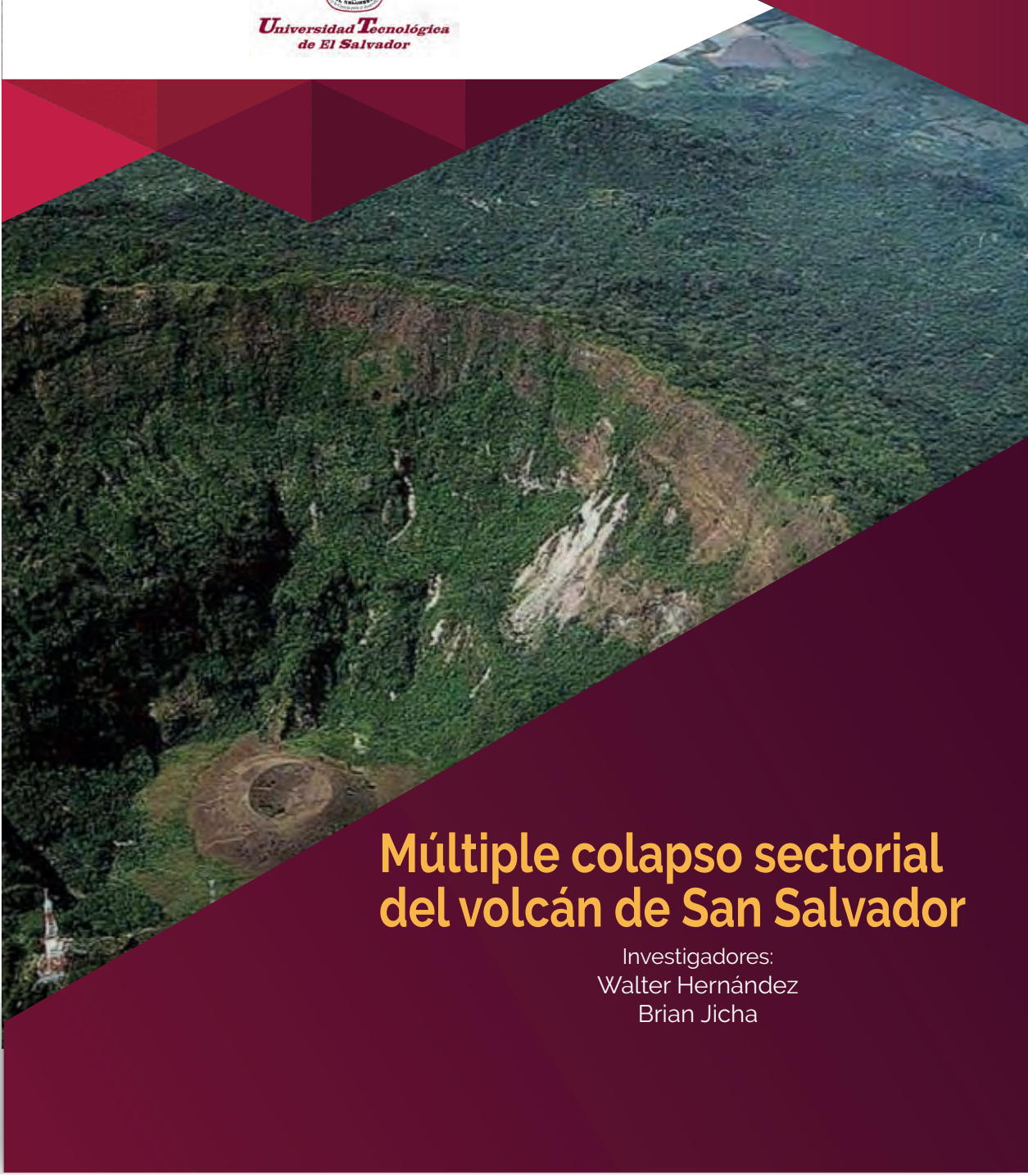
COLECCIÓN INVESTIGACIONES 86

Universidad Tecnológica de El Salvador



Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador

Investigadores:
Walter Hernández
Brian Jicha



Universidad Tecnológica de El Salvador

Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador

Investigadores:
Walter Hernández
Brian Jicha

La presente investigación fue subvencionada por la Universidad Tecnológica de El Salvador. Las solicitudes de información, separatas y otros documentos relativos al estudio hacerse a la dirección postal: calle Arce, 1020, Universidad Tecnológica de El Salvador, Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social, Dirección de Investigaciones, calle Arce y 19.ª avenida Norte, 1045, edificio *Ing. José Adolfo Araujo*, 2.ª planta, o whernandez@geologist.com



San Salvador, 2019
© *Copyright*
Universidad Tecnológica de El Salvador

363.349 597 284 12
H557m Hernández Guevara, Edgardo Walter, 1955-
Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador / Walter
sv Hernández, Brian Richard Jicha. -- 1ª ed. -- San Salvador, El Salv. :
Universidad Tecnológica de El Salvador, 2019.
74 p. : il. ; 23 cm. -- (Investigaciones ; v. 86)

URI http://hdl.handle.net/11298/1105
ISBN 978-99961-86-17-2

1. Cenizas y tobas volcánicas-Investigaciones. 2. Volcanes-San Salvador, El Salvador-Investigaciones. 3. Desastres naturales. I. Jicha, Brian Richard, 1977- coaut. II. Título.

BINA/jmh

Autoridades Utec

Dr. José Mauricio Loucel
Presidente Utec y Rector Honorario Vitalicio

Lic. Carlos Reynaldo López Nuila
Vicepresidente

Ing. Nelson Zárate Sánchez
Rector

Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador

Walter Hernández
Brian Jicha

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social

Licda. Noris Isabel López Guevara
Vicerrectora de Investigación y Proyección Social

Dra. Camila Calles Minero
Directora de Investigaciones

Noel Castro
Revisión y corrección

Mauricio Gálvez
Diseño de carátula

Fotografía de carátula: www.shutterstock.com

Licda. Evelyn Reyes de Osorio
Diseño y diagramación

PRIMERA EDICIÓN
150 ejemplares
Agosto, 2019

Impreso en El Salvador
Por Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19 Av. Norte, nº. 125, San Salvador, El Salvador
Tel.:(503) 2275-8861

Resumen

La morfología del volcán de San Salvador (VSS), con la sobresaliente ladera El Picacho, induce a pensar que el primitivo volcán fue altamente deformado. Estudios previos se refieren a que una gran erupción, que produjo el depósito G1 (Gris 1) de 30 ka, vació la cámara magmática y causó el colapso de la parte sumital del volcán, formando una caldera elíptica de 6x4.5 km. Pero el trabajo directamente sobre el colapso no se había hecho; y esta es la importancia de la presente investigación que, al realizarlo, logró identificar los depósitos de las avalanchas de escombros invisibilizados por la cobertura de las tefras de erupciones de las calderas vecinas de los lagos Coatepeque e Ilopango, y también del mismo volcán Boquerón que se anidó en esa caldera. La ubicación de los depósitos de las avalanchas de escombros y sus edades relativas hace pensar en que estos eventos son los causantes de la morfología del VSS y no así el evento G_1. Los trabajos de campo se focalizaron en el levantamiento de secciones estratigráficas en las quebradas más profundas alrededor del volcán; en la observación de núcleos de perforación; en excavaciones profundas para construcción de edificios; en cortes profundos en obras viales y en la apertura de trincheras.

Este trabajo permitió obtener datos estratigráficos, espesores, características de los clastos, facies, toma de muestras para laboratorios de química de rocas y geocronología del estrato superior e inferior, y de los escombros también. La forma original del estratovolcán de San Salvador (~2.700 msnm) se perdió debido a múltiples colapsos sectoriales que comenzaron hace ~75 ka y finalizaron <62 ka, ocurriendo bastante antes que la erupción G_1. Se desconoce si el primer colapso de sector está asociado con una erupción, pero los dos últimos no lo están. El ambiente tectónico regional de régimen de cizalla transtensivo y una combinación de factores como basamento inclinado, presencia de fallas, carga del macizo volcánico, alteración hidrotermal y terremotos pudieron ser la causa de los colapsos que generaron los depósitos de avalanchas de escombros.

Índice

1. Introducción 7

2. Localización y rasgos geológicos de la zona de estudio 8

3. Objetivos 10

3.1. *Alcances* 10

3.2 *Metodología* 11

4. Antecedentes 12

5. Condición tectónica de la región 14

5.1 *Afloramientos* 17

5.2 *Geología del área de estudio* 18

5.3 *Ignimbrita Escalón* 21

5.4 *Basamento del edificio volcánico* 25

5.5 *La base de la avalancha de escombros* 28

5.6 *Factores asociados a un colapso volcánico* 29

6. Múltiple colapso del volcán San Salvador 30

6.1 *Primer colapso* 31

6.2 *Segundo colapso* 33

6.3 *Tercer colapso* 34

7. Formación de la caldera 37
7.1 *Mapa de isopacas de la avalancha de escombros* 39
7.2 *Características de los clastos* 39
7.3 *Movilidad de la avalancha de escombros* 41
7.4 *Petrografía* 42
7.5 *Difracción de rayos X* 44
8. Volcanismo poscolapso 45
8.1 *Volcanismo monogenético* 46
9. Discusión 47
10. Conclusiones y recomendaciones 49
Agradecimientos 50
Referencias 51
Breve hoja de vida de los investigadores 59
Colección Investigaciones 2003-2019 60

1. Introducción

El Arco Volcánico Centroamericano se extiende por 1.100 km, desde el sur de México hasta el norte de Panamá, y está paralelo a la fosa mesoamericana (Carr et al., 1984). La cadena volcánica se ha emplazado en los bordes o en el interior del graben, con un ancho promedio de 10 a 40 km, que se extiende longitudinalmente paralelo a la costa pacífica (Carr y Stoiber, 1977). El área metropolitana de San Salvador (AMSS) está construida entre las laderas del volcán San Salvador y la caldera de Ilopango, donde viven cerca de 2 millones de habitantes. Tiene una densidad poblacional de 2.067 habitantes/km2, distribuidos en 14 municipios del AMSS (Digestyc, 2007). La presión pública sobre la tierra y la carencia de un ordenamiento del territorio han hecho que la población invada las laderas del volcán, aumentando así la exposición al riego ante cualquier evento natural que, por pequeño que sea, puede causar daños a los habitantes y a la infraestructura. Cuando una porción de un edificio volcánico colapsa, puede generar una mezcla de escombros insaturada de rocas y finas partículas que se le llama *avalancha de escombros* (AE). Esas avalanchas son flujos granulares muy rápidos, que generalmente resultan en un deslizamiento gigante que ocurre de una parte inestable de un edificio volcánico maduro, especialmente alrededor de estratovolcanes poligenéticos de larga vida (Németh and Martin, 2007). Las AE son amenazas volcánicas no muy frecuentes. Sin embargo, el colapso de un edificio volcánico representa uno de los escenarios más catastróficos y fenómenos comunes asociados con la evolución de un volcán; y pueden suceder de repente.

Las AE son de gran volumen que alcanzan algunos km3, que se forman a partir de la porción inestable del volcán que se desploma, viajando a gran velocidad (de 50-150 km/h), destruyendo todo a su paso: población e infraestructura. Estas AE pueden viajar largas distancias. Por ejemplo, el volcán de Santa Ana (El Salvador) colapsó y la avalancha alcanzó un recorrido mayor que 50 km. Esa AE modificó la línea costera, produciendo un avance de 7 km mar adentro, formando así la península

de Acajutla (Pullinger, 1998; Siebert et al, 2004). Como resultado de ese evento, debe haberse producido un tsunami. La morfología del actual VSS carece de la forma cónica propia de un estratovolcán. No se sabe cómo era la forma de la cima de este volcán, que alcanzara aproximadamente 2.700 metros sobre el nivel del mar (msnm); y después de que se desplomara el edificio, una caldera se formó [6x4.5 km] (Wiliams & Meyer-Abich, 1955; Meyer-Abich, 1956; Fairbrothers et al., 1978; Italtekna-Itaconsult, 1988; Sofield, 1998, 2004; Major et al., 2001; Sebesta, 2007; Ferrés, 2014). El desplome del volcán no ocurrió en un solo evento. Evidencias de campo indican que colapsó en tres eventos principales, iniciando hace ~75 ka y finalizando <62 ka. Los nombres *Volcán de San Salvador* y *volcán Boquerón* son utilizados como sinónimos para referirse a todo el complejo volcánico (Meyer-Abich, 1956), por tanto, Boquerón debería ser usado para referirse al volcán más joven, cuyo cráter tiene 1.5 km de diámetro, que se ha establecido en el interior de la caldera del antiguo VSS.

2. Localización y rasgos geológicos de la zona de estudio

El VSS está situado entre las calderas de Coatepeque (oeste) y de Ilopango (este), estando a 32 km de la primera y a 21 de la segunda (figura 1). La ciudad San Salvador está situada entre esas estructuras volcánicas. El VSS cuenta con 24 volcanes monogenéticos, los cuales se han emplazado en los últimos 3 ka (Sofield, 1998, 2004; Ferrés et al., 2011; Ferrés, 2014). La mayoría son conos de escorias; otros son cráteres de explosión y anillos de tobas. Varios están alineados por distintos sistemas de fallas. El Picacho y El Jabalí son remanentes del antiguo edificio volcánico y están conectados por una caldera de 6x4.5 km de forma elíptica. Un rasgo morfológico importante de las avalanchas de escombros es el relieve monticular que desarrollan cerca del volcán, pero en este caso ese rasgo no es visible porque está sepultado por varios depósitos volcánicos.

El Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés), con base topográfica 25.000 y curvas a nivel de cada 10 m, no permite su visualización de ese rasgo topográfico. Sin embargo, con el empleo del

reciente DEM con tecnología Lidar (*Light Detection and Ranging*), ha sido posible observar una pequeña área, en la parte alta de la colonia Escalón, con rasgos que sugieren que se trata de montículos. Los depósitos de Ilopango son de composición félsica y tienen grandes espesores y volúmenes. Esos depósitos han modelado el terreno y yacen en la parte central del Graben Central de El Salvador. Se acumulan más en la zona proximal y poco en la distal de la caldera de Ilopango, produciendo una superficie inclinada hacia el occidente; y algunos depósitos alcanzan la planicie del valle de Zapotitán (Hernández et al., 2009). Sobre ese terreno inclinado creció y se desarrolló el VSS (figura 1). Las cenizas y la piedra pómez de caída, ricas en biotita, productos de la erupción pliniana Arce de la caldera Coatepeque, situada a 32 km al oeste del VSS, han jugado un papel muy importante como marcador del tiempo, en el esfuerzo de comprender cuándo colapsó el volcán.



Figura 1. Localización del volcán de San Salvador entre las calderas de Ilopango y de Coatepeque. Dentro de esa área se encuentran las calderas Jayaque y Planes de Renderos, además de los volcanes Guazapa, Nejapa, Guaycume, El Chagüite y el complejo volcánico San Jacinto. Hacia el sur la cordillera del Bálsamo mientras que el área metropolitana de San Salvador se localiza alrededor del volcán.

3. Objetivos

Los objetivos de este estudio son los siguientes: a) Delimitar cuándo y cómo ocurrió el colapso y cuál fue la causa (erupción volcánica, actividad tectónica, intrusión de lava). b) Evaluar las hipótesis de otros autores, que sostienen que la erupción G1 es la causa del colapso del VSS. c) Elaborar un mapa preliminar de la avalancha de escombros para la zona urbana de San Salvador, Colón, Santa Tecla, Mejicanos y Ayutuxtepeque. d) Presentar mejoras al mapa geológico de la zona de estudio.

3.1. *Alcances*

El estudio acerca del colapso del VSS ha sido realizado en las partes norte, sur y sureste del volcán, donde ha sido posible observar la avalancha de escombros, ya sea mediante la exposición en las quebradas profundas, obras en construcción, cortes de carreteras y la observación de testigos de perforación; y también se han hecho trincheras en sitios seleccionados. La parte suroeste del volcán, cerca de Lourdes, Colón, carece de quebradas profundas; y la parte noroeste está cubierta por lavas del VB. Para estas localidades, trincheras profundas o perforaciones de pequeño diámetro son requeridas para proveer información acerca de la AE. Para el primer caso, debe emplearse más trincheras y más profundas, y a largo plazo, contar con información de perforaciones con núcleos de perforación. Ambos casos están fuera del alcance del presente presupuesto. El mapa contiene las isopacas de las avalanchas con aquellos espesores que ha sido posible medir. Debido a que varios depósitos piroclásticos han cubierto las AE, a tal punto de que ni el relieve monticular existe, por lo tanto, se presentan solamente las isopacas de los espesores medidos.

4.2. *Metodología*

Varios autores creen que el colapso del VSS fue provocado por la erupción G_1. Se realizó un estudio cuidadoso de afloramientos alrededor del VSS para determinar, en la secuencia estratigráfica, donde está ubicado el depósito de la avalancha. Se elaboró un inventario de afloramientos en quebradas profundas en las laderas del volcán y en construcciones recientes y antiguas, las cuales fueron evaluadas. Se determinaron las características del depósito: espesor, tamaños, forma de los clastos y presencia de matriz; presencia de fracturas internas en los bloques y de alteración hidrotermal. Información relacionada con núcleos de perforación y de informes de perforación con recuperación de testigos, fue también utilizada. Las excavaciones profundas en grandes edificaciones proveen la oportunidad de observar la estratigrafía y de reconocer nuevas unidades como Ignimbrita Escalón, Tierra Blanca 6 (TB6), y la lava andesítica subyacente a esta. Trincheras fueron excavadas en puntos seleccionados para buscar los escombros asociados con las avalanchas y los depósitos volcánicos en contacto con estas.

Dataciones $^{40}Ar/^{39}Ar$, en lavas arriba y debajo de la avalancha de escombros, así como también en bloques de escombros, fueron realizadas en el laboratorio geocronológico de la Universidad de Wisconsin-Madison. Análisis de química de roca total fueron elaborados en la Universidad de Washington State. Un análisis de ^{14}C se llevó a cabo en el laboratorio de Beta-Analytic, Florida, en un trozo de rama carbonizada encontrado en la ignimbrita del evento G_2, del VB. Los análisis petrográficos y de DRX se realizaron en el laboratorio de LaGeo, Santa Tecla, para determinar la litología, las características petrográficas y el grado de alteración hidrotermal. La disposición de imágenes del modelo de elevación digital de 1 metro de resolución con tecnología Lidar, con captura de datos de 2014, ha facilitado la identificación de las múltiples fallas de colapsos, conitos de escorias, bocas eruptivas contiguas al cerro La Hoya y un cráter de explosión en la ladera oriental del Boquerón. Además, ha sido posible observar un pequeño sector de la colonia Escalón con rasgos de relieve de montículos. Esta información ha servido para elaborar la cartografía preliminar de la avalancha de escombros y su delimitación alrededor del edificio volcánico. Los

análisis químicos de las muestras ayudarán a determinar si las rocas pertenecen al VSS o al Boquerón, o a otro centro eruptivo.

4. Antecedentes

Muy pocos trabajos hacen referencia a la avalancha de escombros del volcán San Salvador. Williams y Meyer-Abich (1955) hacen el primer mapa de reconocimiento del VSS; y Meyer-Abich (1956) hace mención de los cerros El Jabalí y El Picacho, entre los cuales se formó la caldera ovalada con diámetros de 6x5 km. Fairbrothers et al. (1978) estudiaron la secuencia de las lavas andesíticas del VB, que representan una parte importante en la evolución del complejo volcánico San Salvador y presentan un esbozo el colapso del volcán. Italtekna-Italconsult (1988) considera a la erupción G_1 de volumen cualitativamente bastante grande y de composición dacítica-riodacítica, sugiriendo que los procesos diferenciados bastante desarrollados al interior de la cámara magmática son suficientes para haber originado el colapso de la parte sumital. Además, enfatiza que se debe considerar con cuidado los peligros ligados a la inestabilidad de los flancos del volcán, aun cuando estos fenómenos no pueden tener ninguna relación con la actividad volcánica. Frullani (1989), en su estudio de las Tobas Color Café, las subdivide, de la base al techo, en TB_4, G_1, TB_3, TB_2 y TBJ. El también considera que G_1 proviene del VB y no el VSS.

Sofield (1998) divide la evolución del VSS en 8 etapas, de las cuales en la etapa 2 el volcán alcanzó la altura crítica cercana a los 3.000 msnm hace unos 35 ka; en la etapa 3, la erupción explosiva dacítica G_1 produjo el colapso del edificio (volumen de 1.7-8 km^3). En la etapa 4 empieza la construcción del VB, entre 30 ka y 3ka. Reconoce también que el VSS es susceptible a colapsar nuevamente, porque posee una ladera empinada y la alteración hidrotermal incrementa la susceptibilidad a deslizarse por debilitamiento de la masa de roca estable. Major et al. (2001) indican que la erupción G1 marca un episodio significativo de actividad explosiva por su naturaleza dacítica y que el volumen de 2 a 8 km^3 de los flujos y oleadas piroclásticas de G_1, de la erupción explosiva podría haber sido la causa de la destrucción significativa del antiguo edificio del VSS, con la consecuente formación de la caldera definida por

los cerros El Picacho y El Jabalí. Las erupciones posteriores produjeron lavas y tefras que construyeron el cono El Boquerón. Pérez et al. (2004) determinaron que el VSS emite pequeñas cantidades de CO2 difuso, así como valores relativos muy bajos de radón (222Rd), en comparación con otros volcanes activos. La mayor parte de la desgasificación difusa se localizan en cuatro zonas: a) en el sector NE del VB; b) dentro de la depresión producida por el colapso del antiguo VSS, c) cerca de la posible intersección de las fracturas NNW-SSE y NW-SE y d) en las fumarolas del cerro La Hoya.

Kutterolf et al. (2008) indican que la edad de VSS es de 100 ka. Hernández (2008) presenta la estratigrafía volcánica y la interestratificación entre los productos eruptivos del VSS y del Ilopango en el AMSS. Posteriormente, Hernández et al. (2010) presentan una correlación de tres perfiles estratigráficos. El perfil localizado en la quebrada Arenal de Monserrat muestra la secuencia estratigráfica donde aparece la avalancha de escombros no asociada con el G1, y es mucho más antigua que TB4. Ferrés (2014) sostiene una idea similar a la de los autores anteriores, relacionando el G1 que produjo el desplome del volcán y que marca el inicio de la construcción del VB. Plaza-Mulas (2013) caracteriza la falla Guaycume, con dirección WNW-ESE, de cinemática transcurrente dextral y con una componente normal, que se localiza al norte del VSS y muy cerca de los conos Nejapa y Guaycume. La falla tiene 30 km de largo y considera que el terremoto de magnitud Mw 6.4, del 7 de junio de 1917, fue uno de los más destructivos de la región; y podría estar asociado con la falla Guaycume. Rodríguez de Gaspar-Fernández (2015) realiza el estudio morfotectónico del VSS y su relación con la tectónica y la sísmica. Sostiene que todas estas observaciones, llevadas a cabo con la red de GPS, indican que, a pesar de no mostrar evidencias externas claras asociadas con emisiones observables de material, el volcán se encuentra en un período de actividad latente.

5. Condición tectónica de la región

La región centroamericana se caracteriza por la triple convergencia de las placas tectónicas de Cocos, Caribe y la de Norteamérica. Estas dos últimas están interactuando por el sistema de fallas de desgarre Motagua-Polochic con movimiento lateral izquierdo; y este sistema tiene el distintivo de estar arqueado. Mientras que la placa de Cocos subduce a la placa del Caribe de forma oblicua con una velocidad de 73-84 mm/año (DeMets, 2001). La convergencia así configurada distribuye la deformación tectónica a una región muy amplia (Lyon-Caen et al., 2006) [figura 2]. DeMets (2001) sostiene que la convergencia oblicua entre las dos placas favorece una partición de la deformación entre la compresión ortogonal a la fosa y la deformación del desgarre paralela al arco volcánico, lo que induce el movimiento hacia el noroeste del bloque del antearco con respecto a la placa Caribe, con una velocidad estimada del antearco en ~14 mm/a.

Staller (2014) hace varias consideraciones y reconoce que la oblicuidad, a lo largo de la trinchera mesoamericana, es más pequeña comparada con otros márgenes convergentes también oblicuos. La poca oblicuidad en dirección de la subducción no es suficiente para generar la fuerza requerida para provocar el movimiento del antearco paralelo a la fosa, como proponía DeMets (2001). Hay algunas hipótesis sobre el movimiento del antearco centroamericano (CAFA): 1) convergencia oblicua entre las placas de Cocos y del Caribe (DeMets, 2001); 2) la colisión de la dorsal de Cocos en Costa Rica empuja el antearco hacia Nicaragua (LaFemina et al., 2009; Kobayashi et al., 2014); 3) el movimiento del antearco hacia el occidente es causado por el pinzado de placa de Norteamérica en la triple unión difusa, la que arrastra el CAFA debido al movimiento de la placa de norteamericana (Lyon-Caen et al., 2006; Álvarez-Gómez et al., 2008).

Álvarez-Gómez et al. (2008) argumentan que el escaso acoplamiento de la interface de la subducción de la placa de Cocos, frente a las costas de El Salvador y Nicaragua, debe haber otras fuerzas que ejerzan el desplazamiento del antearco salvadoreño y nicaragüense. Consideran que tales fuerzas derivan de que el bloque antearco esté acuñado o pinzado a la placa norteamericana en la unión del punto triple difuso

de las placas frente a las costas de México donde sí existe acople. Como consecuencia, al no haber acople entre el segmento del antearco de El Salvador-Nicaragua, no habría resistencia y el antearco sería arrastrado en dirección noroeste en relación con la placa del Caribe. Para el caso del antearco nicaragüense, LaFemina et al. (2009) y Kobayashi et al. (2014) proponen que el empuje ortogonal ejercido por la dorsal de Cocos en la península de Nicoya es el responsable del movimiento del antearco nicaragüense hacia el noroeste, correspondiendo a lo que llaman *escape tectónico*. En el bloque Chortis se localizan Honduras, El Salvador, la parte sur de Guatemala y la mayor parte de Nicaragua (Mann et al. 2007).

Las condiciones combinadas del movimiento del antearco, el movimiento sinestral y la forma arqueada del sistema de fallas Motagua-Polochic serían las responsables de producir esfuerzos extensionales al sur del sistema Motagua-Polochic, que se proyecta hacia el bloque Chortis, produciendo grábenes y *horsts* con rumbos N-S (graben de Ipala), NNE-SSW (graben de Guatemala) y NNW-SSE (grábenes de Ocotepeque y Comayagua) [Guzmán-Speziale, 2001; Roger et al., 2002; Álvarez-Gómez, 2009; Rodríguez et al., 2009; Alonso-Henar, 2015]. Hay cerca de una docena de esos pequeños *rifts* de edades del mioceno al holoceno (Guzman-Speziale, 2001; Roger et al., 2002; Rodríguez et al., 2009). La depresión que se extiende paralela a la costa de Centroamérica fue generada por la ruptura y separación por el proceso de *roll-back* de la subducción de la placa Farallón bajo las placas de Norteamérica y del Caribe (Roger et al., 2002; Mann et al., 2007; Canora et al., 2014; Alonso-Henar et al., 2015). Esta depresión centroamericana tiene ancho variable de 20-40 km y es discontinua.

El graben tuvo su formación entre 10 y 3.8 Ma (Roger et al., 2002). Durante 6 Ma, la losa de subducción ganaba gradualmente mayor ángulo, provocando que el arco volcánico progresara al sur, hacia la fosa mesoamericana. Antes del rompimiento de la losa, un volcanismo riolítico de gran envergadura originó la Formación Chalatenango. Para la subducción moderna, en El Salvador, sería el emplazamiento de volcanes de diferentes períodos con rumbo de norte a sur. El volcán Guazapa tiene sus lavas basálticas superficiales convertidas en arcillas, ligeramente al sur de este está el cono basáltico Guaycume (Ar/Ar; 950 ± 33 ka; este trabajo), más al sur Nejapa (Ar/Ar; 331 ± 28 ka; este trabajo) y, por último, aún más al sur está el VSS (100 ka, Kutterolf et al., 2008)

(figura 2). La zona de subducción es la fuerza principal generadora de terremotos a lo largo de la interface de las placas, que mantiene activo el arco volcánico desde el mioceno superior hasta el holoceno. Este arco volcánico está ubicado en el interior de esa depresión.

El territorio salvadoreño tectónicamente está controlado por una zona de falla de desgarre con movimiento dextral que se extiende por el país de E a W, de forma discontinua, emplazada atrás del arco volcánico. Este rasgo tectónico importante fue denominado *Zona de Falla de El Salvador* [ZFES] (Martínez-Díaz et al., 2004). Esa falla es considerada la causante de la mayoría de los terremotos catastróficos ocurridos a lo largo del arco volcánico (Canora-Catalán et al., 2010). Canora (2011) define cinco segmentos principales para la ZFES, denominados de oeste a este: Occidente, San Vicente, Lempa, Berlín y San Miguel. Las fallas de desgarre Guaycume (Plaza-Mulas, 2013) y la de la cordillera del Bálsamo generan un ambiente tectónico transtensional que causan deformaciones sobre el VSS (figura 2).

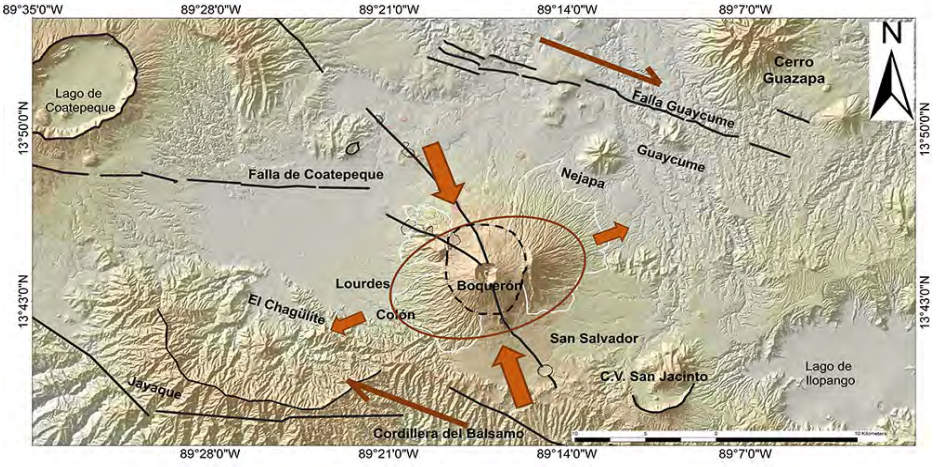


Figura 2. Mapa tectónico del Graben Central de El Salvador. Elipsoide de esfuerzos sobre el macizo volcánico de San Salvador, mostrando los mayores esfuerzos en dirección NW-SE, donde se establecen fallas paralelas a esos esfuerzos, conos de escorias, cráteres de explosión y las erupciones de flancos.

Los esfuerzos provenientes de esas dos fallas de desgarre, separadas 30 km con movimiento dextral, han producido deformaciones y fallamientos en el edificio volcánico, facilitando las erupciones de flanco y el aparecimiento de 24 volcanes monogenéticos. Tal como lo expresa Nakamura (1977), cuando la compresión máxima de la tectónica es horizontal, las tendencias de las erupciones de flancos en los volcanes poligenéticos son más o menos lineales y paralelas, y en un ángulo alto con la tendencia de la cadena volcánica principal. La última vez que se manifestó en superficie la tensión regional en el VSS fue durante la erupción de flanco en 1917, con rumbo NW-SE; y se extiende hasta el cráter (figura 2). Este es el caso cuando la tendencia de las zonas de erupciones de flanco coincide con el eje de compresión máxima horizontal (Nakamura, 1977). Situaciones similares presentan los volcanes Santa Ana, o Ilamatepec, y el volcán San Miguel, o Chaparrastique.

5.1 *Afloramientos*

Se ha realizado un inventario de 86 puntos de afloramientos de las avalanchas de escombros, incluyendo sitios donde estos no están presentes, pero que tienen la importancia en la delimitación del área donde estas se depositaron (figura 3). La mayoría de los afloramientos de las AE no muestran el espesor completo, lo cual dificulta la construcción de las isopacas. Tal como se observa en el mapa, los afloramientos están concentrados en el sector sur y suroriental del volcán, donde se localizan San Salvador, Antiguo Cuscatlán, Mejicanos y Ayutuxtepeque. El punto 28 es más lejano y está a 11 km al sur del centro del cráter Boquerón. En sectores donde no es posible visualizar afloramientos, se han excavado trincheras para poder observar los depósitos volcánicos y los escombros. El sector noroeste del volcán es pobremente limitado por la ausencia de las AE, debido a que las quebradas no son profundas y la presencia en superficie de las lavas de las erupciones de flanco de 1658 y 1917, y de otras más antiguas que 3 ka, impiden tal observación. Situación parecida es la que existe hacia la ladera sur del volcán, en Santa Tecla (figura 3).

5.2 *Geología del área de estudio*

De acuerdo con el mapa geológico (Bosse et al., 1978), la mayor parte del área de estudio está formada por rocas del plioceno al holoceno de origen volcánico. Esas rocas son de naturaleza efusivas calco-alcalinas, desde efusivas basálticas hasta riolitas, así como también en sus equivalentes explosivos. Esas rocas están alrededor de San Salvador y forman parte de las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador. La Formación Bálsamo está bastante expuesta en el borde de la cordillera del Bálsamo y en el extremo norte cercana a la falla Guaycume. Es la más antigua (mioceno-plioceno) de las que aflora en la zona de estudio y está formada por rocas volcánica félsicas en la parte inferior (miembro b1) e intermedias a máficas sobre la anterior (miembros b2 y b3). Se caracterizan por poseer suelos rojizos. Las formaciones Cuscatlán y San Salvador cubren la mayor área (figura 4).

La Formación Cuscatlán (plioceno superior a pleistoceno inferior) está compuesta por los miembros más antiguos de las calderas de Jayaque, Ilopango y Planes de Renderos. En el extremo suroccidental yacen las ignimbritas de Zaragoza, de 2.86 ± 0.05 Ma (Ar^{40}/Ar^{39}, este trabajo). La Ignimbrita Olocuilta 1.72 ± 0.02 Ma (Ar^{40}/Ar^{39}, Hernández et al., 2019) de composición riolítica (tabla 1), de color rosado, además de otros depósitos posteriores a esta, tiene amplia distribución en la parte central de El Salvador. Otro fechamiento de esta misma ignimbrita resultó ser 1.75 ± 0.006 Ma (Ar^{40}/Ar^{39}, Sunye-Puchol et al., 2017).

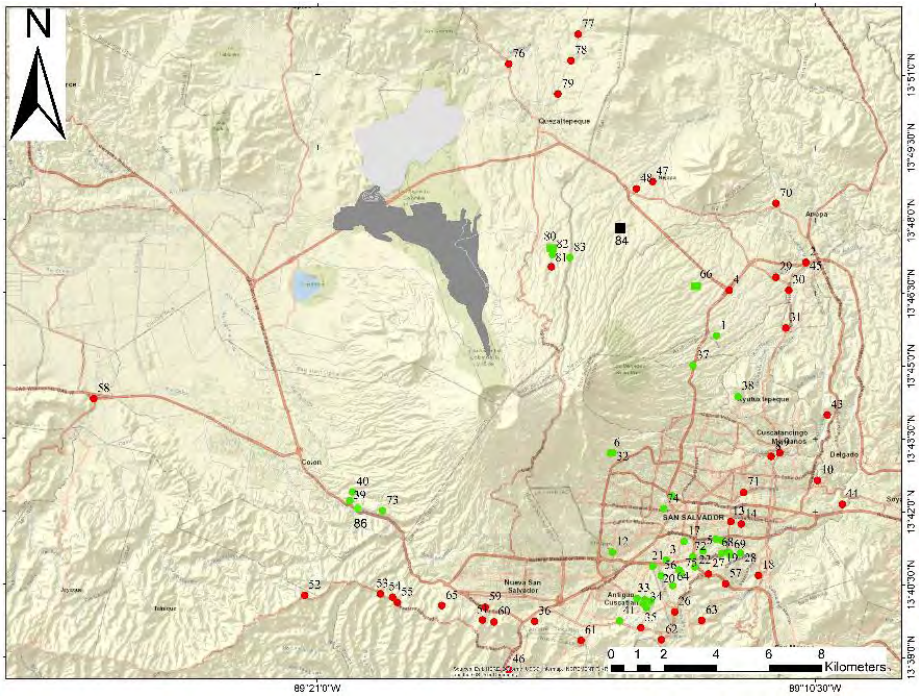


Figura 3. Mapa de afloramientos de la avalancha de escombros alrededor del VSS. Los puntos verdes son los afloramientos de los escombros. Los puntos rojos representan la ausencia de afloramientos y delimitan la avalancha. Los rectángulos verdes son las trincheras con presencia de avalanchas. El rectángulo negro indica que aún no se ha encontrado la avalancha.

La Ignimbrita Olocuilta constituye el Miembro (c_1) de la Formación Cuscatlán; tiene amplia distribución en la depresión del Graben Central, y la mayor parte se encuentra debajo de los productos volcánicos más recientes. En el mapa de la figura 4 yacen solamente en el extremo occidental. Las efusivas félsicas (c_2) están representadas por los domos San Jacinto, Soyapango, La Barranquilla y La Batea. La parte superior está constituida por el miembro c3, formado por efusivas a básicas a intermedias, representadas por los depósitos de la caldera Planes de Renderos (296 ± 9 ka - 264 ± 7 ka, Ar^{40}/Ar^{39}, este trabajo) que están hundidos y cubiertos principalmente por las tefras del Ilopango.

Sin embargo, la porción sur de esta caldera tiene excelente expresión morfológica en el sector sur, del complejo volcánico San Jacinto. Los materiales volcánicos de Planes de Renderos pertenecen al Miembro c3 de la Formación Cuscatlán (tabla 1, figura 4). Otros corresponden a los conos máficos San Jacinto, Guaycume y El Carmen. Se ha introducido el Miembro c4 para representar al domo Santa Rosa de composición riolítica (73,00 % vol. SiO2).

La Formación San Salvador está compuesta por los depósitos explosivos y efusivos más jóvenes de las calderas de Ilopango, Coatepeque y el complejo volcánico San Salvador. Esta formación es la más ampliamente expuesta en la zona. Contiene las edades pleistoceno superior hasta el holoceno. Las Tobas color Café (Miembro s3), fueron divididas por Frullani (1989) en TB_4, G_1, TB_3, TB_2 y TBJ. Los depósitos aluviales cuaternarios están formados por sedimentos lacustres y aluviales que se han acumulado en la planicie del Valle Zapotitán. Hernández (2008) reconoce el depósito subpliniano G_2, de composición dacítica del Boquerón, cuya edad es de 7868 ± 51B.P., calibrada 6918-6596 B.C. (Ferres, 2014), que subyace a TBJ y sobreyace TB2 en la media. Un nuevo fechamiento radiométrico en carbón encontrado en G_2, por espectrometría por acelerómetro de masas, del Laboratorio Beta Analytic, reportó la edad 7520 ± 30 B.P., calibrada 6452-6354 cal B.C. (Este trabajo), que es bastante similar al reportado por Ferres (2014).

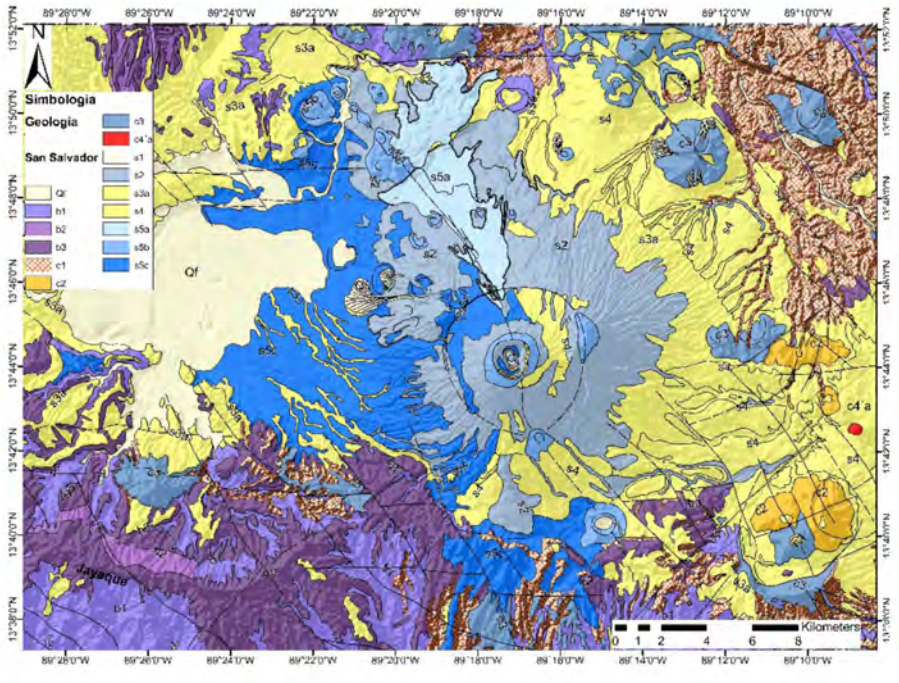


Figura 4. Mapa geológico del área del volcán de San Salvador y sus alrededores (Modificado de Bosse et al., 1978). Presenta cambios de edades y quimismo, basado en dataciones radiométricas y química de rocas en este trabajo y por Lexa et al. (2011). El cerro San Jacinto, la caldera Planes de Renderos y los conos Nejapa y Guaycume aparecen estratigráficamente más rejuvenecidos. El domo riolítico Santa Rosa en color rojo.

5.3 *Ignimbrita Escalón*

En una gran excavación de 22.5 m de profundidad en la colonia Escalón, San Salvador (Torre Milenio), la secuencia piroclástica quedó bastante interrumpida lateral y verticalmente por erosión intensa que formó canales profundos y una deposición de varios flujos de escombros. Estos flujos confinados en las quebradas han "fosilizado" una red de paleovalles en la ladera sureste del volcán donde se localiza la planicie de anillo (*ring plain*), como la denomina Németh & Martin (2007). La secuencia piroclástica está compuesta por las unidades TBJ/Ignimbrita gris Boquerón 1 (B_1) /G_2/

TB_4/TB_5/Ignimbrita Escalón. Mientras que las unidades G_1/TB_2/TB_3/Arce están ausentes por erosión. Como el depósito Arce y la AE están ausentes, esto impide conocer sus relaciones estratigráficas con la Ignimbrita Escalón. Entre TBJ y TB5 existen varios flujos de escombros diluidos e hiperconcentrados de espesor conjunto ~15 m (figura 5).

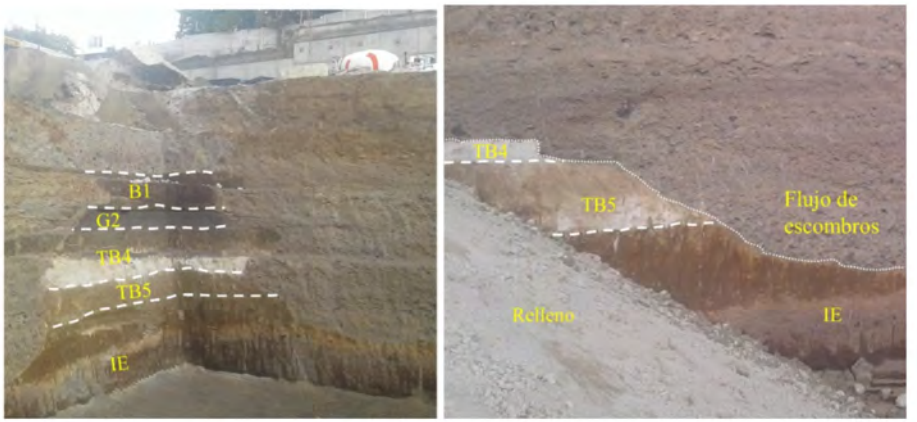


Figura 5. Sitio de excavación en la colonia Escalón (Torre Milenio).A) En el corte de la esquina noreste hay erosión y relleno en la planicie de sedimentación del VSS. La erosión estuvo activa sobre las superficies de las capas TB4, TB5 y la Ignimbrita Escalón (IE). A) Lado norte mostrando algo de detalle de las tefras TB4 muy erosionada, TB5 sobreyaciendo a la Ignimbrita Escalón. La línea punteada marca la superficie de erosión. Las líneas discontinuas marcan los contactos entre las tefras.

La ausencia de la AE en el sector central de San Salvador trajo consigo las siguientes preguntas: ¿Por qué no se desplazó hasta allí la avalancha? ¿Será que fue erosionada? La excavación permitió por primera vez observar la porción superior de una ignimbrita de color violácea que se pasaría a llamar Ignimbrita Escalón (IE). Esta ignimbrita subyacente a TB5 se caracteriza porque su porción superior es rica en fragmentos segregados por flotación de escorias oscuras, angulares, vesiculadas, de 10 a 25 cm de diámetro. Esta ignimbrita tiene un paleosuelo café que posee de 1.50 a 1.75 m de espesor, indicando un largo período inactivo del volcán (figuras 5 y 6A, B, C). Los fragmentos de escorias están dentro de una matriz violácea. Una

perforación fue realizada a la base de la excavación a 22.5 m de profundidad. El testigo de perforación atravesó la Ignimbrita Escalón y después una capa de pómez color claro amarillento parcialmente erosionada con un metro de espesor, que podría tratarse de TB6 (figura 6D). Debajo de TB6 aparecen unos fragmentos de lavas, algunos rojos y grises, de distintos tamaños, que podría interpretarse como la brecha de la lava. Luego, la perforación atravesó la porción superior de una lava andesítica, masiva, fresca, gris claro con muchas vesículas (figuras 6E, F y G).

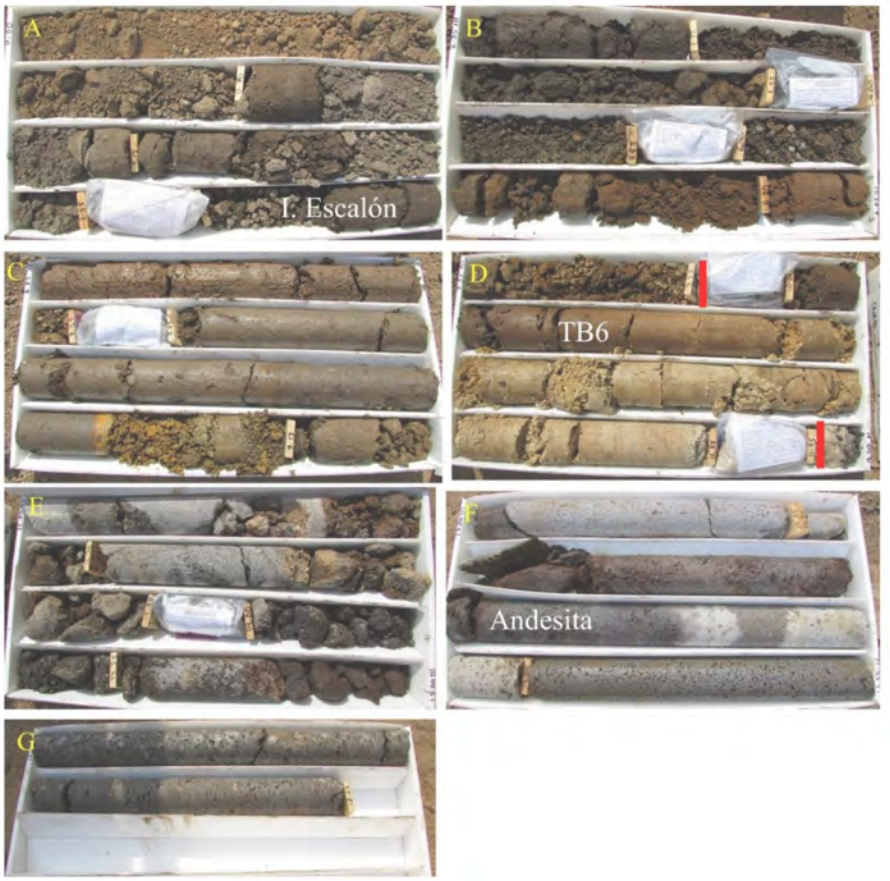


Figura 6. Núcleo de perforación Proyecto Torre Milenio. A, B y C) Ignimbrita Escalón. D) La Ignimbrita Escalón, sobreyace al depósito TB6. E, F y G) Lava andesítica. Contactos en barra roja.

La información geológica que se dispone en la literatura, como el fechamiento de un paleosuelo con materia orgánica en la base de la erupción riolítica TB4, indicó que esta es ◎23,570 ± 380 B.P. (C14, Hernández et al., 2012). Además, las intercalaciones de TB5 y TB6: 389 ± 4.3 ka (U/Th, Sunye-Puchol et al., 2016), TB8: 400 ± 14 ka (Ar^{40}/Ar^{39}, este trabajo) del Ilopango entre los materiales del VSS (figura 7). Por otro lado, Kutterolf et al., (2008) sugieren que la edad del VSS es tan antigua como 100 ka. Una capa fina de cenizas y pómez fina amarillenta rica en biotita de la erupción Arce de la caldera de Coatepeque, cubren la AE del VSS en los sectores de San Salvador, Antiguo Cuscatlán y Ayutuxtepeque. Esto indica que, cuando ocurrió la erupción Arce, el colapso de la porción suroriental del VSS ya había ocurrido. Por tanto, la estratigrafía y los fechamientos de algunas unidades sugieren que el VSS es <400 ka y los volcanes de Coatepeque y San Salvador pueden ser contemporáneos.

Antes de que se construyera el VSS existía la barrera parcial entre el complejo volcánico de San Jacinto y la caldera de Ilopango. De acuerdo con Lexa et al. (2011), el complejo estaba formado por tres cerros: Soyapango (360 ± 0.04 ka (K/Ar); San Jacinto, 340 ± 0.066 ka (K/Ar), y San Marcos, 270 ± 0.17 ka (K/Ar) (figura 4). Intencionalmente, se han denominado así esos volcanes monogenéticos para evitar confusión. Pero en la parte norte del domo Soyapango había una superficie inclinada que conectaba el borde de la caldera de Ilopango directamente con el valle de Zapotitán (Hernández et al., 2009). Por esa superficie se desplazaron hacia el occidente las primeras ignimbritas del Ilopango hasta alcanzar ese valle. Sobre ese relieve inclinado creció y se desarrolló el VSS (figura 7). Más recientemente, la Ignimbrita F de TBJ (535 D.C., Dull et al, 2010) se desplazó hasta el sur del sitio arqueológico San Andrés en el valle de Zapotitán.

5.4 *Basamento del edificio volcánico*

La geometría del basamento sobre el que se apoya el edificio del VSS está inclinada con la parte baja en dirección norte. El basamento sobre el que se edificó el VSS está constituido por los depósitos de las calderas cercanas. La caldera de Jayaque, la más cercana al VSS, produjo la Ignimbrita de Zaragoza, rica en fiammes, la cual es tan antigua como 2.86 ± 0.05 Ma ($^{40}Ar/^{39}Ar$, este trabajo). Cuando la caldera se reactivó, formó en su interior el cono basáltico El Chagüite 1,45 ± 0.02 Ma ($^{40}Ar/^{39}Ar$, este trabajo); y desde entonces está inactivo (figura 4, tabla 1). La caldera de Coatepeque está localizada a 32 km del cráter Boquerón, y sus ignimbritas distales no se desplazaron hasta el pie occidental del VSS. Solamente sus depósitos finos de caída viajaron más lejos que el AMSS. Por otra parte, la caldera de Ilopango está más cercana al VSS (21 km); sus erupciones son más voluminosas y su historia eruptiva es cercana a 2 Ma. Por tanto, Ilopango y Jayaque estuvieron activas por un breve período de tiempo.

Como las tefras del Ilopango están interestratificadas con los materiales del VSS, es más probable que eventos eruptivos más antiguos que TB6 pudieran corresponder al zócalo inclinado, sobre el que se construyó el VSS. Los candidatos más probables son los depósitos félsicos TB7 y TB8, este último con 400 ± 14 ka ($^{40}Ar/^{39}Ar$, este trabajo) y la secuencia más antigua del Ilopango. Siendo así, la lava más antigua del VSS podrá ser < 400 ka. Debajo de los depósitos de Ilopango y hacia el oriente yacen los de la caldera Planes de Renderos; debajo de estos yacen los de la caldera Santo Tomás (Lexa et al. 2011). Al occidente y debajo de materiales de Ilopango se encuentran los materiales de la caldera de Jayaque (figura 7). Al observar las edades para la caldera Planes de Renderos y la del complejo San Jacinto, en la tabla 1, de inmediato se ve que no hay coherencia, porque según esos datos la caldera es más joven que los monogenéticos, situación que contraría porque los monogenéticos surgieron después del colapso.

Tabla 1. Cuadro de dataciones y contenido de SiO2 (por fluorescencia de rayos X)

Lugar	Descripción	SiO_2 (% Vol.)	Datación	Método	Referencia
C. Guaycume	Basalto	51.39	950 ± 33 ka	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
Cerro Nejapa	Andesita	52.02	331 ± 28 ka	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
Km 33 car. aeropuerto	Ignimbrita de Olocuilta	76.35	1.72 ± 0.02 Ma	Ar^{40}/Ar^{39}	Hernández et al. (2019)
Km 33 car. aeropuerto	Ignimbrita de Olocuilta		1.75 ± 0.006 Ma	Ar^{40}/Ar^{39}	Sunye-Puchol et al. (2017)
Car. a Zaragoza	Dacítica	64.86	2.86 ± 0.05 Ma	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
C. El Chagüite, Jayaque	Basalto	50.28	1,45 ± 0.02 Ma	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
Km 19 Car. Oro	TB6		389 ± 4.3 ka	U/Th	Sunye-Puchol et al. (2016)
Km 19 Car. Oro	TB8	74.77	400 ± 14 ka	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
Base y borde caldera Planes de Renderos	Basaltos	51.84 - 51.23	296 ± 9 ka - 264 ± 7 ka	Ar^{40}/Ar^{39}	Este trabajo
Cerro Soyapango	Dacita		360 ± 0.04 ka	K/Ar	Lexa et al. (2011)

Cerro San Jacinto	**Dacita**		**340 ± 0.066 ka**	**K/Ar**	**Lexa et al. (2011)**
Cerro San Marcos	**Andesita**		**270 ± 0.17 ka**	**K/Ar**	**Lexa et al. (2011)**
Cantera Las Lajas, Colón	**Andesita Las Lajas**	**58.33**	**62 ± 11 ka**	**Ar^{40}/Ar^{39}**	**Este trabajo**
	Tefras Arce		**72 ± 2 ka**	**Ar^{40}/A^{r39}**	**Rose et al. (1999)**
	Tefras Congo		**53 ± 3 ka,**	**C^{14}**	**Rose et al. (1999)**
Tonacatepeque	**TB4**	**73.40**	**<23,570 ± 38B.P**	**C^{14}**	**Hernández et al. (2012)**
Torre Milenio	**Tefras G2**	**59.95**	**7520 ± 30 B.P.**	**C^{14}**	**Este trabajo**
Edif. Las Vistas	**Tefras G2**		**7868 ± 51B.P.**	**C^{14}**	**Ferrés (2014)**

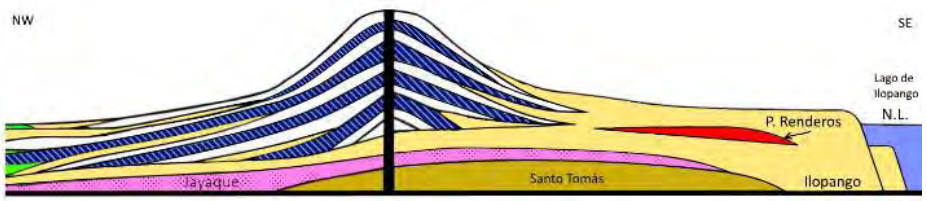


Figura 7. Esquema mostrando el basamento, la asimetría e inclinación del basamento del VSS. La interestratificación de los depósitos de la caldera de Ilopango y del VSS, y las relaciones con los volcanes más antiguos cercanos. Sedimentos lacustres y aluviales (verde) intercalados en el sector NW. La altura del volcán pudo alcanzar 2,700 msnm.

El VSS está apoyado en una superficie inclinada formada por los depósitos antiguos de la caldera de Ilopango. Nakamura (1977) sostiene que, bajo ciertas condiciones, donde un volcán permanece en una superficie inclinada, una tensión diferencial en el plano horizontal podría ser producida por una fuerza gravitacional. Esa condición geométrica también fue observada por Carrasco-Núñez et al. (2006) y Concha-Dimas et al. (2005). Los primeros encontraron esa tendencia de múltiple colapso sectorial transversal al lineamiento (NE-SW) de la cordillera volcánica Citlaltépetl-Cofre de Perotes, y los segundos la identificaron en la cordillera Cofre de Perotes-Pico de Orizaba, México. Es debido a esa tensión en el plano horizontal, inducida por la inclinación del basamento en dirección norte, que el colapso sectorial del VSS ocurrió primero hacia el lado norte. Este efecto se hizo mayor en la medida que crecía el estratovolcán, porque los depósitos del Ilopango se intercalan con mayor espesor en el lado sur y oriental que en el norte, incrementando así ese desbalance (figura 7). Esto produce niveles distintos de caída durante el deslizamiento de las porciones del volcán.

5.5 *La base de la avalancha de escombros*

El basamento de la avalancha de escombros ahora será explicado para cada sector. Para el sector norte (Quezaltepeque) se ha encontrado la porción media y superior de la avalancha; aún no se ha encontrado su base (figura 8A). Para el sector sur y sureste (San Salvador, Mejicanos y Santa Tecla), la secuencia piroclástica, informalmente llamada *TB_5 de la caldera de Ilopango*, forma la base sobre la que se depositó la avalancha de escombros (figura 8B). En el sector suroeste (Colón), la potente lava andesítica de 62 ± 11 ka (Ar^{40}/Ar^{39}, este trabajo) de la cantera Las Lajas forma la base (figura 7C).

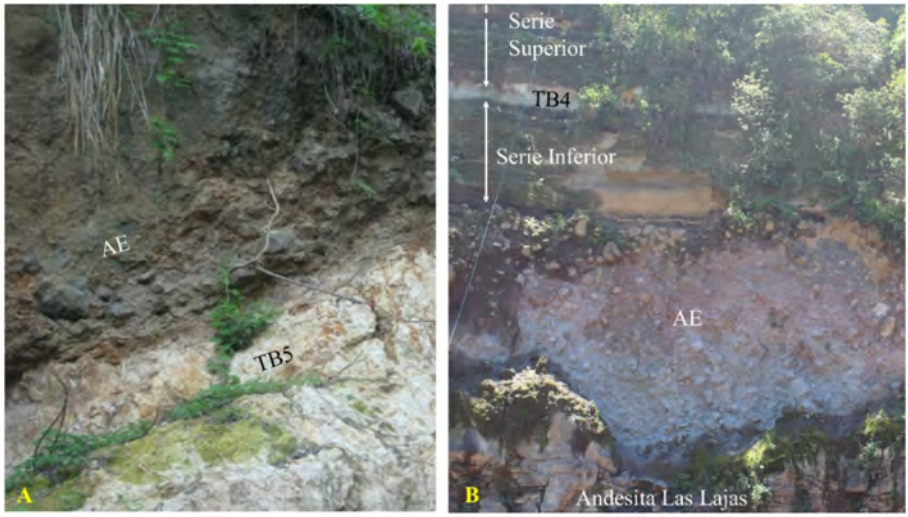


Figura 8. Bases de las AE del VSS. A) En la quebrada Arenal de Monserrat, la base de la avalancha yace sobre las tefras TB5 de la caldera de Ilopango. B) Cantera Las Lajas, Colón. La AE sobreyace en la potente lava andesítica, diaclasada y fracturada. La AE en el sector de Quezaltepeque no ha sido observada su base.

5.6 *Factores asociados a un colapso volcánico*

La inestabilidad de un edificio volcánico puede ocurrir por un terremoto fuerte, como en el caso del Monte Santa Helena en 1980 (Glicken, 1998); y también debido a una actividad freática sin aporte de magma juvenil. 2) Los procesos externos prolongados desestabilizan los flancos mediante la acumulación de varios procesos individuales, como laderas muy empinadas (Siebert, 1984; Sofield, 1998; Major et al., 2001), actividad tectónica muy activa (Tibaldi, 1992; Lagmay et al., 2000; Plaza-Mulas, 2013), la alteración hidrotermal que reduce la resistencia interna de un macizo volcánico (López y Williams, 1993; Day, 1996; Van Wyk de Vries et al., 2000; Reid et al., 2001; Zimbelman et al., 2004), rocas del basamento inclinado donde se emplaza el edificio (Concha-Dimas et al., 2005; Carrasco-Núñez et al., 1996) y hundimiento gravitacional por el peso del volcán (Weinberg, 1992; Wadge, Francis and Ramírez, 1995; Van Wyk de Vries & Merle, 1998; Borgia et al., 2000). Las avalanchas de

escombros de grandes volúmenes viajan grandes distancias (Major et al., 2001). Una proyección realizada en el perfil N-S del VSS indicó que el edificio pudo haber alcanzado 2,700 msnm; y con una elevación de 2,350 m arriba de la base (~350 m) resulta ser un volcán de moderada altura comparado con otros (Siebert, 1984). Esa es una altura no obtenida por los actuales volcanes del arco volcánico activo salvadoreño. El volcán Santa Ana tiene 2,382 msnm y es el más alto del país; y ya tuvo colapso sectorial en el Pleistoceno Superior (Pullinger, 1998; Siebert et al., 2004). Otro colapso sectorial de edad similar ocurrió en el San Miguel (Escobar, 1993). Sofield (2004) considera que el surgimiento de lavas en los flancos y el declive de la actividad por el cráter sugieren que el Boquerón puede haber alcanzado su altura crítica.

El mapa geológico de El Salvador de Bosse et al. (1978) y el trabajo de Escobar (2003) muestran que las erupciones históricas del volcán San Miguel están localizadas en sus flancos. Las erupciones de flanco holocénicas también han ocurrido en el volcán de Santa Ana. Estas erupciones podrían ser un indicador de que ambos volcanes han alcanzado su altura crítica y dan señales de inestabilidad. Por consiguiente, el peso del VSS indujo extensión que pudo haber facilitado la intrusión de magma y las erupciones (Van Wyk de Vries & Merle, 1998). Nuevas erupciones e intrusiones pudieron haber permitido que el VSS obtuviera una gran altura, mayor que la de los volcanes de Santa Ana y San Miguel.

6. Múltiple colapso del volcán San Salvador

El edificio volcánico del VSS experimentó tres colapsos para llegar a su forma actual. Las fallas anulares concéntricas que se observan en El Picacho evidencian la presencia de tres fallas caldéricas (Sebesta, 2007). Los colapsos sectoriales generan anfiteatros con formas de herradura de donde la lava inestable y los piroclásticos brechados están siendo removidos y transportados como una avalancha caótica (Nemeth & Martin, 2007). Los planos de fracturas son usados como caminos para el magma de manera compleja, relativo al campo regional de esfuerzos. Esto significa que, en términos de morfología, los volcanes responden a los esfuerzos regionales de una variedad de maneras (Lagmay et al.,

2000). Después del primer colapso, hubo tres erupciones pequeñas que pueden significar el comienzo de la edificación del nuevo VB.

6.1 *Primer colapso*

En la ladera norte del volcán, en la quebrada La Periquera, aflora por más de 1 km la avalancha de escombros (véase recuadro de la figura 9). Esta no es visible a lo largo de toda la quebrada porque está cubierta por varios depósitos piroclásticos de distintos volcanes. En contacto directo sobre el techo de la AE yacen tres pequeñas erupciones máficas. La primera es color café rojizo, blando, meteorizado, con finos cristales de biotita en poca cantidad (1 %) y de 65 cm de espesor. Al medio yace un suelo café rojizo, blando, meteorizado, de 109 cm de espesor. Sobre este yacen delgados flujos piroclásticos color gris cafezoso, de mediana dureza, y oleadas piroclásticas gris cafezoso, densas y duras. A estos depósitos se les denomina *Serie Inferior del Boquerón* (figuras 9 y 10A). Una capa de pómez amarillenta (Arce) rica en biotita, de 115 cm de espesor, yace sobre esos piroclastos (figura 10A). Sobre Arce yacen varios suelos meteorizados; y la escoria Apopa todavía se puede distinguir en la parte superior de esta secuencia, en pequeños bolsones aislados. Sobre la Serie Inferior del Boquerón yace TB4 (115 cm espesor) de la caldera de Ilopango, y los separa de los depósitos piroclásticos de la Serie Superior del Boquerón (figuras 9 y 10A). Como se trata de un colapso múltiple, las tres erupciones poscolapso en el sector norte representarían las primeras etapas del nacimiento del VB. La avalancha de escombros, por su parte, está compuesta por fragmentos lávicos angulares de variados tamaños y de color violáceo. El espesor es variable a lo largo de la quebrada y llega a ser >10 m (figura 9).

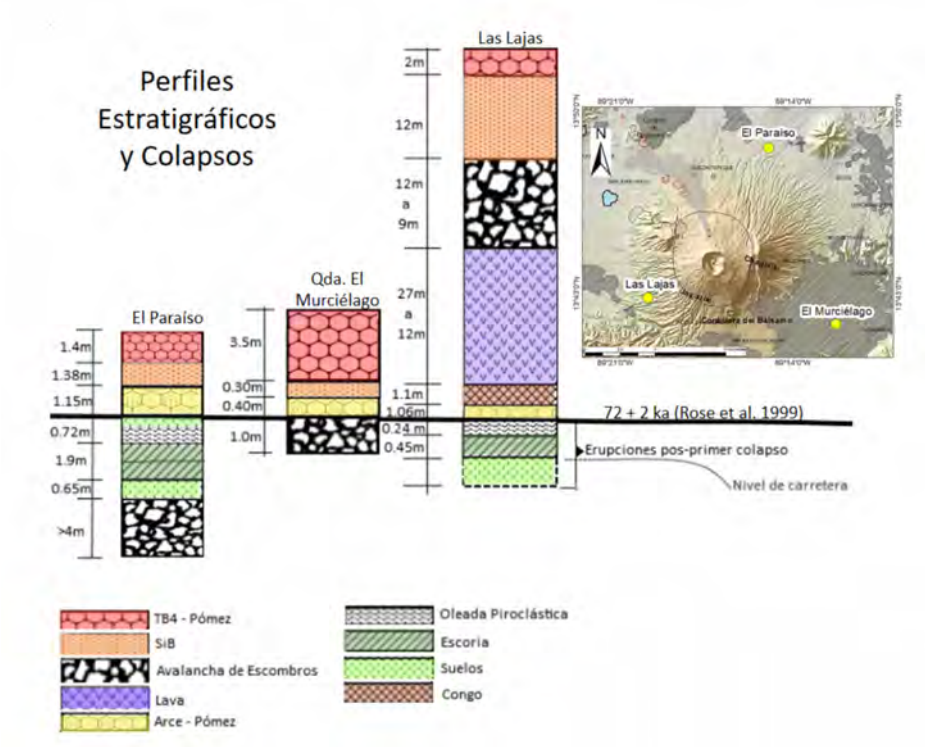


Figura 9. Perfiles estratigráficos de las zonas de los tres colapsos sectoriales del VSS. 1) Después de tres pequeñas erupciones poscolapso se depositó Arce. 2) Después del colapso la pómez y las cenizas Arce se depositaron sobre los escombros. 3) Se deposita la pómez Arce, las cenizas Congo y la lava andesítica; sobre esa lava se depositó la AE. En el recuadro, la ubicación de los sitios de los perfiles alrededor del VSS.



Figura 10. A) Trinchera 3 en la calle vecinal y en la quebrada La Periquera, finca El Paraíso, Quezaltepeque. Secuencia piroclástica de TB4/Serie Inferior del Boquerón: paleosuelos café/depósito de pómez Arce/Paleosuelos pos-primer colapso. B) Depósito de la avalancha de escombros color violáceo; estratigráficamente subyace a los paleosuelos pos-primer colapso, que están formados por tres pequeñas erupciones máficas.

6.2 *Segundo colapso*

En la parte sur y sureste (San Salvador, Mejicanos y Ayutuxtepeque), la mayor parte de la AE solamente muestran el techo y la secuencia piroclásticas sobreyacente (recuadro en la figura 9). La figura 11A muestra, sobre la avalancha de escombros, el depósito Arce, y sobre este yace una delgada capa de suelos meteorizados del VSS; y sobre esos, el depósito de pómez de caída TB4. En la quebrada Arenal de Monserrat, el afloramiento 15 evidencia la presencia del depósito piroclástico TB5, caldera de Ilopango, subyacente a AE (recuadro de las figuras 9 y 11B). En este sector, la avalancha subyace los piroclastos Arce; no hay erupción que indujera el colapso. Mientras que, en el primer caso, la AE subyace a tres erupciones pequeñas poscolapso. Los flancos formados por los colapsos sectoriales 1 y 2 son paralelos al σHmax, reflejando un control tectónico (Siebert, 1984) y evidenciando la zona del edificio volcánico más susceptible de colapsar. Sin embargo, llama la atención que el VSS no muestra la caída de la avalancha transversal a σHmax, sino paralelo, como sostienen Muñoz y Charrier (1996) para el caso

en los Andes centrales. Esto es porque en ambientes con regímenes transcurrentes o transtensionales son más comunes los desplazamientos de las avalanchas paralelas a las fallas o diques (Tibaldi, 1995), pero en ambientes extensionales son normales en esas estructuras (Lagmay et al., 2000). Tal comportamiento fue facilitado porque el VSS posee el basamento inclinado que modifica la geometría del volcán, provocando un desbalance en el peso del edificio volcánico, este factor hizo que el colapso ocurriera paralelamente al vector σHmax.



Figura 11. Afloramiento en la quebrada El Murciélago, colonia Dina, San Salvador. A) AE del VSS en la parte sureste (punto 5); sobre el techo de la avalancha yace el depósito de cenizas y pómez fino de la erupción Arce. A) En la quebrada Arenal de Monserrat yace el contacto de la base de la AE sobre el depósito piroclástico TB_5 que sirve como basamento.

6.3 *Tercer colapso*

En el sector donde se localiza el municipio de Colón, ocurrió el tercer evento localizado en el flanco suroeste del volcán (recuadro de la figura 9). Esta gran exposición geológica se extiende continuamente por 2.6 km a lo largo de la carretera Los Chorros, mostrando la AE sobre la colada de lavas andesíticas. Es uno de los más importantes sitios para conocer la estratigrafía del VSS, por contar con un talud vertical de 75-195 m de altura. La potente lava andesítica de la cantera Las Lajas reportó la edad 62 ± 11 ka (Ar_{40}/Ar_{39}, este trabajo), que se encuentra subyacente a los escombros caóticos de variado espesor (9 a 12 m). La AE está formada

por bloques angulares de variados tamaños, de coloración café-rosáceo con localizado moteado amarillento. En el punto 86 (mojón km 20), en el corte de carretera, las brechas basales de la andesita yacen sobre unas cenizas finas de caída, claras, de la erupción Congo (53 ± 3 ka, C^{14}; Rose et al., 1999) de la caldera Coatepeque, al que produjo por calentamiento intenso una coloración rojiza. Esta secuencia estratigráfica es muy importante y se diferencia de la secuencia de la quebrada El Murciélago (punto 5), porque en este sitio entre Arce y la AE, no están las erupciones Congo y Lava Las Lajas (figuras 9 y 12). Esto significa que la porción oriental del volcán colapsó bastante antes que el sector de Los Chorros. La figura 9 muestra los tres perfiles geológicos en el orden en que colapsaron los sectores.



Figura 12. Afloramiento 86 en km 20 de la carretera Los Chorros. A) Tefras Arce subyacentes a tefras Congo. Estas subyacen a las lavas andesitas Las Lajas. B)

Contiguo al punto anterior, detalle de las tefras Arce sobre los paleosuelos de las tefras posprimer colapso. Sobre Arce aparecen las tefras Congo.

Los perfiles de la figura 9 muestran el depósito Arce con edad 72 ± 2 ka (Rose et al., 1999), el cual es la línea de tiempo para comparar la estratigrafía de cada perfil levantado en los tres sectores colapsados. Los perfiles evidencian diferencias estratigráficas entre ellos, lo cual indica que el VSS experimentó tres sucesivos colapsos, entre ~75 ka y <62 ka, por lo que la caldera no se formó por un evento único. Después del segundo colapso, ocurrió la erupción Arce, cuyo material cayó directamente sobre los escombros. No hubo un evento volcánico que se asociara con ese colapso. Las cenizas finas Congo están constituidas por pocos lapillis acrecionales de 10 a 15 mm de diámetro, color beige, y de 100 a 115 cm de espesor. Debajo de Congo yacen las tefras Arce dacítico (107 cm), compuesta por pómez de caída en la base (43 cm) y depósito retrabajado (37 cm) en el techo, separados por una delgada oleada piroclástica (7 cm). Contiguo al sur yace el río Guarumal o Colón, cuyo cauce lo ha establecido sobre la falla regional de movimiento destral de la cordillera del Bálsamo. La erosión intensa ha profundizado el cañón entre el límite del volcán y esa cordillera. El río, con recorrido de este a oeste, removió el material depositado allí por la avalancha (figura 13). El sector noreste de El Picacho está en desequilibrio y es susceptible de colapsar.

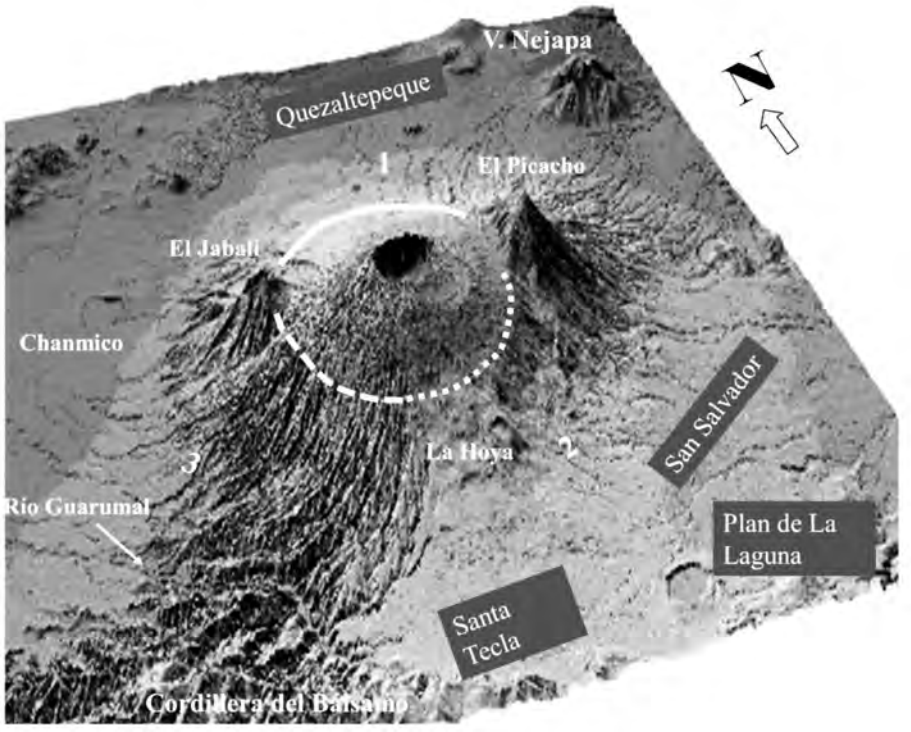


Figura 13. En el modelo digital de elevación se señalan las tres etapas principales de colapsos de sector en el VSS. Los números indican el orden de cada derrumbe gigantesco. Al sur yace la cordillera de El Bálsamo.

7. Formación de la caldera

Los tres colapsos de sector no se produjeron desde la cima hasta el pie del volcán, como usualmente ocurre en ese tipo de colapso. La relación de los colapsos sectoriales del VSS y la formación del borde caldérico son algo complejo y no bien comprendido. Pero ciertamente está relacionado con los esfuerzos generados durante los distintos colapsos, y pudo haber requerido del surgimiento de fracturas anulares previo a estos. A través de las fallas en la ladera de El Picacho (buzamientos hacia el suroeste), hubo una pequeña rotación del cuerpo de este, haciendo

que la ladera parezca más empinada con hasta 31° en su parte más alta. Por eso, para hacer la proyección se seleccionó un perfil N-S y no la ladera de El Picacho, que llevaría a alturas ~3.000 m. La proyección de las laderas N-S indica que la altura del volcán pudo haberse acercado a 2,700 msnm. La proyección también reveló que después del colapso un nuevo conducto para el Boquerón fue establecido, el cual se movió cerca de ~400 m hacia sur (figura 14). Fallas profundas individualizan a los cerros El Jabalí y El Picacho. En la ladera interna escarpada de este se observan tres fallas escalonadas que se extienden hacia el SE donde se localiza el cerro La Hoya. Otras fallas en la ladera externa están dispuestas en el tercio inferior. Estas fallas son profundas y su formación puede asociarse con el mecanismo de expansión del edificio volcánico y el hundimiento de la porción sumital, probablemente conectado a la formación de caldera, cuya génesis deriva de ajustes del aparato volcánico más que de la tectónica regional (Correra Consultores Asociados, 2011).

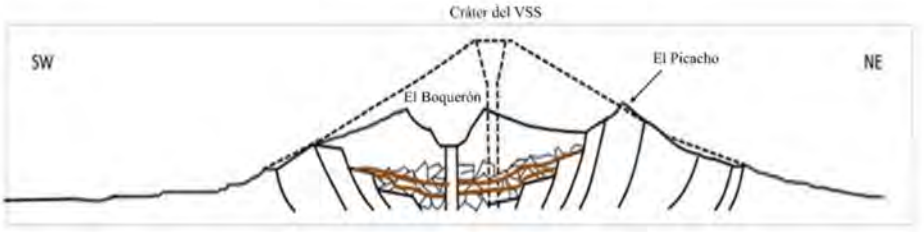


Figura 14. Esquema mostrando el colapso gravitacional y la proyección del volcán ancestral que alcanzó ~2.700 msnm. En el interior de la caldera se edificó el nuevo VB, y su nuevo conducto se desplazó ~400 m hacia el sureste. Las fallas anulares se hundieron con el desplome del edificio volcánico. Las líneas color café entre los escombros representan los pequeños depósitos de las erupciones que hubo entre los colapsos.

A través de esas fallas y grietas, probablemente circularon fluidos calientes y gases después del colapso. También a través de esas discontinuidades se filtran aguas meteóricas que circulan en profundidad. Esas fallas están parcialmente cubiertas por los depósitos

piroclásticos que le cayeron posteriormente al colapso. Los afloramientos de El Jabalí y El Picacho evidencian la presencia de rocas que están muy meteorizadas. La mayoría de las cenizas máficas intercaladas entre las lavas de El Picacho tienen arcillas por meteorización. Este es la porción del VSS con mayor desequilibrio; puede deslizarse y generar una avalancha de escombros que podría viajar entre 6-8 km en dirección al cerro El Carmen en Ayutuxtepeque. El VSS es un volcán grande; y la posibilidad de un futuro colapso de uno de sus flancos no debe desestimarse (Sofield 1998, 2004; Major et al., 2001).

Otros ejemplos de colapsos sectoriales han ocurrido en el volcán Mombacho, Nicaragua. Este volcán está formado por erupciones estrombolianas y coladas de lavas que han experimentado derrumbes gigantescos. El archipiélago Las Isletas, en el lago de Nicaragua, es un colapso sectorial que viajó a 12 km; conserva claramente la cicatriz del colapso que ocurrió en la época precolombina. Otro evento similar ocurrió en su flanco sur y destruyó el pueblo de Mombacho en 1570. Ninguna de estas avalanchas fue acompañada por una erupción del volcán, lo que indica que la ocurrencia de estos grandes eventos es muy difícil de predecir (Van Wyk de Vries & Andrade, 2008). Otro caso lo representan los múltiples colapsos de la cordillera volcánica Citlaltépetl-Cofre de Perotes, en el oriente del cinturón volcánico mexicano, durante el pleistoceno superior (Carrasco-Núñez et al., 2006).

7.1 *Mapa de isopacas de la avalancha de escombros*

7.2 *Características de los clastos*

Los depósitos producidos por las avalanchas de escombros consisten en una mezcla caótica de clastos dentro de una matriz policromada (Arenas y gravas de lavas formadas por impactos y fricción, además de tefras). El depósito se caracteriza por ser pobremente seleccionado, con bloques escasamente fracturados a totalmente brechados. Son varios los sitios donde se puede observar la avalancha de escombros, pero megabloques se han observado principalmente en la quebrada Arenal de Monserrat. Allí se han observado, en bloques y megabloques, estructuras en rompecabezas y también porciones de material piroclástico policromado

(figura 15A, y B). En la residencial Loma Linda, bastante arriba del Estadio Cuscatlán, yacen los escombros formados por bloques lávicos de andesitas, andesitas-basálticas de diversos tamaños, en promedio de 60 cm de diámetro, pero también de 1.5 m de largo, de forma angular (figura 15C), y que viajaron 10 km hasta lograr subir a ese sitio.



Figura 15. Aspectos particulares de las avalanchas de escombros. A) Formas policromadas en los fragmentos que componen constituida por material desmenuzado y piroclásticos. B) Boque lávico color café roto con ligera separación de sus partes y rellenado con material de la matriz. Fracturas en rompecabezas en fragmento mayor, pero manteniendo unido el bloque. A y B en la quebrada Arenal de Monserrat. C) Escombros de variados tamaños, angulares y poligenéticos que subieron la pendiente arriba del Estadio Cuscatlán.

El mapa de isopacas de la avalancha de escombros se ha realizado mediante la medida directa de espesores de afloramientos, en núcleos de perforaciones y de la interpretación de perfiles geológicos de perforación, debido a que la avalancha de escombros tiene una cobertura de seis depósitos volcánicos de la caldera de Ilopango y del Boquerón. La avalancha solamente puede observarse en algunas quebradas profundas y también en cortes de carreteras y en construcciones. Las perforaciones con núcleos se limitan a cuatro, número pequeño que torna difícil hacer el trazado de las isopacas mayores de 10 m (figura 16). El mapa está representado solamente para la porción sureste del volcán, que es donde se encuentra concentrado el mayor número de afloramientos. El sector norte no muestra afloramientos porque las lavas más recientes del Boquerón han cubierto el paisaje. En el sector sur, donde se localiza Santa Tecla, las quebradas no son profundas y no permiten la observación

de los escombros. La parte noroeste, cerca de El Jabalí, no cuenta con ningún dato porque esa zona es de cultivo, mayoritariamente de café; son escasos los caminos y no hay quebradas profundas.

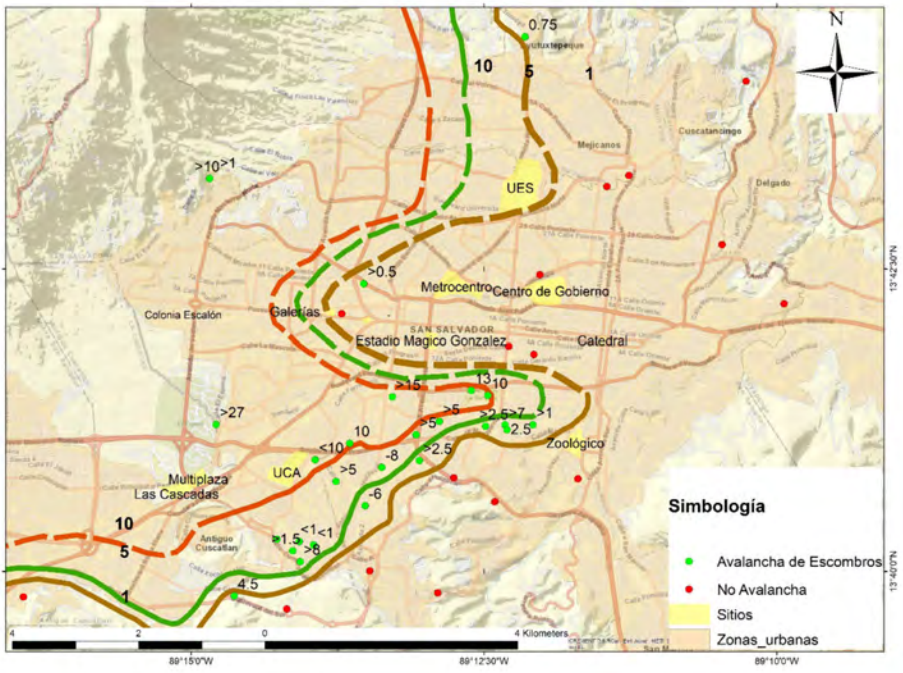


Figura 16. Mapa de la avalancha de escombros en el sector sur y sureste del volcán San Salvador. Las isopacas han sido construidas a partir de los datos encontrados en las quebradas profundas.

7.3 *Movilidad de la avalancha de escombros*

Varios autores, como Siebert, 1984; Ui et al., 2000; Major et al., 2001, han observado que las grandes avalanchas de escombros tienen gran movilidad, cuando son comparadas con aquellas avalanchas no volcánicas del mismo tamaño. También hacen notar que las grandes avalanchas son originadas por un gran evento de colapso volcánico y que los pequeños colapsos son de pequeños volúmenes, de bajos desplazamientos, baja velocidad y proceden de colapsos parciales. En la ciudad de San Salvador, donde hay numerosas quebradas profundas

que exponen esos materiales, pero en varias quebradas sus lechos han sido cementados impidiendo su observación. El depósito de avalancha de escombros del VSS más distante que se ha observado es el punto 28, en la colonia Málaga; y a media ladera de ese alto topográfico. La avalancha se desplazó 11 km del cráter hacia el sureste (figuras 3 y 16), lo que sugiere que la energía de la avalancha no fue suficiente para sobrepasar las barreras topográficas.

Otro sitio de importancia es la Loma Linda, donde los escombros avanzaron sobre las colinas arriba del Estadio Cuscatlán. La avalancha logró movilizar bloques andesíticos angulares de, en promedio, desde 60 cm hasta los más grandes con 1.50x1.75 m inmerso en la facies matriz (punto 64). En Antiguo Cuscatlán, las AE avanzaron sobre las colinas de la cordillera del Bálsamo sin lograr rebasar la barrera más alta de esa cordillera (punto 41). En Ayutuxtepeque, la avalancha subió parcialmente la ladera del cerro El Carmen; y está constituida por bloques menores (10 a 20 cm), y alcanzan un espesor de menos de un metro. Estos depósitos proceden del colapso de la parte alta de El Picacho, que se desplomo simultáneamente con el segundo colapso. Que la avalancha se encuentre en la ladera del cerro señala que este ya existía y es más antiguo que el colapso del volcán en ese momento. En Santa Tecla, creemos que la avalancha de escombros chocó con la barrera escarpada de la cordillera del Bálsamo y que sus escombros se acomodaron al pie del escarpe. Posteriormente fueron cubiertos por sucesivos materiales volcánicos de diversas erupciones. El depósito de avalancha de escombros en Antiguo Cuscatlán y San Salvador, en general se convierte en una capa potencial para ser utilizada como cimiento de grandes edificios y emplear los pisos subterráneos como estacionamiento de vehículos.

7.4 *Petrografía*

En el afloramiento No. 39 (Las Lajas) con altura de cerca de 70 m, la lava se encuentra en la parte baja, color gris, sana, dura, con diaclasas tabulares, espesor visible de 22 m y techo con superficie irregular. Se analizaron dos muestras de lava de la cantera Las Lajas con un microscopio polarizante del laboratorio de LaGeo. Las muestras de lava pertenecen a una andesita piroxénica. Las texturas presentes son porfirítica (figura 17A), fluidal o pilotaxítica, glomeroporfirítica, simplectítica y mirmequitíca.

Está compuesta por fenocristales de plagioclasa, piroxenos y minerales opacos en una matriz intersertal. Los cristales de plagioclasa son grandes (4-5.6 mm de largo), de forma euédrica a subédrica y generalmente columnar, muestran maclas de Carlsbad y polisintética. Se presenta zonación oscilante o un cambio composicional (figura 17B).

La matriz presenta textura variolítica con los microlitos de plagioclasa, en forma de abanico. Los cristales de piroxenos son grandes (1.36-2.4 mm de largo), euhédricos a subhédricos, columnares y hexagonales. A veces aparecen agrupados con plagioclasas y opacos, formando la textura glomeroporfirítica. Se encuentra dos tipos de piroxenos: ortopiroxenos (20 %) y clinopiroxenos (80 %), y a veces los ortopiroxenos tienen sus bordes compuestos de clinopiroxenos. Tanto en plagioclasas como en piroxenos se observan inclusiones de magma (figura 17C). El cuarzo se observa ocasionalmente en la matriz en forma de gusano debido al intercrecimiento de los feldespatos y del mismo cuarzo, dando origen a la textura mirmequítica (figura 17D). Esta lava es de muy bajo grado de alteración hidrotermal, con sílice (5-7 %) y óxidos de hierro (Hematita 3-5 %).

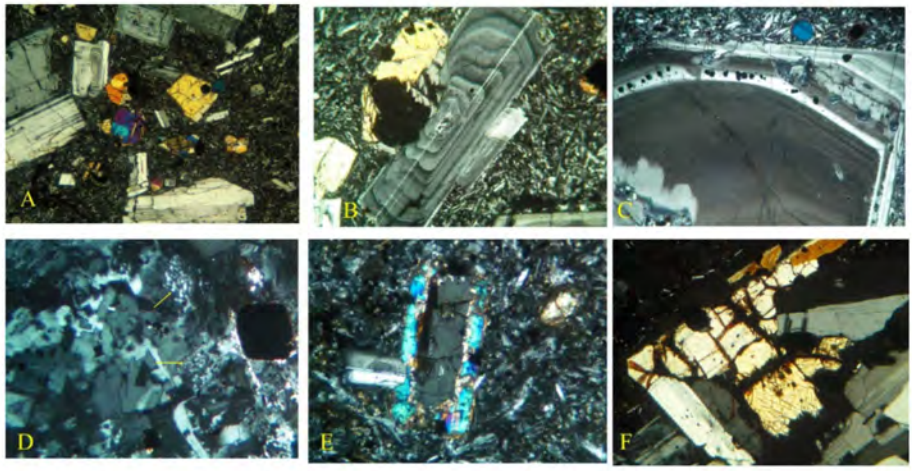


Figura 17. Análisis petrográfico. A) Cristales de plagioclasa y piroxenos en distintos tamaños en matriz vítrica con microlitos de plagioclasas. B) Plagioclasa con zonación oscilante con anillos concéntricos. C) Inclusiones de material fundido en las aristas de plagioclasas. D) Matriz con textura mirmequítica (cuarzo

con forma de gusano). E) Cristal de ortopiroxeno con núcleo reaccionando con clinopiroxeno. F) Óxidos de Fe (hematita) en fracturas de piroxeno.

Por otra parte, los escombros corresponden a lavas andesíticas porfiríticas, vesiculares y piroxénicas con matriz oscura de vidrio volcánico (50-55 %). Las plagioclasas son grandes (3.6-4.8 mm), columnares, con maclas de carlsbad y polisintéticas, con zonaciones oscilante y convoluta, a veces con inclusiones de material fundido. Los cristales de piroxenos son de tamaños variados (1.2-2.8 mm), hexagonales y columnares. El ortopiroxeno está formando núcleo mientras sus bordes están en reacción magmática con clinopiroxeno (figura 17E). Se encuentran dos tipos de piroxenos: ortopiroxeno (60 %) y clinopiroxeno (40 %). Los cristales pequeños de apatito están particularmente encima de piroxenos y plagioclasa. Los minerales opacos (5 %) [tamaño de 0.40 mm] son de subredondeados a subangulares, algunos corroídos. Los óxidos de Fe (hematita 7 %) se depositan en fracturas en piroxenos (figura 17F).

7.5 *Difracción de rayos X*

Se analizó una muestra de material piroclástico para el análisis de la difracción de rayos X en el laboratorio de LaGeo, que evidenció la presencia de dos minerales de alteración hidrotermal: cristobalita (SiO_2): 55 %, y hematita (Fe_2O_3): 8 %. La figura 18 muestra los picos de los tres principales minerales encontrados en la muestra. Los afloramientos con este tipo de material son escasos, lo que indica que este tipo de rasgo no era tan pronunciado en el macizo volcánico.

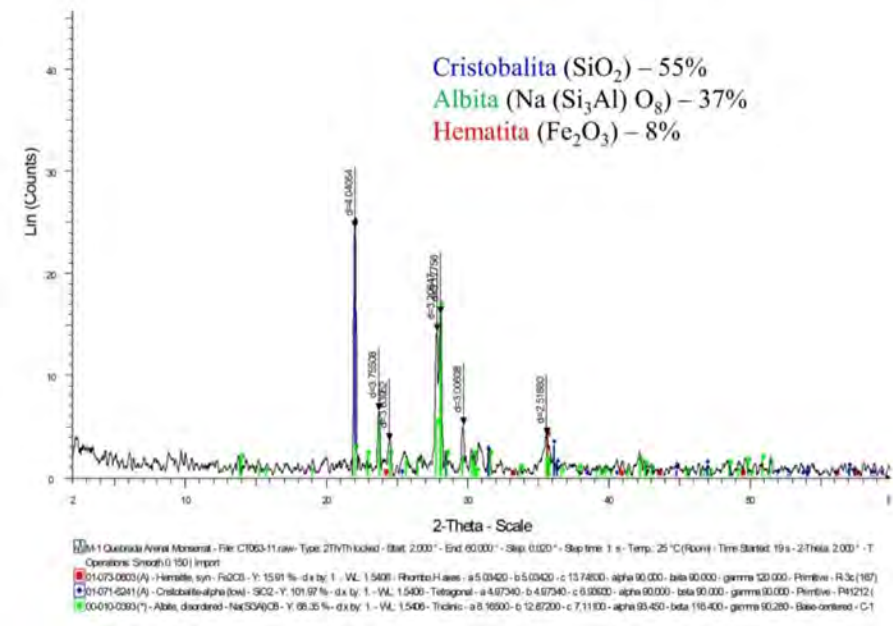


Figura 18. Difractograma de minerales de cristobalita, albita y hematita. Solamente la cristobalita y la hematita son de alteración hidrotermal.

8. Volcanismo poscolapso

Construcción del volcán Boquerón

Después del colapso, un nuevo volcán se empezó a construir anidado en el interior de la caldera de San Salvador. Las erupciones comenzaron poco después del primer colapso y del tercer colapso. Los escalones concéntricos que se observan en El Picacho sugieren que la formación de la caldera estuvo acompañada de un hundimiento gravitatorio gradual desde que empezó la inestabilidad del macizo volcánico con el primer colapso. Ese hundimiento pudo ligarse a la deformación del basamento inducido por el peso del volcán de mucha altura en un ambiente transtensional (Van Wyk de Vries & Merle, 1998). El fondo de la caldera requiere de varias centenas de años de arrastre de material de las paredes (arcillas, limos, arenas finas y gravas) para impermeabilizarse e iniciar

la sedimentación de material más fino. Así permitió la acumulación de agua, formando un lago mediano y poco profundo. Esto se deduce de las erupciones con episodios freatomagmáticos que yacen sobre los escombros. Estas pequeñas erupciones corresponden a la Serie Inferior que representa el inicio de la construcción del VB. La pómez de caída TB4 separa la Serie Inferior de la Superior. La Serie Superior está formada por nueve erupciones, de las cuales la erupción G1 es la más voluminosa (Ferrés, 2014).

8.1 *Volcanismo monogenético*

Sofield (1998) y Ferrés (2014) estudiaron el volcanismo monogenético asociado con el CVSS y determinaron la presencia de 24 volcanes entre cráteres de explosión, conos de escorias y anillos de tobas. Entre estos, nos referiremos al cono La Hoya y al cráter de explosión Plan de la Laguna, ambos situados en la parte sur del volcán (figura 19). Cuatro erupciones holocénicas de los últimos 3 ka se han establecido en la ladera SE del CVSS. El cerro La Hoya (1,260 msnm) se ha emplazado en la intersección de la falla caldérica y la falla con rumbo N40W que pasa por el centro del cráter Boquerón (Italtekna-Italconsult, 1988; Sofield, 1998; Sebesta, 2007; Ferrés, 2014). El cerro La Hoya, con 88 m de altura, está constituido por un cono de escoria rojiza y lava (Itanelka-Consult, 1988; Sofield, 1998).

En su ladera oriental hay un campo fumarólico activo, que por unos años estuvo siendo monitoreado para mediciones de gases de CO2 por la Universidad de El Salvador. La temperatura es registrada por el Observatorio Ambiental. Los productos escoriáceos y lavas yacen sobre los depósitos del Plan de la Laguna de edad 2,650 ± 50 AP (Amaroli, 1987). El nuevo mapa de elevación digital con tecnología Lidar (1 m de resolución) ha permitido la identificación de dos pequeñas bocas eruptivas de escorias al occidente y contiguo al cerro La Hoya. También se ha observado una serie de bocas eruptivas alineadas por donde se originó una pequeña erupción de flanco de lava, también registrada por Sofield (1998). La falla NW-SE en el cráter El Boquerón está alineada con el cerro La Hoya y el cráter Plan de la Laguna (figura 19). El sector de la falla NW-SE, entre los cráteres Boquerón y Plan de La Laguna, es

potencial para el surgimiento de una futura boca eruptiva con salida de lava y escoria, y eso es peligroso porque es un sector densamente muy poblado.

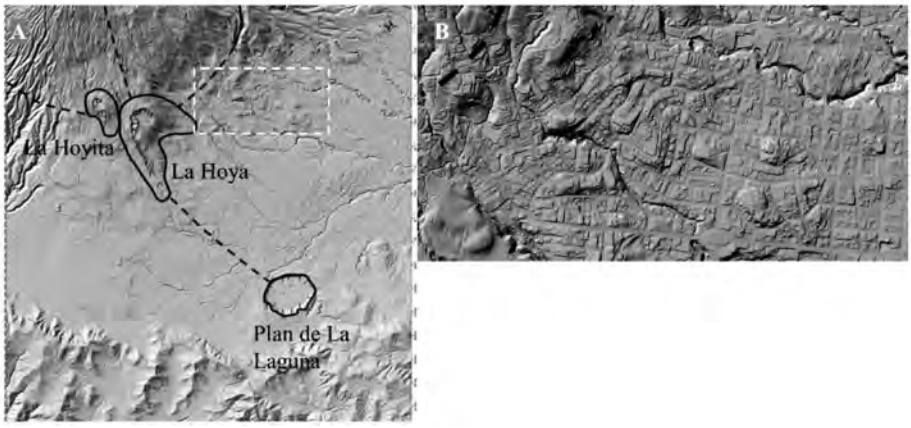


Figura 19. MED con tecnología Lidar mostrando monogenéticos en el flanco sur del VSS. A) Cono de escoria y lava La Hoya mostrando las bocas eruptivas alineadas y el conito La Hoyita adyacente. Hacia el sureste yace el cráter Plan de la Laguna conectado por una falla NW-SE. Hacia el sur se localiza borde del Graben Central constituido por la cordillera del Bálsamo. B) Detalle del recuadro del sector de la colonia Escalón con rasgos de topografía monticular.

9. Discusión

Se han encontrado algunos factores que pudieron incidir combinadamente para que el antiguo VSS se desplomara, que a continuación se presentan.

1) El estado tensional al que estaba sometido el edificio volcánico por las fallas regionales de desgarre con movimiento destral (Guaycume y la falla de la Cordillera del Bálsamo) producen un estrés tectónico local que induce deformaciones al edificio volcánico con el esfuerzo horizontal mayor (σ_1Hm), produciendo una compresión con dirección NW-SE. Mientras que el esfuerzo medio σ_2 produce un estado de extensión transversal al esfuerzo mayor, con el aparecimiento de fallas de extensión con rumbo NW-

SE a N-S, donde se ha desarrollado un volcanismo monogenético del holoceno. La actividad tectónica de las fallas regionales de Guaycume y de la Cordillera del Bálsamo ya existía antes de que surgiera el VSS.

2) Las fallas son los caminos a través de los cuales circulan los fluidos hidrotermales del sistema volcánico, debilitando su resistencia. Los ambientes de climas tropicales se caracterizan por producir intensas lluvias que circulan en profundidad a través de esas discontinuidades permeables hasta alcanzar el sistema hidrotermal. A su vez, los fluidos hidrotermales ascienden y alcanzan las rocas de la superficie debilitándolas por la alteración de los piroclastos y las lavas, que se convierten en arcillas y en otros minerales secundarios, perdiendo así la resistencia del macizo volcánico.
3) La forma geométrica del terreno inclinado sobre el que se emplazó el VSS produjo un desbalance de masa en el edificio volcánico. Este efecto se hizo mayor en la medida que crecía el estratovolcán, porque los depósitos del Ilopango se intercalaban con mayor espesor en el lado suroriental que en el noroccidental. Eso mismo también permite que el basamento del lado oriental del VSS se encuentre más arriba que el del norte.
4) El VSS alcanzó una gran altura (~2.700 msnm), haciendo cada vez mayor su propio peso, el cual a su vez inducía extensión con generación de fallas paralelas al esfuerzo mayor, facilitando el ascenso magmático y las erupciones, que lo hacen crecer más e incrementan su carga. El continuo crecimiento y magmatismo acompañante alcanzan su límite; y el sistema volcánico se torna vulnerable y se derrumba, considerando que los depósitos TB_7, TB_9 y TB_{11} contienen capas de pómez y están en la base del volcán. Esas capas de pómez no poseen alta resistencia y pueden aplastarse, transmitiendo esa deformación hacia todo del volcán.
5) La zona de fallas con régimen transtensional, donde se encuentra el VSS, se vuelve propensa a la generación de sismos fuertes capaces de producir deslizamientos gigantes de las porciones sumitales del volcán.

10. Conclusiones y recomendaciones

- Con la nueva información obtenida en campo, en este proyecto, se ha mejorado la estratigrafía en el área del VSS: la Ignimbrita Escalón y la potente lava andesítica subyacente y la relación con las unidades TB_5, TB_6, TB_7, TB_8. Además, el orden estratigráfico general de los productos de los volcanes más antiguos que el VSS. Los depósitos piroclásticos máficos de la Serie Inferior representan el nacimiento de la construcción del VB. De acuerdo con la estratigrafía y con los fechamientos conocidos, la edad del VSS es <400ka.
- Se presentan mejoras en el mapa geológico de los alrededores del VSS, incorporando nuevos fechamientos, química de roca, y la introducción de nuevos miembros en la leyenda del mapa geológico.
- El Picacho es la porción del volcán con mayor desequilibrio; puede deslizarse y generar una avalancha de escombros que podría viajar entre 6-8 km en dirección al cerro El Carmen, en Ayutuxtepeque, y sus alrededores. El VSS es un volcán grande; y la posibilidad de un futuro colapso de uno de sus flancos no debe desestimarse.
- Se proporciona un modelo del colapso del VSS, el cual gradualmente fue colapsando en tres episodios, produciendo colapsos de sector que recorrieron hasta 11 km. Los colapsos empezaron ~75 ka y finalizaron <62 ka. La desestabilización mecánica del edificio produjo múltiples colapsos del tipo Unzen.
- La inestabilidad del VSS ocurrió por procesos combinados de: 1) La actividad tectónica de las fallas regionales de Guaycume y de las fallas en la cordillera del Bálsamo. 2) El basamento inclinado estuvo produciendo un desbalance en su masa durante su construcción. 3) La alteración hidrotermal con presencia de arcillas y gases, debilita el sistema del macizo volcánico. 4) La carga del volcán produce fallas de extensión y acelera la actividad magmática, contribuyendo al crecimiento del volcán cíclicamente hasta llegar a su límite. 5) La actividad sísmica, muy activa en la zona, pudo haber sido el disparador de cada derrumbe. Estos procesos individuales combinados desestabilizaron el macizo volcánico.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales para la Dirección de Investigaciones de la Universidad Tecnológica de El Salvador (Utec), a cargo de Dra. Camila Calles Minero, por la aprobaron de fondos para el proyecto "Investigación del colapso de Volcán San Salvador: distribución de la avalancha alrededor de la zona metropolitana San Salvador". Al Lic. Saúl Campos, quien facilitó el manejo de dichos fondos. A Celina Kattan, directora general del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, que siempre brindó su apoyo para que este proyecto se realizara. De igual forma, se extienden los agradecimientos a Carlos Pullinger, por la revisión y buenas sugerencias para mejorar el manuscrito, y a Susana Polanco, por la revisión del resumen. A Mario Reyes, quien suministro documentación e información oportuna sobre el proyecto. A Jacqueline Rivera y a Mirian Villalobos, por su valiosa ayuda en la elaboración de las figuras. A la Licda. Gloria Osegueda, de la alcaldía de San Salvador, al Arq. Yolanda Escobar, de la alcaldía de Colon; a la Ing. Celina Perla, de la alcaldía de Nejapa, y al capitán Ernesto Francisco Charlemagne, de Protección Civil de Santa Tecla, por facilitarme gestores sociales para trabajar en las comunidades de sus municipios. Al Ing. Carlos Eduardo Laínez, por facilitarme el ingreso a la finca El Paraíso. Al Ing. Óscar Chávez, propietario de la cantera Las Lajas, por facilitar el ingreso y la toma de muestras en el lugar. Al señor Samuel Fuentes, por su apoyo en la facilitación del transporte.

Referencias

Alonso-Henar, J.; Schereurs, G.; Martínez-Díaz, J.J.; Álvarez-Gómez, J.A. & Villamor, P. (2015). "Neotectonic development of El Salvador Fault Zone and implication for deformation in Central America Volcanic Arc: Insights from 4-D analog modeling experiments". *Tectonics* 34, doi:10.1002/2014TC003723, p. 19.

Álvarez-Gómez, J.A.; Meijer, P.T.; Martínez-Díaz, J.J. y Capote, R. (2008). "Constraints from finite element modeling on the active tectonics of northern Central America and the Middle America Trench". *Tectonics* 27, p. 12.

Álvarez-Gómez, J.A. (2009). "Tectónica activa y Geodinámica en el norte de Centroamérica". Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, p. 277.

Amaroli, P. (1987). "Un sitio Preclásico Medio en la ciudad de Antiguo Cuscatlán. Depto. La Libertad". Informe del Museo Nacional *David J. Guzmán.*

Aiuppa, A.; Rotollo, S.G. and Villa I.M. (1999). "Stratigraphy geochemistry and geochronology of Quaternay pyroclastic sequence of the Chichontepec volcano, El Salvador". *Revista Geológica de América Central,* 22, pp. 75-86.

Borgia, A.; Delaney, P.T.; Delinger, R.P. (2000). Spreading volcanoes. Annual. Rev. *Earth Planet*. Sci. 28, pp. 539-570.

Bosse, R.H.; Lorenz, W.; Merino, A.; Minhm, A.; Rode, K.; Schmitd-Thomé, M.; Webber, H.S. y Wiesemann, G. (1978). Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1:100.000. Misión Geológica Alemana. Hannover, República Federal de Alemania.

Canora-Catalán et al. (2010). Canora, C.; Martínez-Díaz, J.J.; Villamor, P.; Berryman, K.; Álvarez-Gómez, J.A.; Pullinger, C., and Capote, R. "Geological and Seismological Analysis of the 13 February 2001M w6.6 El Salvador Earthquake: Evidence for Surface Rupture and Implications for Seismic Hazard". *Bulletin of the Seismological Society of America,* 100(6), pp. 2873-2890.

Canora-Catalan, C. (2011). "Análisis sismotectónico, neotectónico y paleosísmico de la zona de Falla de El Salvador, Centro América". Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.

Canora, C.; Martínez-Díaz, J.J.; Villamor, P.; Staller, A.; Berryman, K. y Álvarez-Gómez, J.A. (2014). "Estructural evolution of the El Salvador fault zone: An evolving fault system within a volcanic arc". *Journal of Iberian Geology,* 40(3), pp. 471-488.

Carr, M.J. (1984): Symmetrical and segmented variation of physical and geochemical characteristics of the Central American Volcanic Front. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 20: 231- 252.

Carr, M.J.; Stoiber, R.E. (1977). "Geologic Setting of some destructive earthquakes in Central America". *Geological Society of America Bulletin,* 88, pp. 151-156.

Carrasco-Núñez, G.; Díaz-Castellón, R.; Siebert, L.; Hubbard, B.; Sheridan, M.F; Rodríguez, S.R. (2006). "Multiple edifice-collapse events in the Eastern Mexican Volcanic Belt: the role of sloping substrate and implications for hazard assessment". *J Volcanol Geotherm Res*, 158, pp. 151-176.

Correra Consultores Asociados (2011). "Riesgos Geológicos y de deslizamientos, Diseño final del Proyecto Construcción de Obras de Mitigación en el Picacho del Volcán de San Salvador Municipio de Mejicanos, San Salvador", p. 8.

Concha-Dimas, A.; Cerca, M.; Rodríguez, S.R.; Watters, R.J. (2005). "Geomorphological evidence of the influence of pre-volcanic basement structure on emplacement and deformation of volcanic edifices at the Cofre de Perote-Pico de Orizaba chain and implications for avalanche generation". *Geomorphology*, 72, pp. 19-39

Day, S. (1966). "Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes". In: McGuire, W.J.; Jones, A.P.; Neuberg, J. (Eds.). *Volcano in instability on the Earth and other planets.* Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 110, pp. 77-94.

DeMets, C. (2001). "A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implication for slip along the Central American volcanic arc". *Geophys. Res. Lett.* 28, pp. 4043-4046.

Digestyc (2007). "*VI* Censo de Población y *V* de Vivienda de El Salvador 2007". En Dirección General de Estadística y Censo. Ministerio de Economía. Disponible en http://www.digestyc.gob.sv/BoletinIPC/ResultadosVICensodePoblación'yVdeVivienda_2007.

Dull, R.A.; Southon, J.R.; Kutterolf, S.; Freunt, A.; Wahl, D. & Sheets. P. (2010). "Did the Ilopango Eruption Cause the AD 536 Event?". American Geophysical Union, Fall Meeting. Abstract # V13C- 2370.

Escobar, D. (2003). "San Miguel Volcano and its Volcanic Hazards, El Salvador, Central America". [M.Sc., thesis]: Michigan Technological University, p.166.

Fairbrothers, G.E.; Carr, M.J.; Mayfield, D.G. (1978). "Temporal magmatic variation at Boquerón volcano, El Salvador". Contrib Mineralog. Petrol 67, pp. 1-9.

Ferrés, D. (2014). "Estratigrafía, Geología y evaluaciones de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador)". [Tesis doctoral]: Universidad Nacional Autónoma de México, p. 296.

Ferrés, D.; Delgado-Granados, H.; Gutiérrez, R.E.; Farraz, I.A.; Hernández, E.W.; Pullinger, R.C. (2011). "Explosive volcanic history and hazard zonation map of Boqueron volcano (San Salvador Volcanic Complex)", pp. 201-230. *In* Rose, W.I.; Palma, J.L.; Delgado-Granados, H., and Varley, N., eds. Geol. Soc. Amer. Special Paper 498. Doi: 10.1130/2013.2498 (12).

Frullani, A. (1989). "Geologia Delleárea Metropolitana di San Salvador". Conferenze di Geotecnica di Torino. Associazione Geotecnica italiana. XIV CGT, p. 37.

Geotérmica Italiana (1992). "Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Área Centro-Occidental de el Salvador". Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. Informe final (Inédito).

Glincken, H. (1998). "Rockslide-debris avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens volcano, Washington". Bull. Geol. Surv. Japan. Vol. 49 (2/3), pp. 55-106.

Guzman-Speziale, M. (2001). "Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary". *Tectonophysics,* pp. 337, 39-51. doi:10.1016/S00401951(01)00110-X.

Hernández, W. (2008). "Aspectos geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la respuesta sísmica del **Área** Metropolitana

de San Salvador. Servicio Nacional de Estudios Territoriales". *Revista ASIA.* El Salvador, pp. 29-41.

Hernández, W.; Morán, L.; Cerón, R.; Gavidia, F.; Martínez, S.Y.; **Sánchez**, I., y Dinarte, C. (2009). *Crónicas de nuestra Tierra. Historia Natural de El Salvador*. Aseguradora Suiza Salvadoreña, p. 176.

Hernández, W.; Ferrés, D.; Delgado-Granados, H.; Pullinger, C.; Gutiérrez, E.; De Henríquez, E. (2010). "The Last 40 ka Eruptive Cycle of Ilopango Caldera Deposits: A Settlement for the San Salvador Metropolitan Area, El Salvador". Abstract volume, International Conference Cities on Volcanoes, Fundación Canaria ITER, Tenerife, pp 56.

Hernández, W.; Delgado-Granados, H.; Nieto, J. (2012). "La erupción Tierra Blanca 4 (TB4), Caldera de Ilopango, El Salvador". Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe inédito, p. 36.

Italtekna Italconsult, Consorzio Salvador (1988). San Salvador, Programa di Ricostruzione: "Informe Vulcanológico: San Salvador, El Salvador", Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo, Repubblica Italiana, Dirección General del Servicio Nacional de Estudios Territoriales, p. 88.

Kobayashi, D.; Lafemina, P.C.; Geirsson, H.; Chichaco, E.; **Á**brego, A.A.; Mora, H., & Camacho, E., (2014). "Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation". *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15, doi:10.1002/2014GC005234.

Kutterolf, S.; Freundt, A.; Pérez, W. (2008). "Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America: 2. Tephra volumes and erupted masses". *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9: Vol. 9, n.º 2. Q02S02 doi: 10.1029/2007GC001791, pp. 1-19.

LaFemina, P.; Dixon, T.H.; Govers, R.; Norabuena, E.; Turner, H.; Saballos, A.; Mattioli, G.; Protti, M., and Strauch, W. (2009). "Fore-arc motion and Cocos Ridge collision in Central America, Geochem". *Geophys. Geosyst*, p. 10, Q05S14, doi:10.1029/2008GC002181.

Lagmay A.M.F.; Van Wyk de Vries, B.; Kerle, N.; Pyle, M.D. (2000). "Volcano instability induced by strike-slip faulting. Bull". *Volcanol.* 62, pp. 341-346.

Lexa, J.; Sebesta, J.; Chávez, A.; Hernández, W. & Pécskay, Z. (2011). "Geology and volcanic evolution in the southern part of San Salvador Metropolitan Area". *Journal Geosciences,* 56, Czech Republic, pp. 105-140.

López, L.D., and Williams, S.N. (1993). "Catastrophic volcanic collapse: Relation to hydrothermal processes". SCIENCE-American Association for the Advancement of Science. Vol. 260, pp. 1794-1796.

Lyon-Caen, H.; Barrier, E.; Lasserre, C.; Franco, A.; Arzu, I.; Chiquin, L.; Chiquin, L.M.; Duquesnoy, T.; Flores, O.; Galicia, O.; Luna, J.; Molina, E.; Porras, O.; Requena, J.; Robles, V.; Romero, J.; Wolf, R. (2006). "Kinematics of the North American-Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system", *Geophysical Research Letters,* 33(19), pp. 1-5.

Major, J.J.; Schilling, S.P.; Sofield, D.; Escobar, C.D., and Pullinger, C.R., (2001). "Volcano Hazards in the San Salvador Region, El Salvador": *U.S. Geological Survey Open-File Report* 01-366, p. 17.

Mann, P.; Roger, R.; Gahagan, L. (2007). "Overview of plate tectonic history and its unresolved tectonic problems". In Bundschuh & Alvarado (EDS). *Central America: Geology, resources and hazards*, pp. 2006-241.

Martínez-Díaz, J.J.; Álvarez-Gómez, J.A.; Benito, B. & Hernández, D. (2004). "Triggering of destructive earthquakes in El Salvador". Geol. Soc. America. 32 (1), pp. 65-68.

Meyer-Abich, H. (1956). Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador. América Central. Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador. Boletín n.º 3. Ministerio de Obras Públicas, República de El Salvador, p. 102.

Munoz N, Charrier R (1996). Uplift of the western border of the Altiplano on a west-vergent thrust system. J. South Am Earth Sci 9, p171- 181.

Nakamura, K. (1977). "Volcanoes as possible indicators of a tectonic stress". J. Volcanol. Geotherm. Res. 2, pp. 1-16.

Németh, K., & Martin, U. (2007). "A practical volcanology. Lecture notes for understanding volcanic rocks from field basic studies".

Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary, Budapest. Volume 207, p. 221.

Pérez, N.M.; Salazar, J.M.; Hernández; P.A., Soriano, T.; **López, D.L.**; Notsu, K. (2004). "Diffuse CO_2 and 222Rn degassing from San Salvador volcano, El Salvador, Central America". En: *Natural Hazards in El Salvador,* W.I. Rose, J.J. Bommer, D.L. López, M.J. Carr y J.J. Major, Ed). *Geological Society of America,* 375, pp. 227- 235.

Plaza-Mulas, M. (2013). "Definición de una nueva falla activa en El Salvador: Falla Guaycume". [M.S, thesis]: Universidad Complutense de Madrid. p. 46.

Pullinger, C. (1998). "Evolution of the Santa Ana volcanic complex, El Salvador". [M.S, thesis]: Michigan Technological University, p. 151.

Reid, M.E. (2004). "Massive collapse of volcano edifices triggered by hydrothermal pressurization". *Geology* 32 (5), pp. 373-376.

Rodriguez, M.; DeMets, C.; Rogers, R.; Tenorio, C., & Hernandez, D. (2009). "A GPS and modeling study of deformation in northern Central America". *Geophysical Journal International,* pp. 178, 1733-1754. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04251.x.

Rodríguez de Gaspar-Fernández, L. (2015). "Análisis morfotectónico del volcán San Salvador: Serie sísmica de 1917". [Tesis Master]: Universidad Complutense de Madrid, p. 52.

Rogers, R.D.; Kárason, H.; Van der Hilst, R.D., (2002). Epeirogenic uplift above a detached slab in northern Central America. *Geology,* 20(11), pp. 1031-1034.

Rose, W.I.; Conway, F.M.; Pullinger, C.R.; Deino, A., and McIntosh, W.C. (1999). "An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America": *Bulletin of Volcanology,* V. 61, pp. 106-120.

Rotolo, S., and Castorina, F. (1998). "Transition from mildly-tholeiitic to calc-alkaline suite: the case of Chichontepec volcanic centre, El Salvador. Central America". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 86, pp. 117-136.

Rotolo, S.G.; Aiuppa, A.; Pullinger, C.R.; Tenorio-Mejía, J. (1998). "An introduction to San Vicente (Chichontepec) volcano, El Salvador". *Revista Geológica de América Central.* 21, pp. 25-36.

Sebesta, J. (2007). "Zonificación de morfoestructuras del AMSS y su relación con la actividad sísmica". Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, p. 27.

Siebert, L. (1984). "Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 22 (3-4), pp. 163-197.

Sieber, L., Kimberly, P., Pullinger, C., (2004). The voluminous Acajutla debris Avalanche from Santa Ana volcano, western El Salvador, and comparison with other Central American edifice-failure events, pp. 5-23. in Rose, W.I., Bommer, J.J.; **López, D.L.**; Carr, M.J., and Major, J.J., eds., "Natural Hazards in El Salvador": *Geological Society of America Special Paper,* p. 375.

Sofield, D.J. (1998). "History and Hazards of San Salvador Volcano, El Salvador". [M.S. thesis]: Houghton, Michigan, Michigan Technological University, p. 103.

Sofield, D.J. (2004). Eruptive history and hazards of Volcán San Salvador, El Salvador, p. 147-158. in Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J., eds., Natural Hazards in El Salvador: Geological Society of America Special Paper 375.

Staller, A. (2014). "Modelación de las deformaciones corticales en El Salvador (Centroamérica) mediante la integración de datos geodésicos con (GPS), geológicos y sismológicos". Universidad Politécnica de Madrid, tesis doctoral, p. 222.

Stoiber y Carr (1973). "Quaternary Volcanic and Tectonic Segmentation of Central America". *Bulletin of Volcanology*, 37(3), pp. 304-325.

Sunye, I.; Aguirre-Díaz, G.; Davila-Harris, P.; Pedrazzi, D.; Hernández, W.; Gutiérrez, E.; Costa, A.; Lacan, P. (2016). Origen and volcanic history of Ilopango caldera: An active supervolcano on Maya terrain. El Salvador, Central America. Workshop on the Physics of volcanoes. Trieste, Italy.

Sunye-Puchol, I.; Aguirre-Díaz, G.; Harris-Dávila, P.; Pedrazzi, D.; Gutiérrez, E.; Hernández, W.; Miggins, D., y Costa, A. (2017). "The voluminous 1.75 Ma Olocuilta Ignimbrite: A pre-collapse fissure supereruption of Ilopango strike-slip caldera, El Salvador". IAVCEI 2017, Oregon.

Tibaldi, A. (1992). "The role of transcurrent intra-arc tectonic in the configuration of a volcanic arc". *Terra Nova* 4: 567-577.

Tibaldi, A. (1995). *Morphology of pyroclastic cones and tectonics.* Jour. Geophys. Res. 100: 24521-24535.

Ui, T.; Takarada, S.; Yoshimoto, M. (2000). Debris Avalanches. In Sigursson, H.; Houghton, B.F.; Mcnutt, S.R.; Rymer, H. and Stix, J. (Editors): *Encyclopedia of volcanoes.* San Diego, Academic Press, pp. 617-626.

Van Wyk de Vries, B. and Merle, O. (1998). "Extension induced by volcanic loading in regional strike-slip zones". *Geology.* Vol. 26. n.º 11, pp. 983-986.

Van Wyk de Vries, B.; Kerle, N., and Petley D. (2000). "Sector collapse forming at Casita volcano, Nicaragua". *Geology.* Vol. 28, n.º 2, pp. 167-170.

Van Wyk de Vries, B., & Andrade D. (2008). "Volcanismo y sismicidad. Capítulo I", pp. 29-51. In Andrés P., & Rodríguez R., (Eds.). Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica. ISBN: 978-84-96742-37-6. Documenta Universitaria. Girona, España.

Wadge, G.; Francis, P.W., and Ramirez, C.F. (1995). "The Socompa collapse and avalanche event". *Jour. Volc. And Geoth.* Res. 66, pp. 309-336.

Weinberg, R.F. (1992). Neotectonic development of western Nicaragua. Tectonic. Vol. II, n.º 5, pp. 10-17.

Williams, H., and Meyer-Abich. (1955). "Volcanism in the southern part of El Salvador with particular reference to the collapse basins of lakes Coatepeque and Ilopango". University of California.Publ. in Geol. Sci., Vol. 32, n.º 1, pp. 1-64, Berkeley, Los Angeles.

Zimbelman, D.R.; Watters, R.; Firth, I.; Breit, G.; Carrasco-Núñez, G. (2004). "Stratovolcan stability assessment methods and results from Citlaltépetl, Mexico". *Bull Volcanol*, p. 66.

Breve hoja de vida de los investigadores

Walter Hernández. Geólogo salvadoreño graduado en Porto Alegre, Brasil, en 1979. Hizo estudios de posgrado en Exploración Geotérmica en International School of Geothermics, Pisa, Italia, en 1988. Estudios de maestría en Tecnologías Geológicas en la Universidad Politécnica de Madrid, en 2005. Posgrado en vulcanología en la Fundación de Estudios Superiores, 2016. Olot, Barcelona, España. Ha participado en proyectos geotérmicos para generación de energía eléctrica; en geología de pozos geotérmicos. Como geólogo en proyectos hidroeléctricos en las fases de prefactibilidad y factibilidad, además hidrogeológicos para abastecimiento de agua potable. Los últimos 16 años laboró en peligros geológicos: movimientos de laderas y en volcanología física. Estudios de volcanes monogenéticos asociados con la caldera de Ilopango en el Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. De 2004 a 2014 fue docente de Geología para Arqueólogos y Geografía Física para estudiantes de Arqueología en la Universidad Tecnológica de El Salvador. Actualmente está jubilado y se ocupa como consultor en geología.

Brian Jicha. Nació en los Estados Unidos de América. Recibió su Licenciatura en Geología (graduado con honores) en la Universidad de Cleveland State, la Maestría y Doctorado en Geología en la Universidad de Wisconsin-Madison. Es científico investigador asociado en la Universidad de Wisconsin-Madison donde dirige el laboratorio WiscAr. Ha sido autor y coautor de 56 artículos revisados por expertos desde 2003. Su investigación se centra en el uso de la datación radiométrica 40Ar / 39Ar, junto con el mapeo geológico detallado, la geoquímica y la estratigrafía para entender las historias eruptivas y evolución magmática de largo plazo de los arcos volcánicos activos. También investiga la iniciación de la subducción y el desarrollo de arcos de islas del circum-Pacífico desde el Eoceno. Es miembro de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), la Unión Geofísica Americana (AGU) y de la Sociedad Geológica de América (GSA).

Colección Investigaciones 2003-2019

Publicación	Nombre	ISBN
2003	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Primer Tomo Siglo XVI Jorge Barraza Ibarra	99923-21-12-1 (v 1) 99923-21-11-3 (Edición completa)
Diciembre 2003	Recopilaciones Investigativas. Tomos I, II y III	SIN ISBN
2004	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Segundo Tomo Siglos XVII y XVIII Jorge Barraza Ibarra	99923-21-14-8 (v 2) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2004	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Tercer Tomo Siglo XIX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-15-6 (v 3) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2005	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Cuarto Tomo Siglo XIX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-31-8 99923-21-11-3 (Edición completa)
2006	Historia de la Economía de la Provincia del Salvador desde el siglo XVI hasta nuestros días. Quinto Tomo Siglo XX Jorge Barraza Ibarra	99923-21-39-3 (v 5) 99923-21-11-3 (Edición completa)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo I	978-99923-21-50-8 (v1)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo II	978-99923-21-51-5 (v2)
2009	Recopilación Investigativa. Tomo III	978-99923-21-52-2 (v3)
Enero 2010	Casa Blanca Chalchuapa, El Salvador. Excavación en la trinchera 4N. Nobuyuki Ito	978-99923-21-58-4
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 1	978-99922-21-59-1 (v.1)
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 2	978-99922-21-60-7 (v.2)
Marzo 2010	Recopilación Investigativa 2009. Tomo 3	978-99922-21-61-7 (v.3)
Octubre 2010	Obstáculos para una investigación social orientada al desarrollo. Colección Investigaciones José Padrón Guillen	978-99923-21-62-1
Febrero 2011	Estructura familia y conducta antisocial de los estudiantes en Educación Media. Colección Investigaciones n.º 2 Luis Fernando Orantes Salazar	

Febrero 2011	Prevalencia de alteraciones afectivas: depresión y ansiedad en la población salvadoreña. Colección Investigaciones n.º 3 José Ricardo Gutiérrez Ana Sandra Aguilar de Mendoza	
Marzo 2011	Violación de derechos ante la discriminación de género. Enfoque social. Colección Investigaciones n.º 4 Elsa Ramos	
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo I	978-99923-21-65-2 (v1)
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo II	978-99923-21-65-2 (v2)
Marzo 2011	Recopilación Investigativa 2010. Tomo III	978-99923-21-67-6 (v3)
Abril 2011	Diseño de un modelo de vivienda bioclimática y sostenible. Fase I. Colección Investigaciones n.º 5 Ana Cristina Vidal Vidales Luis Ernesto Rico Herrera Guillermo Vásquez Cromeyer	
Noviembre 2011	Importancia de los indicadores y la medición del quehacer científico. Colección Investigaciones n.º 6 Noris López de Castaneda	978-99923-21-71-3
Noviembre 2011	Memoria Sexta Semana del Migrante	978-99923-21-70-6
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo I	978-99923-21-75-1 (tomo 1)
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo II	978-99923-21-76-8 (tomo 2)
Mayo 2012	Recopilación Investigativa 2011. Tomo III	978-99923-21-77-5 (tomo 3)
Abril 2012	La violencia social delincuencial asociada a la salud mental en los salvadoreños Colección Investigaciones n.º 7 Ricardo Gutiérrez Quintanilla	978-99923-21-72-0
Octubre 2012	Programa psicopreventivo de educación para la vida efectividad en adolescentes Utec-PGR. Colección Investigaciones Ana Sandra Aguilar de Mendoza Milton Alexander Portillo	978-99923-21-80-6

Noviembre 2012	Causas de la participación del clero salvadoreño en el movimiento emancipador del 5 de noviembre de 1811 en El Salvador y la postura de las autoridades eclesiales del Vaticano ante dicha participación. Claudia Rivera Navarrete	978-99923-21-88-1
Noviembre 2012	Estudio Histórico proceso de independencia: 1811-1823. José Melgar Brizuela	978-99923-21-87-4
Noviembre 2012	El Salvador insurgente 1811-1821 Centroamérica. César A. Ramírez A.	978-99923-21-86-7
Enero 2012	Situación de la educación superior en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 1 Carlos Reynaldo López Nuila	
Febrero 2012	Estado de adaptación integral del estudiante de educación media de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 8 Luis Fernando Orantes	
Marzo 2012	Aproximación etnográfica al culto popular del Hermano Macario en Izalco, Sonsonate, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 9 José Heriberto Erquicia Cruz	978-99923-21-73-7
Mayo 2012	La televisión como generadora de pautas de conducta en los jóvenes salvadoreños. Colección Investigaciones n.º 10 Edith Ruth Vaquerano de Portillo Domingo Orlando Alfaro Alfaro	
Mayo 2012	Violencia en las franjas infantiles de la televisión salvadoreña y canales infantiles de cable. Colección Investigaciones n.º 11 Camila Calles Minero Morena Azucena Mayorga Tania Pineda	
Junio 2012	Obrajes de añil coloniales de los departamentos de San Vicente y La Paz, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 14 José Heriberto Erquicia Cruz	

Junio 2012	San Benito de Palermo: elementos afrodescendientes en la religiosidad popular en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 16 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina	978-99923-21-80-5
Julio 2012	Formación ciudadana en jóvenes y su impacto en el proceso democrático de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 17 Saúl Campos	
Julio 2012	Factores que influyen en los estudiantes y que contribuyeron a determinar los resultados de la PAES 2011. Colección Investigaciones n.º 12 Saúl Campos Blanca Ruth Orantes	978-99923-21-79-9
Agosto 2012	Turismo como estrategia de desarrollo local. Caso San Esteban Catarina. Colección Investigaciones n.º 18 Carolina Elizabeth Cerna Larissa Guadalupe Martín José Manuel Bonilla Alvarado	
Agosto 2012	Conformación de clúster de turismo como prueba piloto en el municipio de Nahuizalco. Colección Investigaciones n.º 19 Blanca Ruth Gálvez García Rosa Patricia Vásquez de Alfaro Juan Carlos Cerna Aguiñada Óscar Armando Melgar.	
Septiembre 2012	Mujer y remesas: administración de las remesas. Colección Investigaciones n.º 15 Elsa Ramos	978-99923-21-81-2
Octubre 2012	Responsabilidad legal en el manejo y disposición de desechos sólidos en hospitales de El Salvador. Colección Investigaciones n.º 13 Carolina Lucero Morán	978-99923-21-78-2
Febrero 2013	Estrategias pedagógicas implementadas para estudiantes de Educación Media y el Acoso Escolar (*bullying*). Colección Investigaciones n.º 25 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99923-21-92-8

Marzo 2013	Representatividad y pueblo en las revueltas de principios del siglo XIX en las colonias hispanoamericanas. Héctor Raúl Grenni Montiel	978-99961-21-91-1
Marzo 2013	Estrategias pedagógicas implementadas para estudiantes de educación media. Colección Investigaciones n.º 21 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99923-21-92-8
Abril 2013	Construcción, diseño y validez de instrumentos de medición de factores psicosociales de violencia juvenil. Colección Investigaciones José Ricardo Gutiérrez Quintanilla	978-99923-21-95-9
Mayo 2013	Participación política y ciudadana de la mujer en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 20 Saúl Campos Morán	978-99923-21-94-2
Mayo 2013	Género y gestión del agua en la mancomunidad La Montañona, Chalatenango, El Salvador. Normando S. Javaloyes Laura Navarro Mantas Ileana Gómez	978-99923-21-99-7
Junio 2013	Libro Utec 2012 Estado del medio ambiente y perspectivas de sostenibilidad. Colección Investigaciones José Ricardo Calles Hernández	978-99961-48-00-2
Julio 2013	Guía básica para la exportación de la flor de loroco desde El Salvador hacia España, a través de las escuelas de hostelería del país vasco. Álvaro Fernández Pérez	978-99961-48-03-3
Agosto 2013	Proyecto Migraciones Nahua-pipiles del Postclásico en la cordillera del Bálsamo. Colección Investigaciones n.º 24 Marlon V. Escamilla William R. Fowler	978-99961-48-07-1
Agosto 2013	Transnacionalización de la sociedad salvadoreña, producto de las migraciones. Colección Investigaciones n.º 25 Elsa Ramos	978-99961-48-08-8

Septiembre 2013	La regulación jurídico penal de la trata de personas especial referencia a El Salvador y España. Colección Investigaciones Hazel Jasmin Bolaños Vásquez	978-99961-48-10-1
Septiembre 2013	Estrategias de implantación de clúster de turismo en Nahuizalco. Colección Investigaciones n.º 22 Blanca Ruth Gálvez Rivas Rosa Patricia Vásquez de Alfaro Óscar Armando Melgar Nájera	978-99961-48-05-7
Septiembre 2013	Fomento del emprendedurismo a través de la capacitación y asesoría empresarial como apoyo al fortalecimiento del sector de la Mipyme del municipio de Nahuizalco en el departamento de Sonsonate. Diagnóstico de gestión Colección Investigaciones n.º 23 Vilma Elena Flores de Ávila	978-99961-48-06-4
Septiembre 2013	Imaginarios y discursos de la herencia afrodescendiente en San Alejo, La Unión, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 26 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina Wolfgang Effenberger López	978-9961-48-09-5
Septiembre 2013	Memoria Séptima Semana del Migrante	978-99961-48-11-8
Septiembre 2013	Inventario de las capacidades turísticas del municipio de Chiltiupán, departamento de La Libertad. Colección Investigaciones n.º 33 Lissette Cristalina Canales de Ramírez Carlos Jonatan Chávez Marco Antonio Aguilar Flores	978-99961-48-17-0
Septiembre 2013	Condiciones culturales de los estudiantes de educación media para el aprendizaje del idioma Inglés. Colección Investigaciones n.º 35 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Julio Aníbal Blanco	978-99961-48-22-4

Septiembre 2013	Recopilación Investigativa 2012. Tomo I	978-99923-21-97-3
Septiembre 2013	Recopilación Investigativa 2012. Tomo II	978-99923-21-98-0
Noviembre 2013	Infancia y adolescencia como noticia en El Salvador. Camila Calles Minero	978-99961-48-12-5
Diciembre 2013	Metodología para la recuperación de espacios públicos. Ana Cristina Vidal Vidales Julio César Martínez Rivera	978-99961-48-4-9
Marzo 2014	Participación científica de las mujeres en El Salvador. Primera aproximación. Camila Calles Minero	978-99961-48-15-6
Abril 2014	Mejores prácticas en preparación de alimentos en la micro y pequeña empresa. Colección Investigaciones n.º 29 José Remberto Miranda Mejía	978-99961-48-20-0
Abril 2014	Historias, patrimonios e identidades en el municipio de Huizúcar, La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 31 José Heriberto Erquicia Martha Marielba Herrera Reina Ariana Ninel Pleitez Quiñonez	978-99961-48-18-7
Abril 2014	Evaluación de factores psicosociales de riesgo y de protección de violencia juvenil en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 30 José Ricardo Gutiérrez	978-99961-48-19-4
Abril 2014	Condiciones socioeconómicas y académicas de preparación para la de los estudiantes de educación media. Colección Investigaciones n.º 32 Saúl Campos Paola María Navarrete	978-99961-48-21-7
Mayo 2014	Delitos relacionados con la pornografía de personas menores de 18 años: especial referencia a las tecnologías de la información y la comunicación con medios masivos. Colección Investigaciones n.º 34 Hazel Jasmín Bolaños Miguel Angel Boldova Carlos Fuentes Iglesias	978-99961-48-16-3

Junio 2014	Guía de buenas prácticas en preparación de alimentos en la micro y pequeña empresa	
Julio 2014	Perfil actual de la persona migrante en El Salvador. Utec-US COMMITTE	978-99961-48-25-5
Septiembre 2014	Técnicas de estudio. Recopilación basada en la experiencia docente. Flavio Castillo	978-99961-48-29-3
Septiembre 2014	Valoración económica del recurso hídrico como un servicio ambiental de las zonas de recarga del río Acelhuate. Colección Investigaciones n.º 36 José Ricardo Calles	978-99961-48-28-6
Septiembre 2014	Migración forzada y violencia criminal una aproximación teórica practica en el contexto actual. Colección Investigaciones n.º 37 Elsa Ramos	978-99961-48-27-9
Septiembre 2014	La prevención del maltrato en la escuela. Experiencia de un programa entre alumnos de educación media. Colección Investigaciones n.º 38 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99961-48-26-2
Septiembre 2014	Percepción del derecho a la alimentación en El Salvador. Perspectiva desde la biotecnología. Colección Investigaciones n.º 39 Licda. Carolina Lucero	978-99961-48-32-3
Diciembre 2014	El domo el Guegüecho y la evolución volcánica. San Pedro Perulapán (Departamento de Cuscatlán), El Salvador. Primer Informe. Colección Investigaciones n.º 41 Walter Hernández Guillermo E. Alvarado Brian Jicha Luis Mixco	978-99961-48-34-7
Enero 2015	Publicidad y violencia de género en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 40 Camila Calles Minero Francisca Guerrero Morena L. Azucena Hazel Bolaños	978-99961-48-35-4

Marzo 2015	Imaginario colectivo, movimientos juveniles y cultura ciudadana juvenil en El Salvador. Colección Investigaciones n.º 42 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Carlos Felipe Osegueda	978-99961-48-37-8
Mayo 2015	Estudio de buenas prácticas en clínica de psicología. Caso Utec. Colección Investigaciones n.º 44 Edgardo Chacón Andrade Sandra Beatriz de Hasbún Claudia Membreño Chacón	978-99961-48-40-8
Junio 2015	Modelo de reactivación y desarrollo para cascos urbanos. Colección Investigaciones n.º 48 Coralia Rosalía Muñoz Márquez	978-99961-48-41-5
Junio 2015	Niñas, niños, adolescentes y mujeres en la ruta del migrante. Colección Investigaciones n.º 54 Elsa Ramos	978-99961-48-46-0
Julio 2015	Historia, patrimonio e identidades en el Municipio de Comasagua, La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 49 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina	978-99961-48-42-2
Agosto 2015	Evaluación del sistema integrado de escuela inclusiva de tiempo pleno implementado por el Ministerio de Educación de El Salvador. (Estudio de las comunidades educativas del municipio de Zaragoza del departamento de La Libertad). Colección Investigaciones n.º 43 Mercedes Carolina Pinto Benítez Julio Aníbal Blanco Escobar Guillermo Alberto Cortez Arévalo Wilfredo Alfonso Marroquín Jiménez Luis Horaldo Romero Martínez	978-99961-48-43-9
Agosto 2015	Aplicación de una función dosis-respuesta para determinar los costos sociales de la contaminación hídrica en la microcuenca del Río Las Cañas, San Salvador, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 45 José Ricardo Calles Hernández	978-99961-48-45-3

Octubre 2015	El derecho humano al agua en El Salvador y su impacto en el sistema hídrico. Colección Investigaciones n.º 50 Sandra Elizabeth Majano Carolina Lucero Morán Dagoberto Arévalo Herrera	978-99961-48-49-1
Octubre 2015	Análisis del tratamiento actual de las lámparas fluorescentes, nivel de contaminantes y disposición final. Colección Investigaciones n.º 53 José Remberto Miranda Mejía Samuel Martínez Gómez John Figerald Kenedy Hernández Miranda	978-99961-48-48-4
Noviembre 2015	El contexto familiar asociado al comportamiento agresivo en adolescentes de San Salvador. Colección Investigaciones n.º 52 José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Delmi García Díaz María Elisabet Campos Tomasino	978-99961-48-52-1
Noviembre 2015	Práctica de prevención del abuso sexual a través del funcionamiento familiar. Colección Investigaciones n.º 55 Ana Sandra Aguilar de Mendoza María Elena Peña Jeé Manuel Andreu Ivett Idayary Camacho	978-99961-48-53-8
Diciembre 2015	Problemas educativos en escuelas de Cojutepeque contados por los profesores y profesoras. Escuela de Antropología. Julio Martínez	
Febrero 2016	Desplazamiento interno forzado y su relación con la migración internacional. Colección Investigaciones n.º 56 Elsa Ramos	978-99961-48-56-9
Marzo 2016	Monografía Cultural y socioeconómica del cantón Los Planes de Renderos. Colección Investigaciones n.º 57 Saúl Campos Paola Navarrete Carlos Osegueda Julio Blanco Melissa Campos	978-99961-48-60-6

Abril 2016	Modelo de vivienda urbana sostenible. Colección Investigaciones n.º 58 Coralia Rosalía Muñoz Márquez	978-99961-48-61-3
Mayo 2016	Recopilación de Investigaciones en Tecnología 2016: Colección Investigaciones n.º 59 Internet de las cosas: Diseño e implementación de prototipo electrónico para el monitoreo vía internet de sistemas de generación fotovoltaico. Omar Otoniel Flores Cortez German Antonio Rosa Implementación de un entorno de aprendizaje virtual integrando herramientas de *E-learning* y CMS. Marvin Elenilson Hernández Carlos Aguirre *Big data*, análisis de datos en la nube. José Guillermo Rivera Verónica Idalia Rosa Urrutia	978-99961-48-62-0
Julio 2016	Aplicación de buenas prácticas de negocio (pequeña y mediana empresa de los municipios de San Salvador, Santa Tecla y Soyapango en El Salvador.) Colección Investigaciones n.º 46 Vilma de Ávila	978-99961-48-44-6
Julio 2016	Afectaciones psicológicas en estudiantes de instituciones educativas públicas ubicadas en zonas pandilleriles. Colección Investigaciones n.º 60 Edgardo R. Chacón Manuel A. Olivar Robert David MacQuaid Marlon E. Lobos Rivera	978-99961-48-67-5
Octubre 2016	Los efectos cognitivos y emocionales presentes en los niños y las niñas que sufren violencia intrafamiliar. Colección Investigaciones n.º 61 Ana Sandra Aguilar Mendoza	978-99961-48-69-9
Noviembre 2016	Historia, patrimonio e identidad en el municipio Puerto de La Libertad, El Salvador. Colección Investigaciones n.º 62 José Heriberto Erquicia Cruz Paola María Navarrete Gálvez	978-99961-48-70-5

Febrero 2017	El comportamiento agresivo al conducir asociado a factores psicosociales en los conductores salvadoreños. Colección Investigaciones n.º 63 José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Óscar Williams Martínez Marlon Elías Lobos Rivera	978-99961-48-72-9
Marzo 2017	Relaciones interétnicas: afrodescencientes en Centroamérica. Colección Investigaciones n.º 64 José Heriberto Erquicia Rina Cáceres	978-99961-48-73-6
Abril 2017	Diagnóstico de contaminiación atmosférica por emisiones diésel en la zona metropolitana de San Salvador y Santa Tecla. Cuantificación de contaminantes y calidad de combustibles. Colección Investigaciones n.º 65 José Remberto Miranda Mejía Samuel Martínez Gómez Yonh Figerald Kenedy Hernández Miranda René Leonel Figueroa Noé Aguirre	978-99961-48-75-0
Mayo 2017	Causas y condiciones del incremento de la migración de mujeres salvadoreñas. Colección Investigaciones n.º 66 Elsa Ramos	978-99961-48-76-7
Junio 2017	Etnografía del volcán de San Salvador. Colección Investigaciones n.º 67 Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Carlos Felipe Osegueda	978-99961-48-77-4
Agosto 2017	Modelo de e-Turismo cultural aplicando tecnología *m-Learning*, georreferencia, visitas virtuales y realidad aumentada para dispositivos móviles. Colección Investigaciones n.º 68 Elvis Moisés Martínez Pérez Melissa Regina Campos Solórzano Claudia Ivette Rodríguez de Castro Ronny Adalberto Cortez Reyes Rosa Vania Chicas Molina Jaime Giovanni Turcios Dubón	978-99961-48-80-4

Octubre 2017	Influencia de la tradición oral, la cocina que practican los pueblos indígenas y las variantes dialectales en la conservación y difusión de la lengua náhuat pipil. Colección Investigaciones n.º 69 Morena Guadalupe Magaña de Hernández Jesús Marcos Soriano Aguilar Clelia Alcira Orellana Mercedes Carolina Pinto Julio Aníbal Blanco José Ángel García Tejada	978-99961-48-84-2
Noviembre 2017	Propuesta de políticas públicas frente al perfil demográfico de El Salvador Carolina Lucero Morán Guiomar Bay Saúl Campos Morán Lucía del Carmen Zelaya de Soto	978-99961-48-87-3
Noviembre 2017	El estado de las competencias de desarrollo de la mujer en la zona de La Libertad Ana Sandra Aguilar de Mendoza	978-99961-48-88-0
Diciembre 2017	Conocimiento financiero y económico entre estudiantes universitarios: un estudio comparativo entre El Salvador y Puerto Rico Modesta Fidelina Corado Roberto Filánder Rivas Ronald Hernández Maldonado	978-99961-48-89-7
Enero 2018	Situación actual del manejo de las aguas ordinarias en lotificaciones y parcelaciones habitacionales de la zona rural de El Salvador. Un análisis de cumplimiento técnico y legal aproximado Alma Carolina Sánchez Fuentes María Teresa Castellanos Araujo Ricardo Calles Hernández Erick Abraham Castillo Flores	978-99961-48-91-0
Abril 2018	Aplicación de herramientas *big data* al Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano del Ministerio de Obras Públicas de El Salvador Verónica Idalia Rosa José Guillermo Rivera	978-99961-48-97-2
Mayo 2018	Diagnóstico de necesidades de capacitación del personal de empresas del sector turismo del municipio de La Libertad Carlos Rolando Barrios López Blanca Ruth Gálvez Rivas	978-99961-48-98-9

Junio 2018	Etnografía de Santa María Ostuma: tierra de la piña, leyendas y tradiciones Carlos Felipe Osegueda Osegueda Miguel Ángel Hernández Vásquez Georgina Sulamita Ordóñez Valle Francisco Enrique Santos Alvarenga Josué Mauricio López Quintana Miguel Ángel Rodas Ramírez	978-99961-48-99-6
Julio 2018	El *ombudsman* de las audiencias de los medios de comunicación en El Salvador: factibilidad y aceptación Camila Calles Minero Leida Monterroza Matute	978-99961-86-00-4
Agosto 2018	Compilación de investigaciones de tecnología 2017 Extracción de conocimiento a partir de texto Ronny Adalberto Cortez Reyes Aulas conectadas: sistema IoT para el registro de asistentes Omar Otoniel Flores Cortez Verónica Idalia Rosa Urrutia	978-99961-86-01-1
Septiembre 2018	Sistematización y registro de banco de datos de proyectos en oportunidades para deportados salvadoreños Paola María Navarrete	978-99961-86-02-8
Septiembre 2018	Migración y cambio climático Elsa Ramos	978-99961-86-04-2
Octubre 2018	La salud general relacionada con la adaptación a la vida universitaria. Análisis de factores asociados Edgardo René Chacón Andrade José Ricardo Gutiérrez Quintanilla Marlon Elías Lobos Rivera Robert David MacQuaid Marvin Josué Flamenco Cortez	978-99961-86-06-6

Noviembre 2018	El estado de las competencias de desarrollo socioeconómico y psicosocial de las familias en el área costera de El Salvador. Fase II. Estudio multicéntrico Ana Sandra Aguilar de Mendoza José Rigoberto Vaquerano Benavides Lizzie Nájera de Henríquez Larissa Hernández Monterrosa Glenda Yamileth Trejo Magaña Osmel Alberto Sánchez Granados Elmer José René Hernández Romero Edwin Osmil Coreas Flores Diana Beatriz Moreno Ventura Ramón Edgardo Marquina Martínez	978-99961-86-10-3
Diciembre 2018	Historia del VIH en El Salvador y calidad de vida en personas adultas viviendo positivas a VIH Ana Sandra Aguilar de Mendoza Rolando Alberto Alas Ramírez Jorge Alberto Panameño, Médico infectólogo	978-99961-86-09-7
Marzo 2019	Perfil económico y social del sector restaurantes en El Salvador Modesta Fidelina Corado Roberto Filánder Rivas	978-99961-86-13-4
Mayo 2019	Comunicación patrimonial y accesibilidad para personas con discapacidad en los museos de San Salvador desde la perspectiva del diseño para todos María Sofía Albayero García Jaime Pascual Chávez Martínez Mauricio Armando Hernández Sosa Karen Trinidad Consuegra Premper Luisa Massiel Ramos Iglesias Carmen Margarita Morán Hernández	978-99961-86-16-5



Este libro se terminó de imprimir
en el mes de agosto de 2019
en los talleres de Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19ª. Av. Norte N.º 125,
ciudad de San Salvador, El Salvador, C.A.

Universidad Tecnológica de El Salvador

Esta investigación logró identificar los depósitos de las avalanchas de escombros del volcán de San Salvador, invisibilizados por la cobertura de las tefras de erupciones de las calderas vecinas de los lagos Coatepeque e Ilopango y también del mismo volcán Boquerón que se anidó en esa caldera. Es el primer estudio que refiere directamente al colapso del Volcán de San Salvador. Con estos resultados hay una nueva postura sobre los causantes de la morfología de dicho volcán.

La Colección Investigaciones tiene el objetivo de evidenciar el trabajo científico de la Universidad Tecnológica de El Salvador ante la comunidad científica nacional e internacional, y la sociedad.

No hay enseñanza sin investigación ni investigación sin enseñanza
Pablo Freire

Editorial UTEC

ISBN 978-99961-86-17-2

Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Calle Arce y 19ª avenida Sur n.° 1045,
edificio *Dr. José Adolfo Araujo Romagoza,*
San Salvador, El Salvador, (503) 2275 1013 / 2275 1011