

Figura 1. Actual área de levantamiento estratigráfico dentro del AMSS.

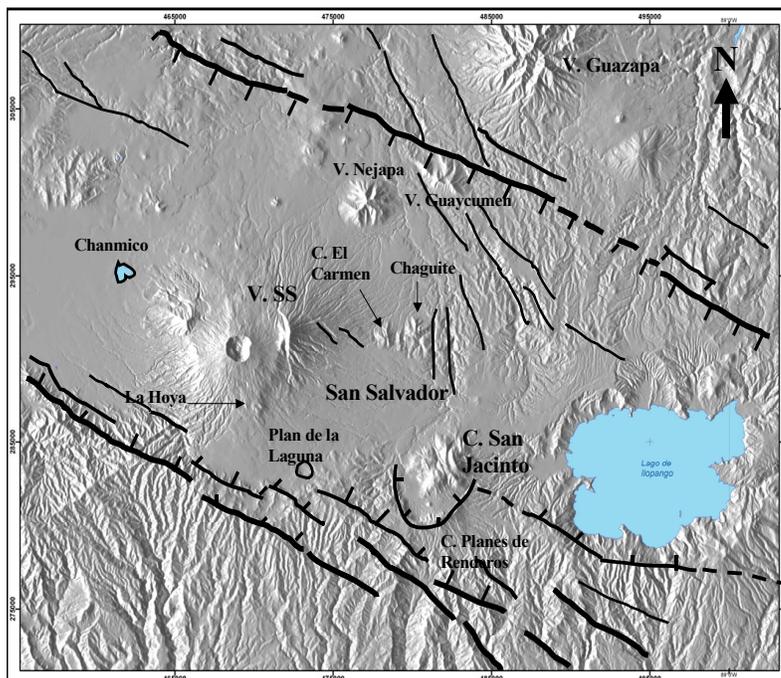


Figura 2. Fallas de la estructura principal del graben Central, Complejo Volcánico San Salvador, caldera de Ilopango, cerro San Jacinto, caldera Planes de Renderos, cráter Boquerón, Chanmico y Plan de la Laguna. Los volcanes antiguos de Guazapa, Nejapa, Guaycumen, El Carmen y Chaguite.

Las estructuras volcánicas, sus materiales piroclásticos y efusivos, las fallas geológicas y las condiciones climáticas (temperatura y precipitaciones), determinan la geomorfología y el carácter físico que tiene la geología en el AMSS. Los materiales surgidos a partir de las erupciones de la caldera Ilopango se tornan más delgados en la ladera del volcán San Salvador e inclusive hasta desaparecen por la erosión, y por otro lado, los productos piroclásticos de éste se adelgazan a medida que se acercan a la Caldera Ilopango.

La estructura geológica elevada del borde sur del graben Central está compuesta por las formaciones volcánicas más antiguas de esta zona, donde la formación Bálsamo del

Terciario es la más antigua y está formada por una serie de lavas andesitas basálticas con intercalaciones de tobas de caída e ignimbritas intermedias, las cuales muestran paleosuelos rojizos bastante desarrollados entre periodos eruptivos con interrupciones importantes. La formación Bálsamo está subyacente a la formación Cuscatlán constituida por importantes ignimbritas ácidas y lavas básicas intercaladas. La formación San Salvador, está representada por las tefras del volcán San Salvador, calderas de Ilopango y Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna. El bloque elevado del graben está basculado hacia el sur, inclinación sostenida hasta alcanzar el Océano Pacífico. En el contacto del escarpe del graben y la ladera sureste del volcán San Salvador, se ha emplazado el cráter de explosión freatomagmática Plan de la Laguna (PL).

2.1 Correlación de los depósitos eruptivos a los centros de emisión

A continuación se describen los depósitos de los centros eruptivos en el siguiente orden: caldera de Coatepeque, complejo volcánico San Salvador y caldera de Ilopango, para lo cual se han utilizado los rasgos característicos de cada unidad (textura, composición, espesores y orden relativo) y sus depósitos se describen del más antiguo al más joven. La figura 3 muestra la ubicación de los afloramientos citados en este documento.

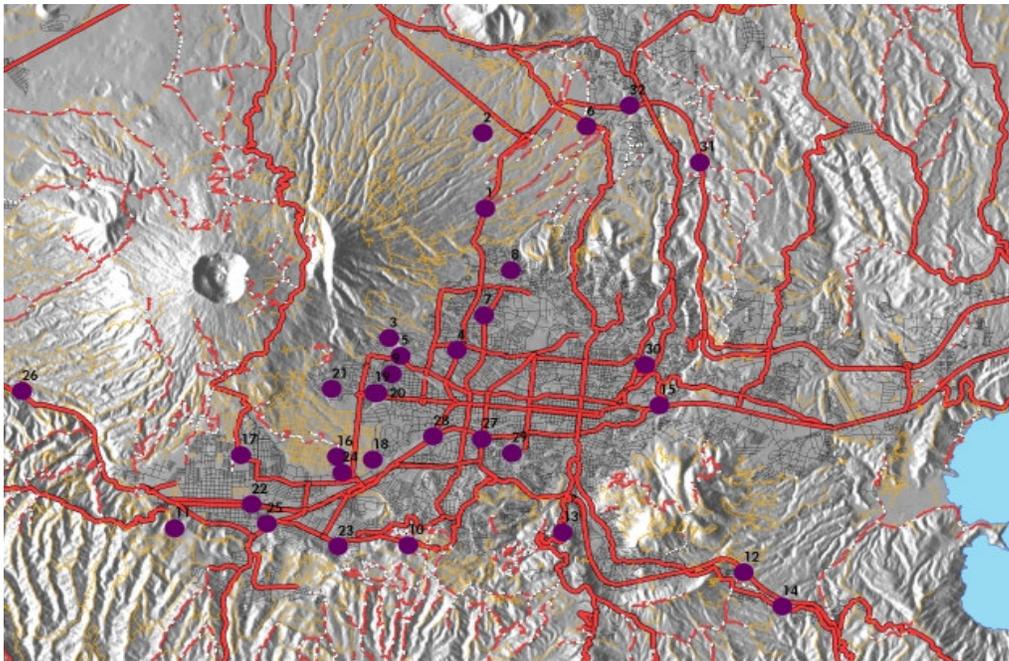


Figura 3. Mapa con la ubicación de puntos de afloramientos en el AMSS, las calles de acceso y la disposición del volcán de SS y el lago de Ilopango.

2.1.1 Coatepeque

En varios sitios de Ayutuxtepeque, Santa Tecla y Antigua Cuscatlán, se han encontrado depósitos distales de las cenizas de composición riolítica de las erupciones Arce y Congo, los cuales corresponden a los eventos mayores de la caldera Coatepeque. En el afloramiento situado en la ladera del Picacho en el cantón El Zapote (afloramiento 1), yacen estas tefras que se localizan entre delgados paleosuelos meteorizados, arcillosos, color café (Figura 4).

Arce- El depósito de caída Arce corresponde a la mayor erupción explosiva del Coatepeque y al pie del Picacho presenta un espesor de 67 cm. Las cenizas compuestas por arenas medias a finas de pómez con biotita característica, tienen color beige claro-amarillento, algo consolidadas. Este depósito también se localiza en la Finca La Esmeralda (Afloramiento 10) con 15 cm de espesor (Figura 4). Se identificó en la parte alta de la cordillera del Bálsamo (Afloramiento 11). Geotérmica Italiana-G.I., (1992) determinó una edad de 70 ± 2 ka en las tefras de Arce, que subyacen a las de Congo, posteriormente Rose et al.(1999) determinaron la edad de 72 ± 3 ka.



Figura 4. TB4
sobreyacentes a depósitos
de caídas del Coatepeque,
San Salvador entre
paleosuelos poligenéticos
cuyo conjunto es superior
a 7 m de espesor
(afloramiento 10).

Congo- El depósito Congo sobreyace las tefras Arce, está compuesto por cenizas finas, color beige claro, algo cementadas, duras y 38 cm de espesor (afloramiento 1). Subyace a un paleosuelo café algo desarrollado. La edad de las tefras Congo es de 53 ± 3 ka (G. I.,1992), basado en el límite de la determinación de 14 C.

2.1.2 Volcán San Salvador

En medio del graben empezó la construcción del complejo volcán San Salvador también conocido como Quetzaltepeque, en cuya ladera oriental se está extendiendo la capital de San Salvador. El complejo volcánico de San Salvador tiene asociados una serie de conos secundarios a su alrededor, cuya posición geográfica obedece a la presencia de estructuras tectónicas por las que el magma tuvo el camino preferencial de ascenso. Entre esas estructuras menores están los conos cineríticos El Cerrito, El Playón, Plan del Hoyo, La Hoya y los conos de explosión freatomagmáticos Chanmico, y de otras de este tipo en las zonas de Nejapa y Quetzaltepeque que no se incluyen en este trabajo.

2.1.2.1 Evolución del Volcán San Salvador. El volcán San Salvador se comenzó a edificar sobre una superficie suavemente inclinada extendida entre el borde caldérico occidental del Ilopango hasta la llanura de Zapotitán, donde se encontraba un lago muy somero (Hoelting, B. 1961). La mayor parte de la cadena volcánica en El Salvador se localiza sobre el borde escarpado sur del Graben Central, pero el volcán San Salvador se emplazó en la parte central de esa estructura deprimida, aprovechando el cruce de fallas por las que comenzó ascender el magma y dio inicio a un estratovolcán de composición andesítica a andesítico-basáltica hasta dacítica.

Una colada lávica andesítica con potencia mayor que 15 m se observa en la pedrera Las Lajas (afloramiento 26), representando la colada de lava más antigua conocida hasta el

momento que aflora del volcán San Salvador, que se llamará en este trabajo como Andesita San Salvador (ASS), las cuales sobreyacen a depósitos piroclásticos del mismo volcán y en cuyo contacto se observa un horizonte quemado (almagre). Sobre esa lava se encuentran un depósito de bloques lávicos angulares de tamaños muy variados (centimétricos hasta mayores que 1 m de lado mayor) inmersos en una escasa matriz formada por arenas, limos y gravas de unos 9 m de espesor, que constituyen un flujo de escombros o lahar (figura 5). Tanto las lavas como el lahar, son una fuente de materia prima para agregados para la construcción civil. Sobre ese material caótico yacen unos 6 a 7 depósitos de cenizas, entre lo que se encuentra un horizonte “guía” formado por el depósito del Ilopango denominado TB4, que tiene 2 m de espesor (figura 5).

Entre TB4 y las lavas Andesitas San Salvador (ASS) aflora en la ladera oriental de ese volcán el pómez de caída Arce de 70 ± 2 ka (G.I., 1992) y 72 ± 3 Rose et al (1999). Debajo del pómez Arce hay otros depósitos piroclásticos y horizontes de arcillas producto del intemperismo de tefras que yacen sobre las lavas ASS, de donde se ha estimado en este trabajo una edad cercana a los 100 ka para el volcán San Salvador. En la ladera sur y sobre TB4 se encuentran varios depósitos piroclásticos de otras erupciones del San Salvador, que no se encuentran en el sector norte y oriental de ese volcán, pues el viento es el agente que controla la deposición del polvo, cenizas y lapilli volcánico.



Figura 5. Talud en la pedrera Las Lajas, Colón, mostrando una serie de erupciones del volcán San Salvador en cuya base yacen las Andesitas San Salvador (ASS). Entre esa secuencia se localiza el pómez de caída TB4 de Ilopango.

La erupción pliniana G1 denominada así por el Consorcio Salvador, (1988), con fase inicial dacítica, es la más grande que se conoce de este volcán. La erupción que generó este depósito produjo la estructura caldérica de forma elíptica de 6 km por 4.5 km de diámetro. Un escalón de esas fallas se observa en la parte inferior y contiguo al Picacho. El Picacho y el Jabalí (1400 m) en el extremo occidental de la caldera constituyen los relictos del antiguo volcán San Salvador. Los depósitos G1 están compuestos por pómez

de caída vesiculada, de composición dacítico a andesítico, grisáceo, algo suelto, con moderada presencia de líticos oxidados y angulares. Se observan varios niveles de oleadas piroclásticas “surges” en la parte proximal pero en la media y distal predomina solamente uno en la porción central del depósito. Estratigráficamente se localiza sobre TB4 y debajo de TB3. El estudio reciente de Kutterolf et al, (2007) sobre la velocidad de sedimentación en fondo marino de estas cenizas, estimó para G1 una edad de 28 ka.

Posteriormente al colapso, en el interior de la caldera comenzó a construirse el nuevo cono Boquerón y cuando sus laderas rellenaron la caldera, sus productos lávicos pudieron movilizarse sobre la ladera occidental y oriental de esa estructura. El Picacho y Jabalí representan barreras para el movimiento de las lavas y también para los flujos piroclásticos, los cuales, en su ladera poseen menor espesor. Desde Apopa hasta Santa Tecla y antiguo Cuscatlán afloran dos erupciones post-caldéricas denominadas en este trabajo como G2 e Ignimbritas Boquerón (IB), ambas más antiguas que TBJ.

G2- Esta unidad corresponde a una erupción pliniana posterior y bastante menor en volumen que G1 y su nombre obedece a su parecido a ésta. Las escorias G2 cuando presentan alteración muestran aspecto moteado evidenciado por un tono gris y beige, recordando el pómez del G1. G2 está compuesto por escorias poco vesiculadas por consiguiente más densa, afanítica, gris claro a gris pardo, mostrando mezcla de magmas. Es rico en líticos basálticos rojizos densos y andesitas café amarillentas y líticos hidrotermalizados. La granulometría indica que es un material poco seleccionado y caracterizado por la poca presencia de finos. El mapa de isopacas (líneas de igual espesor) muestra que la erupción que produjo el depósito G2 se extendió por toda la capital y que la misma fue algo simétrica, es decir, no hubo influencia importante del viento (Figura 6).

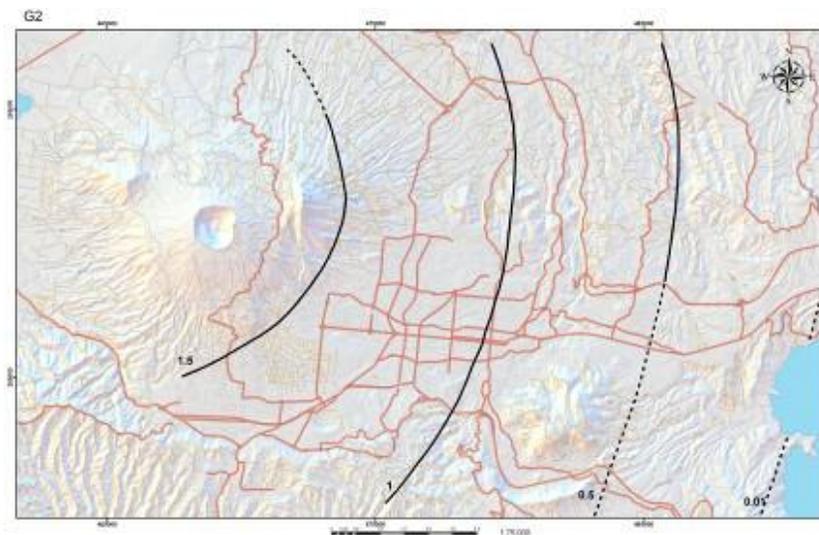


Figura 6. Mapa de isopacas de la erupción G2 muestra que la erupción cubrió un gran sector del AMSS, llegando sus cenizas hasta el borde occidental del lago Ilopango.

Ignimbrita Boquerón (IB)- La erupción que dio origen a la Ignimbrita Boquerón (IB) fue un evento independiente del G2, pero el tiempo entre una y otra erupción fue relativamente corto, al grado que solamente en pocos afloramientos se observa una débil oxidación del techo de G2. La IB está compuesta por dos flujos piroclásticos de color café oscuro mostrando cada una intercalación de delgadas oleadas piroclásticas (surges) de color café claro a pardo, pero las dos ignimbritas a veces no están juntas. La IB tiene poca consolidación, posee matriz de cenizas finas medianamente meteorizadas, en la

que se encuentran fragmentos de escoria gris con meteorización baja, fragmentos de escoria juveniles de tamaños variados y líticos andesíticos con oxidación, además, muestra pequeños bolsones de escoria bastante vesicular. Posee espesor conjunto que varían desde 6 m en el afloramiento 21 hasta inferiores a 1 m (Figura 7). Por otro lado, el máximo espesor registrado en las oleadas fue el de la ignimbrita superior donde mostró espesor de 1.15 m en el corte la obra de paso en la Escuela Militar y la Diego de Holguín (Afloramiento16).

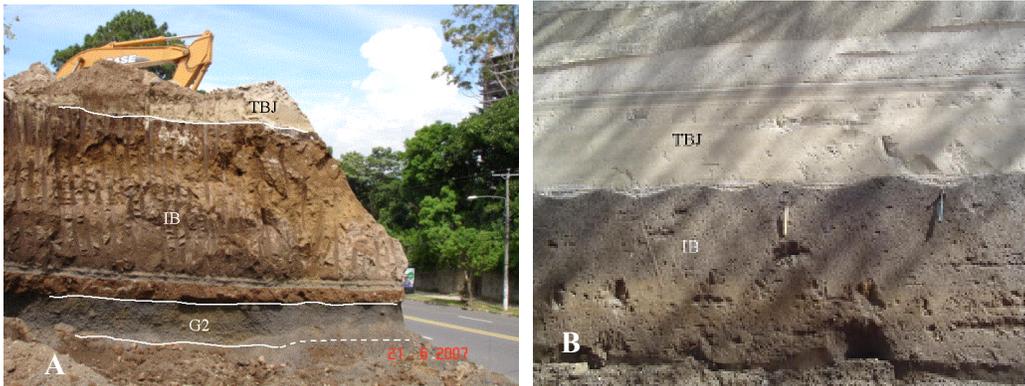


Figura 7. A) Ignimbrita Boquerón (IB) de color café sobreyaciendo a al pómez gris G2 y subyaciendo a TBJ. B) Afloramiento de IB en el Blvd. Diego de Holguín, mostrando surcos de cultivos y subyaciendo a las tefras TBJ.

Se han identificado a las dos ignimbritas manera continua en la carretera en construcción Diego de Holguín, en el tramo comprendido desde la colonia San Benito (San Salvador) y finca de Asturias (Santa Tecla). La Ignimbrita Boquerón también aflora en los cortes para el drenaje de aguas lluvias sobre la carretera que de Santa Tecla conduce al puerto La Libertad, donde los espesores son bastante inferiores al metro y ahí aparece solamente el flujo superior con su respectiva oleada piroclástica.

Apopa- Se ha denominado Apopa al depósito de una pequeña erupción estromboliana del volcán San Salvador, que ocurrió cuando el antiguo edificio volcánico tenía la forma de un cono previo a la erupción G1. Esta erupción con dispersión simétrica está compuesta por una escoria básica subyacente a TB4, con suelo café poco desarrollado. El depósito Apopa está constituido por lapilli escoriáceo basáltico, gris oscuro, vesicular y suelto cuando no presenta oxidación, pero en la mayor parte de los afloramientos es de color café debido a la oxidación la cual une un grano con otro, concediéndole cementación y consolidación (véase figura 8). El mayor espesor medido es de 33 cm y se localiza en la prolongación de la Av. Masferrer (afloramiento 3). La ausencia de una tendencia preferencial del depósito indica la ausencia de viento dominante durante el corto período de la erupción, lo cual se ha constatado en los afloramientos cuyos espesores no evidencian ninguna tendencia en la acumulación.

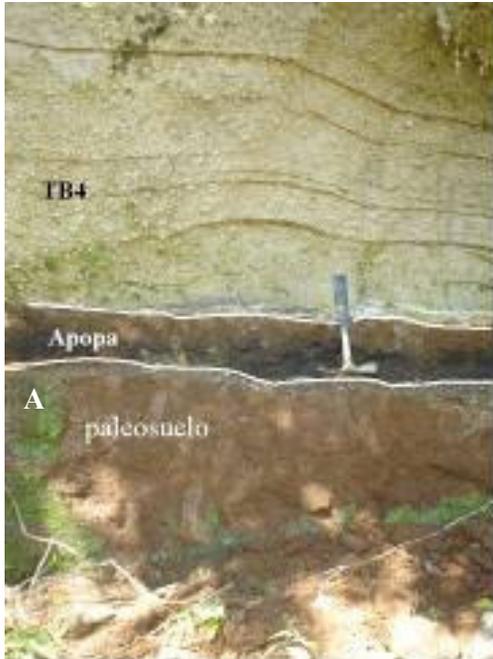


Figura 8. Estrato delgado del lapilli escoriáceo Apopa entre el pómez de caída TB4 en la parte superior y suelo limoso café meteorizado.

Plan de la Laguna (PL) - La erupción del Plan de la Laguna corresponde a una erupción monogénica que tuvo lugar entre la ladera sur del complejo volcánico San Salvador y el borde sur del Graben Central. El cráter tiene un diámetro de 700 m, con la pared norte de 45 m y pared sur con 85 m de altura, diferencia marcada por la asimetría extrema cuya acumulación es mayor hacia el suroeste favorecida por la dirección de los vientos, se caracteriza por tener en la base lapilli andesítico, vesicular gris, superpuesto por oleadas. La parte intermedia laminada compuesta por cenizas de caída y oleadas. El techo está formado por lapilli acrecional (figura 9). Debido a la irregularidad del terreno y a los efectos erosivos, estos depósitos se localizan en el sector de la cordillera del Bálsamo, sobre las escorias andesítico-dacíticas del Boquerón (G2) y cuando están erosionadas yacen sobre el pómez de caída TB4. En la parte más distal los productos piroclásticos aparecen sobre los suelos rojizos de las lavas meteorizadas de la formación Bálsamo. En la parte del bloque hundido están subyacentes a la oleada piroclástica Talpetate del Boquerón de 1200 años D.C. (Sofield, D.J. 1998) y ésta a su vez está bajo la Tierra Blanca Joven de 430 años D.C. (Dull, R.A. 2001). La erupción del Plan de la Laguna está asociada al complejo del volcán San Salvador. Amoroli, P., y Dull, R. (1998), determinaron una edad de 820 años A.C., a partir de ^{14}C en materia orgánica de milpas fósiles encontradas en Antiguo Cuscatlán.



Figura 9. Productos piroclásticos del Plan de la Laguna estratificados y localmente inclinados por acomodación al relieve.

Lahares – Este material no corresponde a una erupción, pero si a un proceso exogeodinámico de la ladera del Picacho, y tiene importancia por sus espesores y área de ocurrencia. La ladera del Picacho desde el colapso del volcán San Salvador se encuentra en desequilibrio, y por medio de flujos de escombros también conocidos por lahares y procesos continuos de erosión, trata de buscar su equilibrio. En los municipios de Nejapa, Apopa, Ayutuxtepeque, Mejicanos y San Salvador, se han encontrado este tipo de depósitos bajo TBJ y están compuestos por bloques lávicos de hasta 1.5 m de largo, inmersos en una matriz de limos y arenas con gravas y arcillas, alcanzando espesores >4.70 m (U. Evangélica, afloramiento 5), señalando que los movimientos de ladera son recurrentes y esa ladera está inestable y por lo tanto, las obras civiles que se construyen al pie de esa ladera deben considerar esa amenaza geológica (figura 10). Los lahares más antiguos registrados en la ladera del Picacho se localizan en Colón (figura 5) y los más recientes datan de junio de 1934 y septiembre de 1982, este último impactó la residencial Montebello Poniente donde las víctimas mortales fueron 500 y 2380 damnificados (CIG, 1990). Por tanto, estos procesos geomórficos debido a su gran poder destructivo deben considerarse en los planes de desarrollo de esa zona Picacho.



Figura 10. Lahar o Flujo de escombros >3 m de espesor subyaciendo bajo TBJ, con bloques de todos los tamaños hasta mayores de 1 m de diámetro, contiguos a la calle antigua a cantón El Carmen.

2.1.3 Caldera de Ilopango

El borde occidental de la caldera de Ilopango está situado a 22 km del cráter del Boquerón, entre los cuales yace la mayor parte del AMSS. La caldera tiene una superficie de 75 km² con forma elíptica (10 km x 8 km) en cuyo interior se ha formado el lago homólogo después de muchas erupciones que han tenido lugar a lo largo de su historia. La pared norte tiene 150 a 200 m de altura, mientras que la pared sur está formada por un escarpe de falla que tiene hasta 500 m de altura y coincide con el borde sur del Graben Central. El último ciclo eruptivo de la caldera de Ilopango está compuesto por las erupciones plinianas de Tierra Blanca que produjeron los depósitos de caída e ignimbritas pumíticas denominados de la más antigua a la más joven como TB4, TB3, TB2 y TBJ.

Pómez TB4- El depósito más antiguo del último ciclo de la caldera de Ilopango es el TB4, el cual yace sobre las tefras Apopa (figuras 8). El TB4 está constituido por una capa de pómez color blanco, producto de una erupción pliniana de importante magnitud, con espesores de 6.05 m en Santo Tomás (afloramiento 12) y de 3 m a 23 km al oeste (figura 11). El TB4 se caracteriza por tener una capa lapilli de pómez con gradación normal y por tener mayor espesor que los otros depósitos. La base de esta unidad la constituye una ceniza de caída fina, blanca de espesor delgado (25 -10 cm), y el techo por ceniza fina de casi el metro de espesor de color amarillento. Este evento eruptivo se caracteriza por la ausencia de oleadas y flujos piroclásticos. Kutterolf et al, (2007) determinaron por medio de la razón de sedimentación de estas tefras en el fondo oceánico una edad de 36 ka.

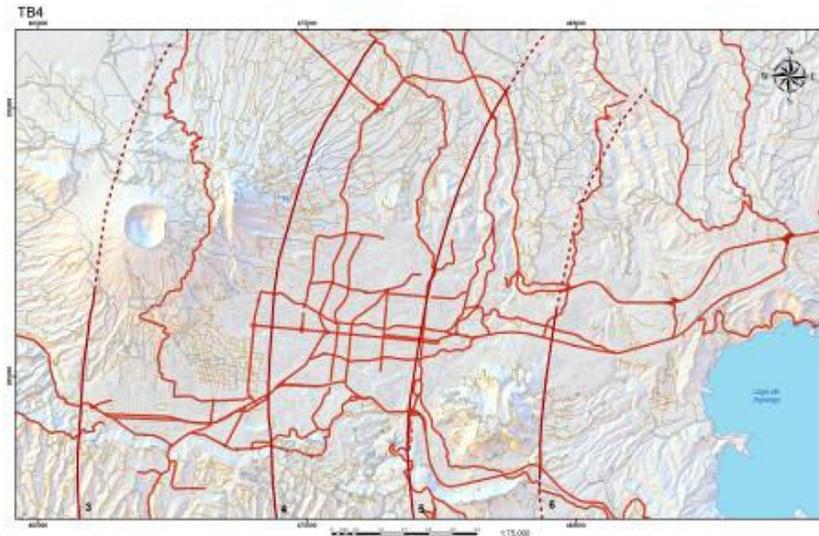


Figura 11. Mapa de isopocas del pómez de caída TB4 mostrando el mayor espesor medido de 6 m en Santo Tomás.

Pómez TB3- Es un pómez y cenizas de caída de granulometría fina, blanca con presencia de lapilli acrecional y flujos piroclásticos basales lo que señalan fenómenos eruptivos freatomagmáticos originados por la interacción entre el magma y las aguas de un antiguo lago (figura 12). En la zona proximal se han identificado depósitos de flujos piroclásticos en cuya matriz de ceniza fina están diseminados fragmentos de pómez. El techo de esta capa presenta un paleosuelo delgado poco desarrollado de color café, café-amarillento y frecuentemente presenta discontinuidades paralelas a la cara de los taludes como respuesta a los procesos de exfoliación. El mapa de isopocas de la figura 12 muestra bastante similitud en la distribución con TB2 (figura 13). El Consorcio

Salvador (1988) estimó un volumen para este depósito de 1-5 km³ (Dense Rock Equivalent:DRE) y su edad estimada en la razón de sedimentación marina en 19 ka (Kutterolf et al, 2007).

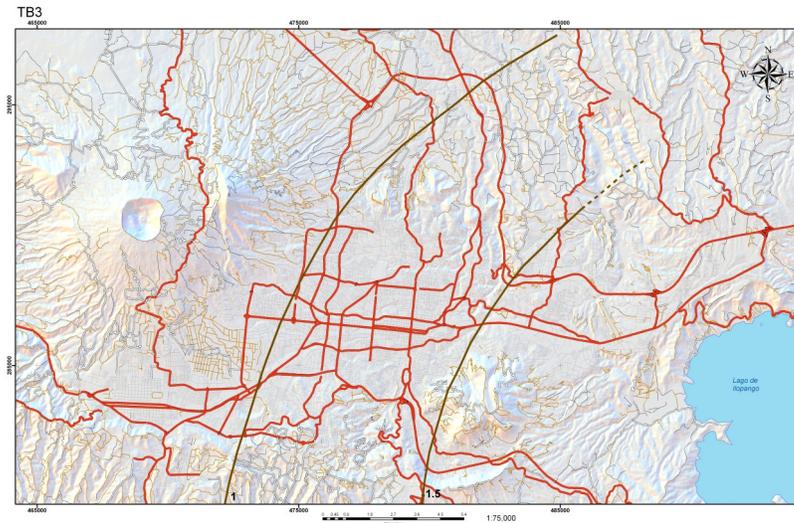


Figura 12.
Líneas de isopacas para la caída de pómez TB3.

Pómez TB2- Este depósito tiene espesor de 1 m dentro de un radio de 10 km del centro de emisión (figura 13), está compuesto por una caída de pómez ligeramente mayor que TB3 y caracterizado por ser mal seleccionado con abundantes minerales oscuros representados por hornblenda. El techo presenta un paleosuelo de delgado espesor, de color café oscuro. En taludes de la calle que conduce del Cantón Changallo hacia Santa Tomás, se observan varios depósitos de flujos piroclásticos de color amarillento asociados a esta erupción los cuales tienen poco desplazamiento. Está bastante consolidado y es muy estable en los cortes de carretera, frecuentemente presenta procesos de exfoliación. En las partes altas de las laderas del complejo volcánico San Salvador, es muy raro encontrar las capas de tefras de TB2 y TB3, debido a los procesos erosivos. El volumen estimado por el Consorcio Salvador (1988) para este depósito es de 1-5 km³ (DRE) y su edad ha sido estimada en 9 ka (Kutterolf et al, 2007).

Tierra Blanca Joven (TBJ)- El depósito Tierra Blanca Joven (TBJ) representó la última erupción explosiva cuyo cierre de este ciclo eruptivo está representado por el emplazamiento de los cerros Quemados ocurrido entre diciembre de 1879 y marzo de 1880 (Gooyear, W.1880). Son de composición dacítica y están ubicados dentro del lago Ilopango. La TBJ es el producto de una erupción ultraplánica cuyas cenizas de caída cubrieron completamente todo el territorio actual de El Salvador y se extendieron por una centena de kilómetros a las fronteras de Guatemala, Honduras y Nicaragua y Costa Rica (Kutterolf et al, 2007). Los flujos piroclásticos de este evento también cubren extensas áreas de los departamentos de San Salvador, La Libertad y La Paz y Cuscatlán. Estos depósitos fluyeron hacia el sur rellenando las depresiones de Santo Tomas y San Pedro Masahuat.

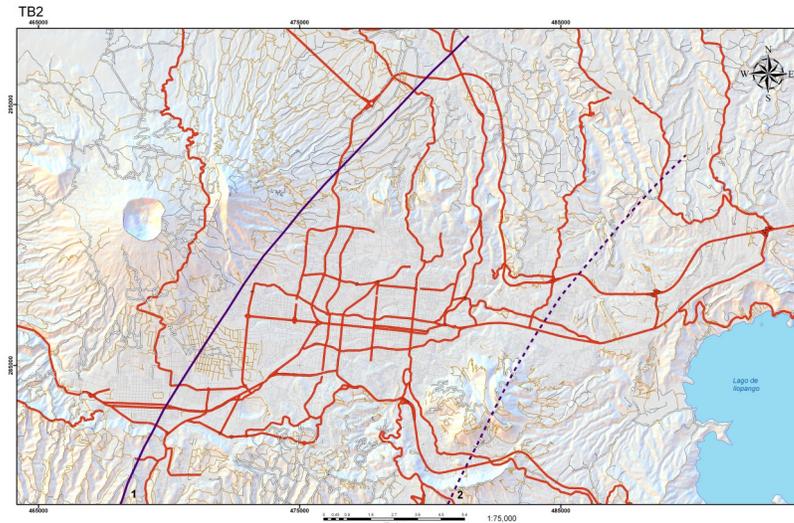


Figura 13.
Líneas de isopacas para la caída de pómez TB2.

El volcán San Salvador representa una barrera topográfica, sin embargo, un flujo subió hasta la cota 1740 m sobre la ladera oriental del San Salvador (Hernández, W., 2004). Otro flujo de cenizas finas se desplazó hacia abajo del valle Zapotitán desplazándose 37 km del borde de la caldera. Hacia el norte un flujo piroclástico se desplazó 27 km hasta alcanzar la ribera del río Lempa. Hacia el noroeste se desplazaron hasta tocar la base del cerro Nejapa. Hart and Steen-McIntire (1983) determinan que una distancia de 100 km desde el lago, se tiene un espesor de cenizas de 50 cm que cubren una extensión de $10,000 \text{ km}^2$, por lo constituyen la distribución más amplia de los depósitos de tefras en El Salvador, cuyo volumen estimado que emitió de magma diferenciado fue de $20\text{-}50 \text{ km}^3$. El estudio reciente de Kutterolf et al. (2007) determinó para TBJ un volumen de 70 km^3 DRE.

3. ESTRATIGRAFIA DE DEPOSITOS VOLCÁNICOS

Uno de los aspectos a que más se prestó atención a este trabajo ha sido ordenar en forma relativa los productos de las distintas erupciones, indicando la fuente de emisión y la distribución espacio-temporal de estos en el AMSS, para lo cual fue necesario un trabajo de campo para encontrar evidencias de las relaciones entre los depósitos. De esta manera se construyó el gráfico de la figura 14, que muestra el orden de cada depósito y su fuente de origen.

En el esquema, el borde occidental de Ilopango se utiliza como referencia de punto de partida de sus tetras, mientras que el borde oriental se utiliza para Coatepeque y el cráter para el complejo volcánico San Salvador y Plan de la Laguna. La separación en la horizontal de cada división equivale a 5 km. Las edades absolutas están a la derecha y con “ka¹” se señalan las edades calculadas por la relación de velocidad de asentamiento en el fondo del Océano Pacífico de América Central Kutterolf et al (2007).

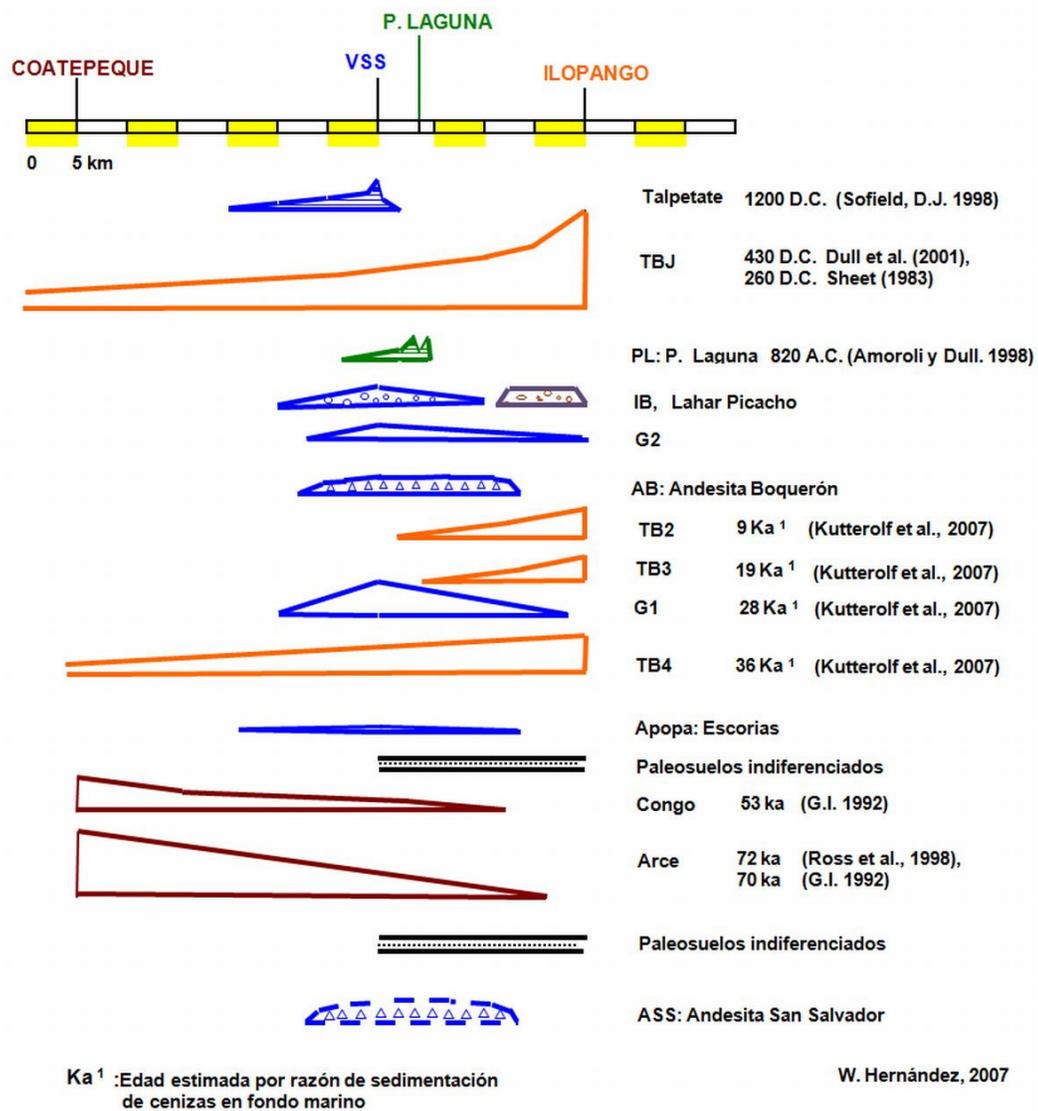


Figura 14. El esquema muestra la distribución espacio-temporal de los distintos materiales volcánicos en el AMSS.

4. SECTORES GEOLOGICOS

A raíz de la presencia del graben Central, de las estructuras volcánicas establecidas dentro de ese graben y del colapso caldérico del Volcán San Salvador, se pueden distinguir tres zonas geológicas denominadas: Picacho, Boquerón y Bálsamo, las cuales están produciendo cada una cierta influencia en el comportamiento geológico de la zona (figura15).

4.1 Zona Picacho- Está comprendida por la porción norte remanente del viejo edificio del volcán San Salvador. Los valles profundos en “V” son característicos e indicadores de lahares que se desprendieron de esa ladera y de manera recurrente se acumularon al pie de la misma, el último ocurrió en septiembre de 1982. Los ríos Urbina y Tomayate que corren de sur a norte y ubicados al oriente de esta ladera, se comportaron como barreras de las lavas que surgieron del antiguo edificio del San Salvador. Por otro lado, la zona del Picacho sirve a su vez de barrera para las lavas del cráter Boquerón (figura 15).

4.2 Zona Boquerón- Es la zona central comprendida entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo. A lo largo de esta estrecha zona topográficamente más deprimida, se han canalizado las coladas lávicas y flujos piroclásticos del Boquerón y también del antiguo edificio San Salvador, cuyos desplazamientos han sido limitados por el río Acelhuate que ha servido como barrera. Las lavas del Boquerón no se encuentran en la zona del Picacho ni en la zona del Bálsamo. El sector comprendido entre Santa Tecla y las colonias San Benito-Escalón-Flor Blanca, por estar muy cercano al cráter Boquerón, cuentan con muchos flujos de lavas de las distintas erupciones del Boquerón, lo cual, favorece para la conducción y almacenamiento de agua subterránea. Debido a la presencia de esas lavas bajo las tefras TBJ, IB y G2, en esta zona no se producen cañones en las quebradas, ya que las lavas resistentes impiden la profundización del cauce.

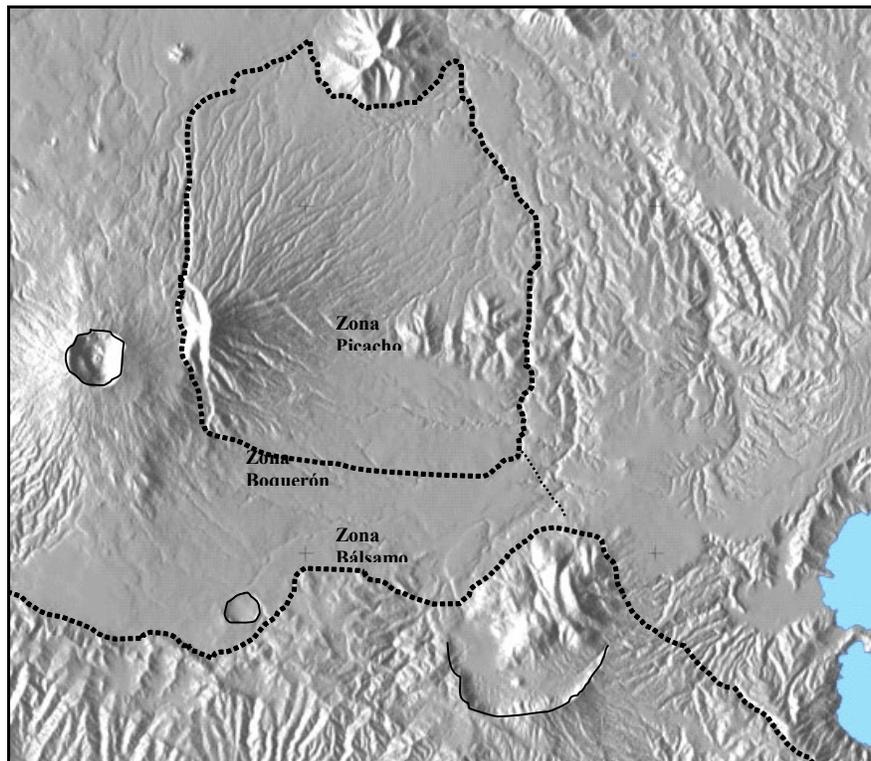


Figura 15. El modelo de elevación digital muestra las tres zonas geológicas en la proximidad del volcán de San Salvador.

4.3 Zona del Bálsamo- Está ubicada en la parte sur y topográficamente más elevada del AMSS que comprende la cordillera homónima. Se comportó como barrera para las coladas lávicas del antiguo edificio del San Salvador y actualmente para las del Boquerón. Las coladas lávicas presentes en esta zona pertenecen a otros eventos mucho más antiguos que a la misma formación del complejo volcánico San Salvador. Esta zona por contener las formaciones más antiguas del AMSS, han generado suelos rojizos, bastante desarrollados cuyas arcillas no han sido aún estudiadas y caracterizadas. Las cenizas de erupciones del Holoceno (10,000 años) de varios centros eruptivos, recubren esta cordillera, sin embargo, ante eventos de lluvias extremas o sismos importantes, en esta zona se producen deslizamientos rotacionales con daños recurrentes a las poblaciones, infraestructura vial, red eléctrica y otros servicios. La zona Picacho corresponde a la ladera relicto del antiguo edificio volcánico donde se originan lahares recurrentes. La zona Boquerón situada entre las zonas Picacho y Bálsamo corresponde al bloque estructural más deprimido, y la zona del Bálsamo corresponde al alto estructural y límite sur del graben Central.

5. MOVIMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La zona recarga principal está ubicada en la parte somital del edificio del Boquerón, a partir de donde el agua que se infiltra se mueve en forma radial, sin embargo, el flujo que se dirige hacia el sur al encontrar la barrera de la cordillera del Bálsamo, cambia de rumbo y se moviliza conforme lo indican las flechas (figura 16). La situación geológica del AMSS condiciona el movimiento de las aguas subterráneas, haciendo que estas migren desde la zona de recarga hacia Santa Tecla y luego se desplazan en dirección a San Salvador, Mejicanos y Ayutuxtepeque, de donde se movilizan varios flujos posiblemente hacia el este hasta alcanzar el extremo occidental de la ribera del lago Ilopango (Figura 15). Otros flujos pueden continuar el rumbo noreste para luego hacer un giro hacia el norte. En la zona Boquerón las lavas Andesitas Boquerón (AB) juegan un papel importante en el transporte del agua subterránea en grandes volúmenes, secundariamente lo hacen los depósitos piroclásticos TB4 y G1. En la zona Picacho las Andesitas San Salvador (ASS) constituyen el acuífero principal y entre ambas zonas existe una interconexión lateral. En ambas lavas el contacto inferior escoriáceo y el diaclasamiento producen alta permeabilidad. La zona Bálsamo se caracteriza por tener baja permeabilidad y locamente puede ser hasta media cuando está asociada a la presencia de fracturamiento por fallas.

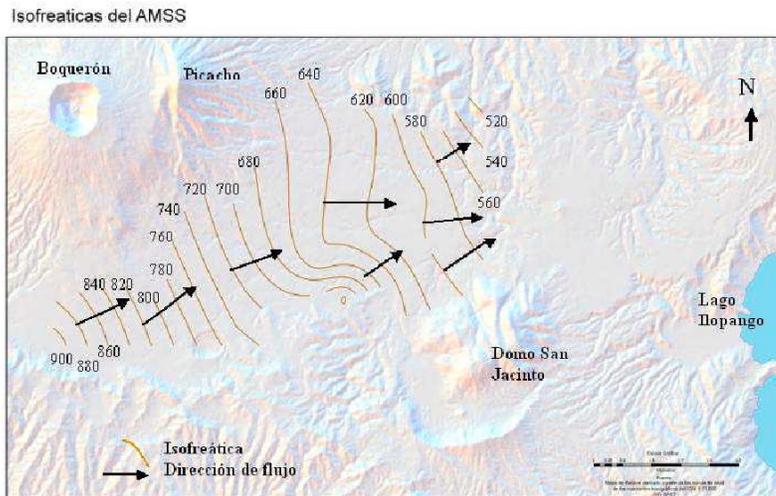


Figura 16. Curvas isofreáticas y movimiento del flujo de aguas subterráneas obtenidas de las mediciones de niveles de agua en la época seca de 1985.

Fuente: ANDA, 1985.

6. COMPORTAMIENTO SISMICO

Debido a la cercanía del volcán San Salvador y la caldera de Ilopango, los productos de ambos centros eruptivos se encuentran intercalados, situación que es más evidente al pie de la ladera del volcán San Salvador, donde lavas del Boquerón tienen una cobertura de aproximadamente 7 m de espesor de tefras del Ilopango y del mismo complejo San Salvador, en el sector de la colonia San Benito. Las tefras TBJ se adelgazan ladera arriba del volcán San Salvador pero hacia el oriente de la capital alcanzan espesores en torno a 60 m (Soyanpango y Ilopango), donde cubren otras tefras de la caldera de Ilopango cuyas espesores en conjunto superaran los 100 m de espesor.

Los depósitos de Tierra Blanca (TBJ, TB2, TB3 y TB4), en general, tienen baja consolidación, bajo peso específico, mientras que los depósitos más antiguos y subyacentes a esa secuencia, son ligeramente más consolidados. Sin embargo, debido a que el contraste de impedancia entre estos depósitos no es muy marcado, la respuesta al paso de una onda sísmica es similar. La baja consolidación de estos depósitos provocan una reducción en la velocidad con la que las ondas atraviesan los depósitos y por tanto, un incremento en la amplitud de los mismos (Salazar, W., et al, 2007), dando como resultado una mayor sacudida del terreno en esos depósitos piroclásticos. Situación contraria ocurre cuando una onda sísmica atraviesa una serie de lavas densas, duras y de gran espesor, donde la velocidad de las ondas sísmicas se incrementan pero con baja amplitud y alta frecuencia, condición que favorece la atenuación de la energía sísmica. Lo anterior ocurre en la ladera oriental del Boquerón, donde existen varias capas de andesitas básicas, con espesores importantes, cuyos desplazamientos no son iguales para todas las coladas lávicas y las de mayor desplazamientos encuentran la barrera del río Acelhuate. Además, las lavas más antiguas que TB4 juegan un papel importante como atenuador que se suma a las lavas más del Boquerón. En general se puede decir que ante la acción de un sismo la amplificación de las ondas sísmicas tiende a aumentar de la ladera del Boquerón en dirección hacia Soyapango.

El sismo del 10 de octubre de 1986 de magnitud Mw 5.4 ocasionó daños severos a las edificaciones sobre esos materiales en el centro de San Salvador, donde las tefras tienen espesores importantes, contrario lo ocurrido en sectores como las colonias Escalón, Dolores y Costa Rica, ubicadas geológicamente en condiciones más favorables para resistir impactos por sismos. Información acerca de los desplazamientos de lavas en subsuperficie se puede conocer a través de análisis perfiles litológicos de pozos perforados para agua potable y sondeos profundos con recuperación de testigos, que es la próxima etapa de complemento de este trabajo.

7. CONCLUSIONES

- En el AMSS afloran materiales piroclásticos provenientes de varios centros eruptivos tales como Coatepeque, Ilopango, complejo volcánico San Salvador, Plan de la Laguna, caldera Planes de Renderos y productos lávicos de los domos San Jacinto, Cuscatancingo, El Rosal y los del Ilopango, además de los conos de El Carmen y Ayutuxtepeque. Todo ese conjunto de depósitos piroclásticos y lávicos, estructuras volcánicas asociadas, además del fallamiento existente, generan condiciones geológicas complejas, sin embargo, en general se pueden reconocer tres zonas geológicas definidas: Zona Picacho, Zona Boquerón y Zona Bálsamo. La primera corresponde al sector donde son recurrentes los movimientos de masa y sus lavas forman parte de un excelente acuífero. La segunda es la zona más hundida y donde ocurre un marcado

cambio lateral geológico (este-oeste) producido más que todo por los desplazamientos cortos, medianos y largos que han tenido las distintas lavas que han salido del cráter Boquerón a lo largo de su historia eruptiva. Estas lavas y las del viejo edificio San Salvador (ASS) son las que conforman el acuífero de San Salvador y este conjunto a su vez, juega un papel importante como un macizo rocoso que sirve hasta cierto punto como amortiguador de ondas sísmicas en las partes próximal y medial del Boquerón.

En la parte distal la Andesita Boquerón(AB) alcanza el río Acelhuate y seguramente habrán más lavas en subsuperficie, el cauce del río coincide con el alto estructural que allí se inicia y que sirve como barrera. En este sector la influencia de los depósitos de la caldera de Ilopango se hace manifestar con las tefras de gran espesor las que aumentan más en dirección al E (Soyapango, Ilopango y San Martín) donde alcanzan espesores en torno a los 100 m, situación que favorece la amplificación de las ondas sísmicas. Por lo tanto, estas condiciones geológicas deben considerarse en todo proyecto de desarrollo dentro del AMSS.

- Se ha logrado cierto conocimiento de los espesores de las tefras sobre las lavas provenientes del Boquerón y la distribución de éstas. Sin embargo, no ocurre lo mismo con las lavas del edificio antiguo del San Salvador, por estar a mayor profundidad, por tanto, se deberá mejorar el conocimiento de la distribución de estas lavas por medio de datos provenientes de perforaciones ya existentes y nuevas que se programen en lugares de interés específico. Estas lavas constituyen el acuífero de San Salvador por estar fracturadas, por las zonas escoriáceas en la base y en el techo, tienen buena permeabilidad, permiten la circulación y almacenamiento de aguas subterráneas.
- El Picacho como estructura remanente del antiguo volcán San Salvador, ha estado produciendo recurrentemente flujos de escombros y cuyas evidencias pueden encontrarse bajo TB4 (36 ka), TBJ (hace 1.7 ka) en una amplia área compuesta por los municipios de Nejapa, Apopa, Mejicanos, Ayutuxtepeque y San Salvador y más recientemente en 1934, y 1982, este último causó numerosas pérdidas de vidas humanas y daños materiales en la colonia Montebello Poniente.
- Las cenizas Arce situadas en las laderas del complejo volcánico San Salvador con 72 ka (Rose, et al., 1999) se localizan entre paleosuelos con arcillas café indicando una interrupción eruptiva algo prolongada, estas arcillas a su vez yacen sobre lavas andesíticas del mismo volcán, por lo que conlleva a estimar una edad próxima a los 100 ka para el complejo volcánico San Salvador.
- La actividad sísmica y la acción meteórica asociada a los espesores de tefras TBJ tiene alta incidencia en la generación recurrente de derrumbes por vuelco, situación más común en los sectores de Soyapango, Ilopango y San Martín, donde las capas de piroclastos poseen espesores próximos a los 60 m, y donde el drenaje es muy profundo debido a la alta erosión facilitada por el material derrumbado. Estos derrumbes causan continuos daños a la infraestructura y pérdidas de vidas humanas.
- El apareamiento de nuevos depósitos piroclásticos del complejo volcánico San Salvador, es una señal que este es un volcán muy activo. Los estudios de esa serie volcánica, sus mecanismos eruptivos y nuevas dataciones de los productos eruptivos, podrán ofrecer en el futuro cercano, un mejor conocimiento de la recurrencia eruptiva del mismo.

8. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con la revisión de Carlos Pullinger quien hizo los comentarios valiosos y oportunos de todo el trabajo, la sísmica fue revisada por Eric Burgos quien ofreció importantes sugerencias para mejor comprensión de ese aspecto, así como también en las aguas subterráneas Mario Guevara ofreció el mapa de isofreáticas del acuífero de San Salvador y la revisión del texto. Para la elaboración de algunas figuras claves se contó con el apoyo informático de Giovanni Molina. Con todos ellos estoy muy agradecido y en especial con los organizadores de la Conferencia Internacional de Geotecnia, organizado por la Asociación Salvadoreña de Geotecnia con el apoyo de ASIA, por invitarme como ponente a dicho evento en julio de 2007, del cual posteriormente surgió la idea de presentar este trabajo.

9. REFERENCIAS

- Amoroli, P y Dull, R. (1998). Milpas prehispanicas en El Salvador. XII Simposio de investigaciones arqueológicas en Guatemala.
- Centro de Investigaciones Geotécnicas-CIG. (1987). Mapa Geológico del área de San Salvador y sus alrededores. Esc. 1:15,000. Ministerio de Obras Públicas. El Salvador.
- Centro de Investigaciones Geotécnicas-CIG. (1990). Avalancha de Montebello Poniente. Ministerio de Obras Públicas. El Salvador. Informe interno.
- Consorcio Salvador e Italtelkna Italtelconsult-Geotérmica Italiana (1988). Estudio vulcanológico. San Salvador-Programa di Ricostruzione. Republica Italiana, Ministero degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Ministerio de Obras Públicas. Informe Inédito.
- Dull R.A.; Southon J.R. and Sheets P. (2001). Volcanism, Ecology and Culture: A reassessment of the volcan Ilopango TBJ eruption in the Southern Maya Realm. Latin American Antiquity Vol. 12 Number 1, Society for American Archeology.
- Geotérmica Italiana (1992). Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Area Centro-Occidental de El Salvador. Informe Final. CEL-Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. El Salvador. Informe inédito.
- Goodyear, W.A. (1880). Earthquake and volcanic phenomena. December 1879 and January 1880. Republic of El Salvador. Panama.
- Guzmán, M., y Melara, E., (1996). Propiedades Ingenieriles del Suelo del Area Metropolitana de San Salvador, El Salvador, C.A. Revista ASIA. No. 122. El Salvador.
- Hart, W.J., and Steen McIntyre, V., (1983). Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 Eruption of Ilopango Caldera: in Archeology and Volcanism in Central America. University of Texas Press, Austin, Texas, p. 14-34.
- Hernández, W. (2004). Características geomecánicas y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango. El Salvador. Tesis de Maestría en Tecnologías Geológicas. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hernández, W. (2006). Mecanismo de ruptura de taludes en ignimbritas de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango, El Salvador. Revista ASIA-Asociación de Ingenieros y Arquitectos. 10 pag. El Salvador.
- Hoelting, B. (1961). El agua subterránea en los alrededores de San Salvador. Anales del Servicio Geológico de El Salvador. Ministerio de Obras Públicas.
- Kutterolf, S, Freundt, A, Perez W, Schmincke H.-U. (2007). The Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America, part 2: Distal tephtras from volcanoes in Guatemala and El Salvador, as well as along-arc eruption chronology. In press.
- Rolo R., Bommer J., Houghton B., Vallance J., Berdousis P., Mavrommati Ch., and Murphy W. (2004). Geologic and Engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. Imperial College London. In Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America. Special paper 375.

- Rose, W., 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. p. 106-120.
- Salazar, W., Sandirna, V., y Cortina, J. (2007). An Irvid inversion technique for the evaluation of source, path, and site effects employing S-wave spectra for subduction and upper-crustal earthquakes in El Salvador. *Bull. Sism. Soc. Am.* 97, 208-221.
- Vallance J., and Houghton B. (1998). The AD 260 eruption at Lake Ilopango, El Salvador: A complex explosive eruption through a caldera lake. National Science Foundation, Research Proposal.
- William H., and Meyer-Abich H. (1953). El origen del Lago de Ilopango: *Comunicaciones del Instituto Tropical Investigaciones Científicas* v. 26; p. 1-8.