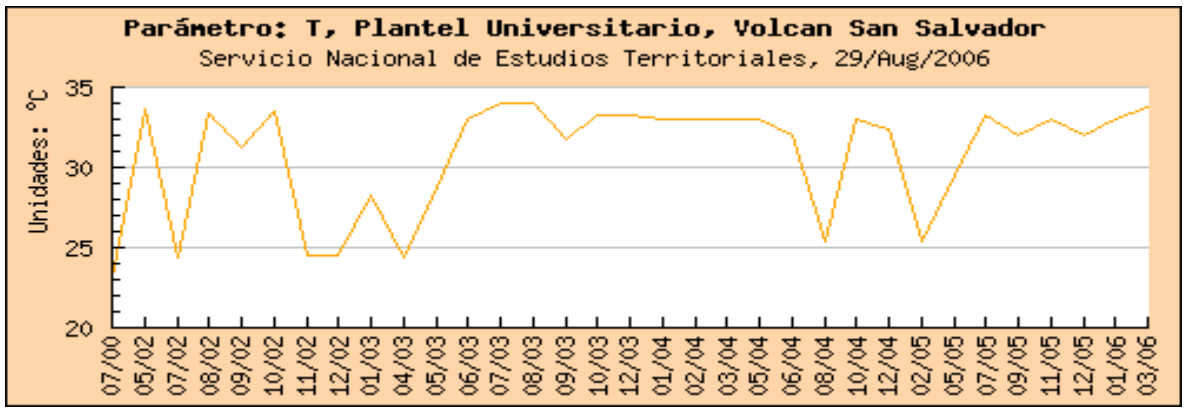


Figura 4. La temperatura del pozo de agua del Plantel Universitario varia según la época del año entre 25 y 34 º C.

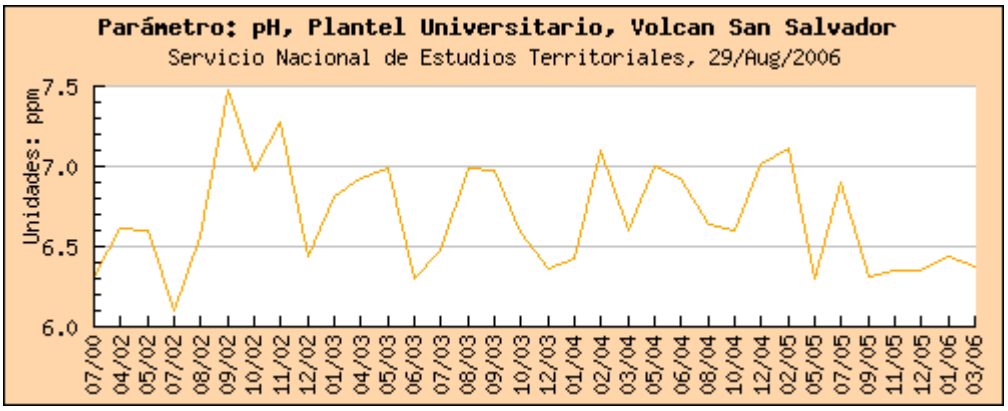


Figura 5. Acidez (pH) del Pozo Plantel Universitario, fluctúa entre 6.1 y 7.4.

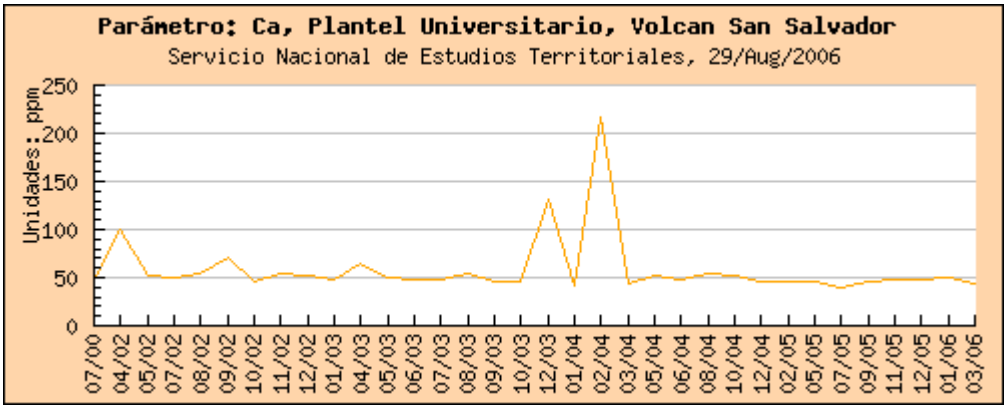


Figura 6. El contenido de calcio (ca) del agua del Pozo Plantel Universitario es bastante estable alrededor de 50 ppm. Sin embargo, en febrero 2004 se incremento sobrepasando los 200 ppm.

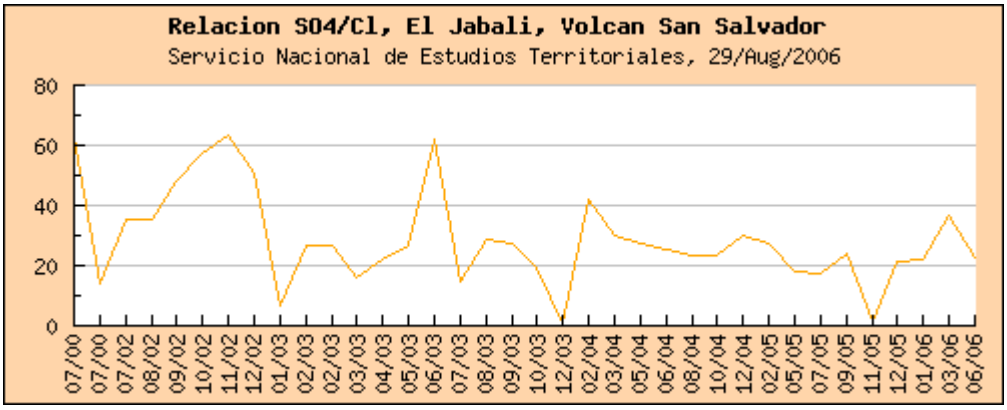


Figura 7 La relación Sulfato/Cloruro del nacimiento de agua ubicado en el Cerro el Jabalí fluctúa entre 20 y 60.

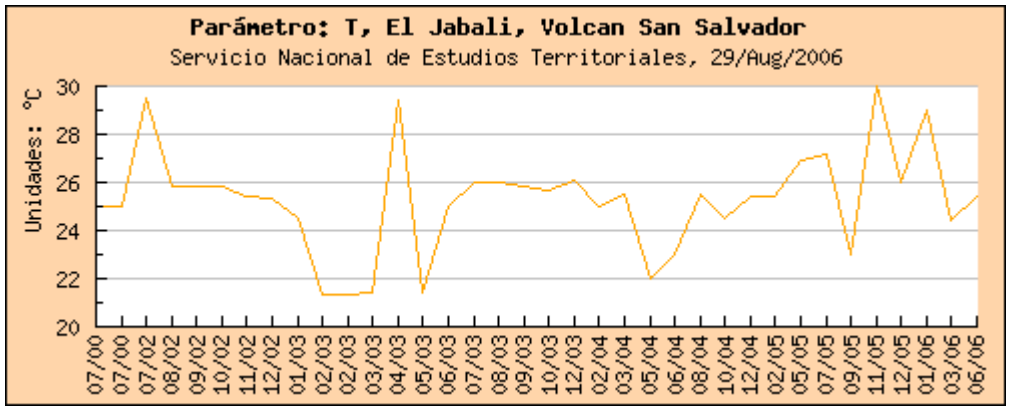


Figura 8. La temperatura del agua del nacimiento el Jabalí varia según la época del año entre 22 y 30 ° C.

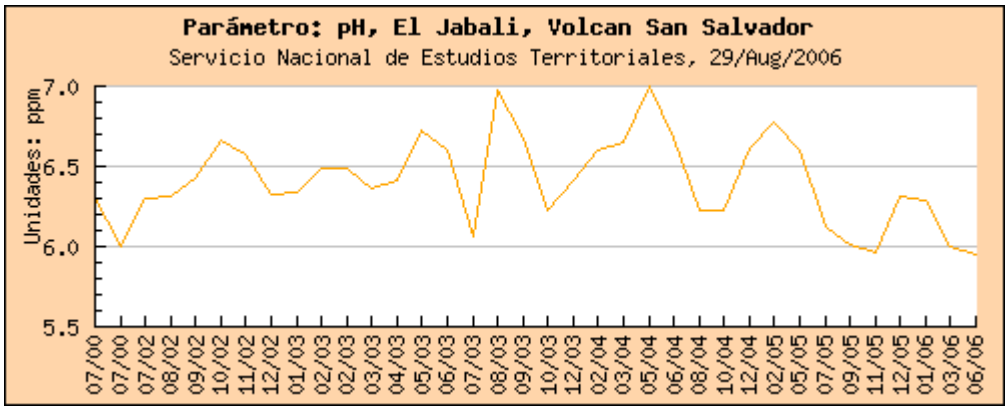


Figura 9. Acidez (pH) del nacimiento de agua El Jabalí se comporta bastante estable entre 6 y 7.

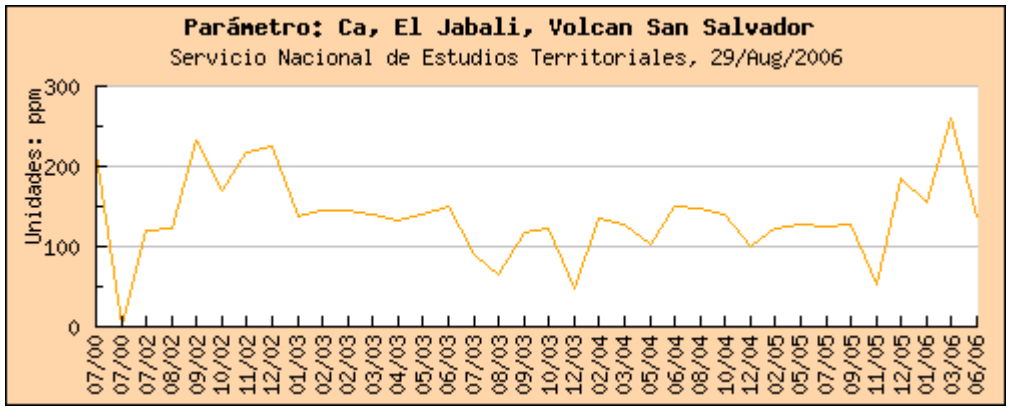


Figura 10 El contenido de calcio (ca) del agua del nacimiento El Jabalí varia entre 50 y 250 ppm.

Deformación volcánica

No se realizo medición debido a la crisis del volcán de Santa Ana

Monitoreo Visual

No se observaron cambios significativos en el volcán.

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 reposo con baja actividad. Es importante dar atención a los enjambres de temblores y sismos aislados de pequeña magnitud que a menudo ocurren, ya que temblores de baja magnitud son señales de actividad que con el tiempo puede evolucionar a una reactivación del volcán..

Comportamiento del Volcán de Izalco

No se registro cambio en ninguno de los parámetros que se vigilaron durante las inspecciones visuales y monitoreo de las fumarolas. Igual que en 2004, la actividad del volcán continua baja.

Comportamiento del Volcán de San Vicente

Actividad sísmica

La sismicidad del volcán de San Vicente se mantuvo similar al año 2004, es decir, de 1 a 4 temblores por mes (Figura 1) y entre 5 y 10 unidades RSAM. Algunos sismos fueron sentidos por la población entorno al volcán. Este tipo de temblores son relacionados con la dinámica del sistema de fallas geológicas de la zona, es decir, tienen origen tectónico, clasificados

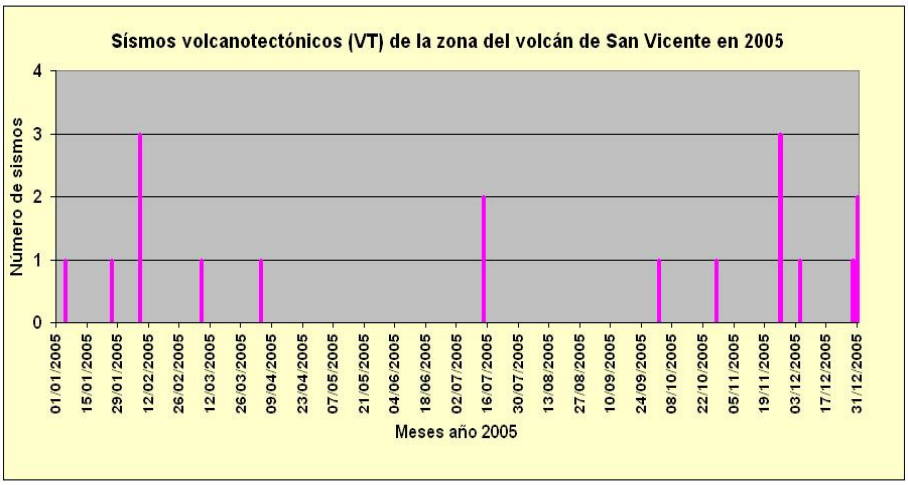


Figura 1. Sismos relacionados con reacomodo de fallas en la zona del volcán

como volcano– tectónicos (VT) por estar localizados dentro de la zona de influencia del volcán.

La energía sísmica liberada por el volcán se refleja en el tamaño de las Amplitudes RSAM (figura 2).

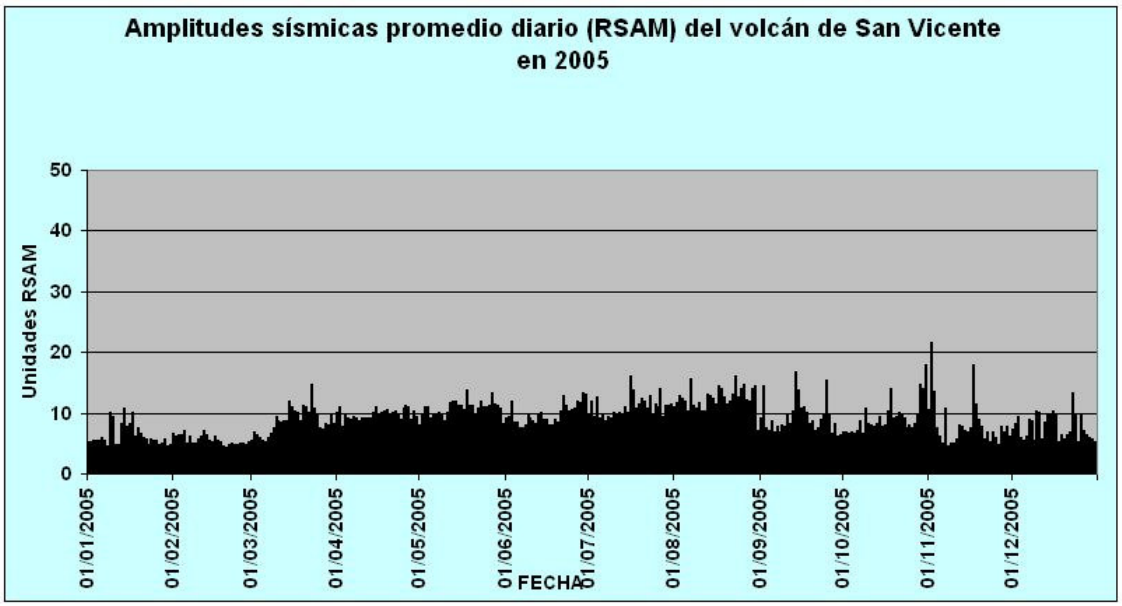


Figura 2. El RSAM del volcán de San Vicente varia entre 5 y 10 unidades. Valores mayores corresponden a nterferencias.

Hidrogeoquímica

La toma de muestras de agua y los respectivos parámetros físicos–químicos se realizó de forma continua y sistemática. Se obtuvieron los parámetros de pH, temperatura y calcio, entre otros (Ver figuras 3, 4 y 5).

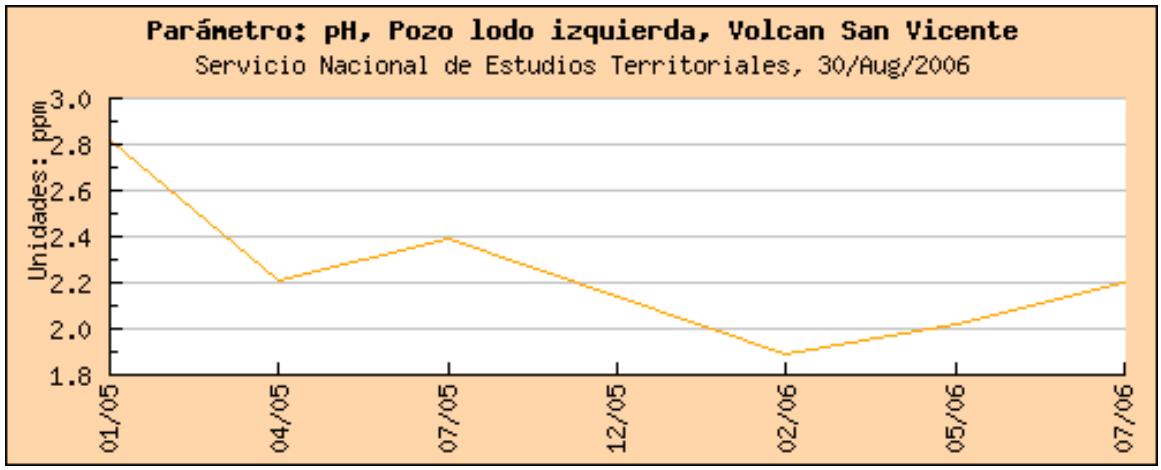


Figura 3. La acidez (pH) del pozo de lodo presenta entre 1.9 y 2.8.ppm

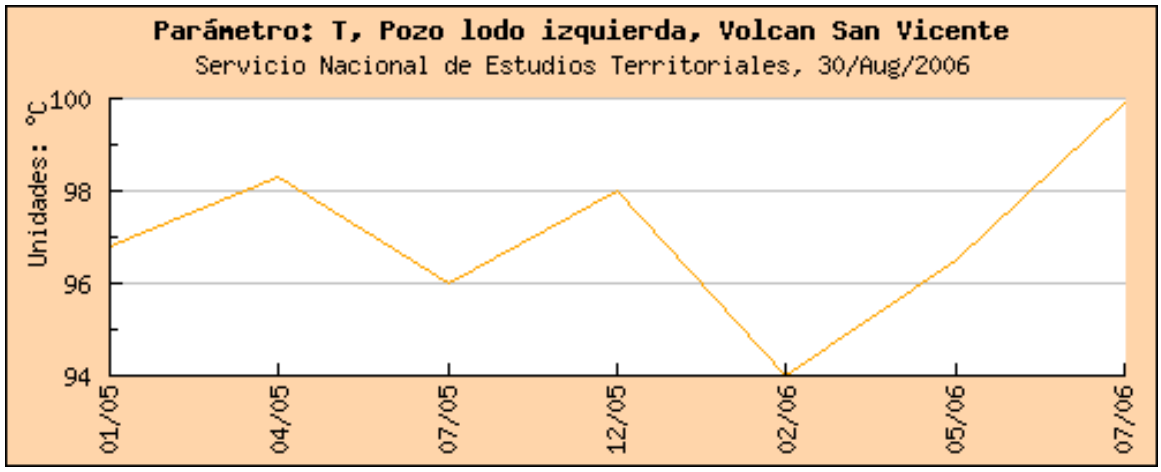


Figura 4. La temperatura del agua del pozo de lodo, ubicado a la izquierda aguas arriba, varia según la época del año entre 95 y 99 º C.

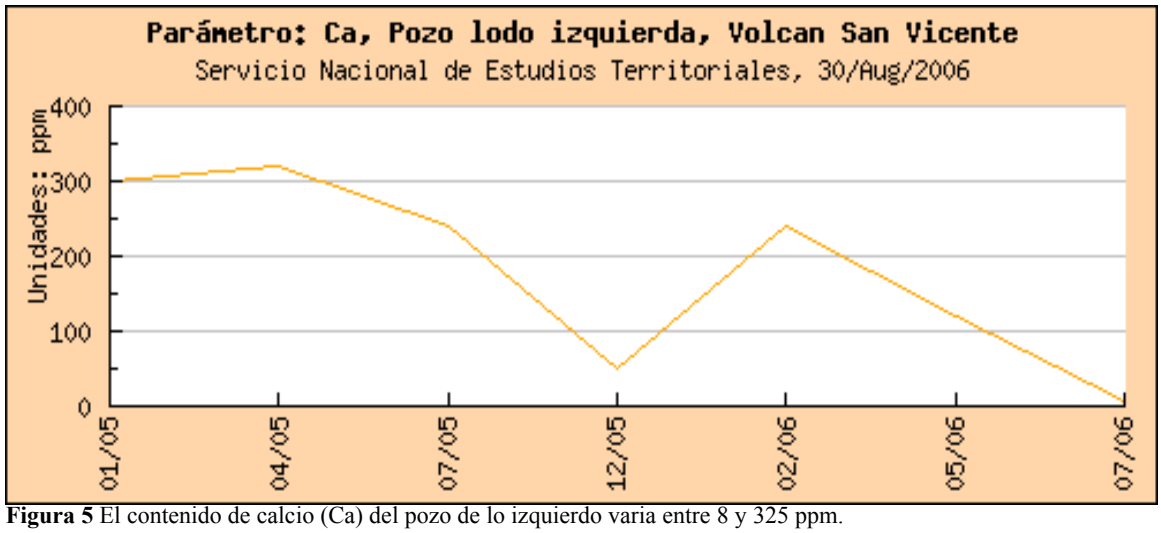


Figura 5 El contenido de calcio (Ca) del pozo de lo izquierdo varia entre 8 y 325 ppm.

Discusión

En lo que respecta a la sismicidad de la zona del volcán de San Vicente, la estación sísmica SNVI 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 entre 95 y 99 º C. Los elementos químicos fluctuaron en función de la época del año. De manera que con base al análisis del monitoreo se concluye que la actividad del volcán es baja.

Comportamiento del Volcán de Ilopango

Por las características geomorfológicas y el tipo de erupciones altamente explosivas, el volcán de Ilopango es una caldera activa y dinámica. La caldera se localiza a 14 Km. de la capital San Salvador y su última erupción ocurrió en 1880. De acuerdo a los registros la actividad fue precedida por mas de 600 temblores.

Monitoreo sísmico

En términos de energía sísmica (RSAM), la caldera de Ilopango presento un nivel similar a 2004 (Figura 1).

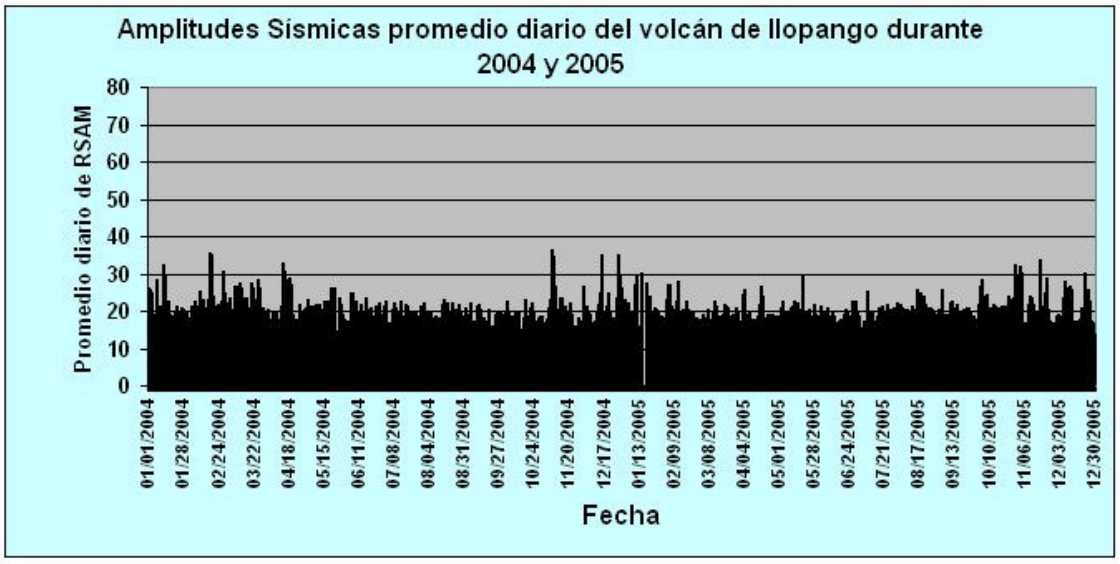


Figura 1. Durante los últimos dos años, la energía sísmica en la zona de la caldera de Ilopango ha mantenido alrededor de 20 unidades RSAM. Los picos arriba de 20 se deben a pequeñas fluctuaciones debidas a interferencias.

Se registraron 187 sismos, es decir, un promedio de 15 temblores mensuales, clasificados como volcano-tectónicos y asociados al reacomodo de fallas geológicas que afectan la zona de la caldera (Figura 2).

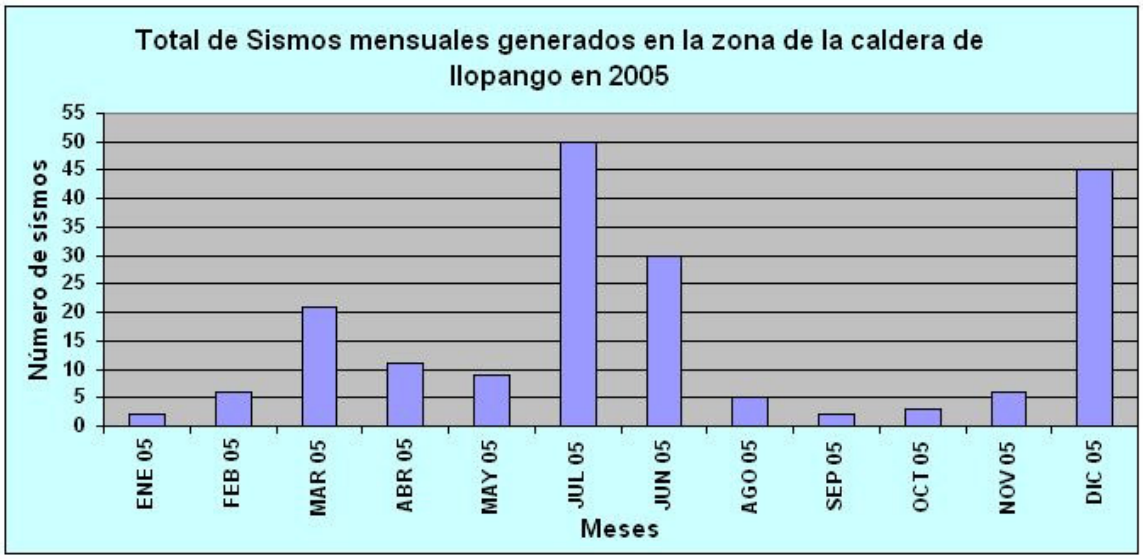


Figura 2. Sismos Volcano – Tectónicos (VT) asociados con el reacomodo de fallas geológicas que afectan la zona de la caldera de Ilopango

Discusión

El hecho que la caldera de Ilopango haya hecho su última erupción Pliniana el año 430 DC (Dull, A, et al; 2001) y que además haya presentado actividad efusiva en 1880 (Goodyear, 1880) permite interpretar que se trata de un sistema potencialmente activo y peligroso para el país.

Referencias

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

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.