



Mapa Geomorfológico escala 1:10,000 en un área de al menos 25 km², priorizando sectores vulnerables

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Escuela de Civil

Jiří Šebesta
Tomáš Hroch
José Alexander Chavez H.

Proyecto financiado con fondos de la AACID y ejecutado por COAMSS/OPAMSS





Índice

Introducción	3
Antecedentes	5
Metodología	11
Descripción de mapa y sus unidades	14
Conclusiones y Recomendaciones	22



Introducción

El presente documento forma parte del proyecto denominado “Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el Área Metropolitana de San Salvador” fase II, financiado por la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID) y ejecutado por el COAMSS/OPAMSS, dentro del proyecto se desarrollará, mediante un convenio específico entre la Universidad de El Salvador a través de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, el estudio e investigación denominado “ACTIVIDADES DE MAPEO Y CAPACITACIÓN DE ESTUDIOS DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA GEOLÓGICA Y DINÁMICA SUPERFICIAL EN SECTORES DEL AMSS”.

La Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AACID), está comprometida con proyectos que se enmarquen dentro del ámbito de Cambio climático, sostenibilidad ambiental y hábitat, asimismo el ámbito de acción de la AACID es acorde a los objetivos del proyecto que busca promover ordenamiento territorial y apoyar la planificación y desarrollo urbanístico desde una perspectiva de sostenibilidad y de contribuir a la generación de procesos de desarrollo en las áreas geográficas prioritarias.

Asimismo con la ejecución del proyecto se busca contribuir a la implementación de los lineamientos establecidos en la Política Metropolitana de Desarrollo Urbano y Territorial (COAMSS/OPAMSS), cuyo objetivo es buscar una ciudad ambientalmente sustentable, siendo temas prioritarios la gestión del riesgo, específicamente en lo relativo a: Investigación, mitigación, conocimiento y reglamentación, profundizando temas como vulcanismo, microzonificación sísmica, estabilidad de laderas y taludes, lahares y modelos hidráulicos de los drenajes primarios.

Las geo-ciencias también aportan en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana que buscan ciudades sostenibles y resilientes.

Los estudios y cartografía geológica, geomorfológica, así como de ingeniería geológica son un instrumento para comprender cómo y dónde los riesgos geológicos pueden afectar a los habitantes de determinada zona, siendo importante saber dónde están las mejores condiciones para el desarrollo de la ciudad. Este tipo de información proporciona datos importantes para la toma de decisiones de instituciones gubernamentales y para la planificación regional permitiendo encontrar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales (aguas subterráneas, por ejemplo) para desarrollar las áreas no perturbadas por las amenazas geológicas, que en esta región es particularmente importante para el desarrollo integral de la capital, y de todo el país. El conocimiento de las condiciones geológicas es también importante para el uso de tecnologías de construcción adecuadas, para evitar pérdidas humanas y económicas cada vez que un evento natural afecta el país.

El AMSS está expuesto a procesos geológicos endógenos y exógenos que tienen un impacto importante en la pérdida de vidas y bienes materiales, así como en pérdidas económicas, ocurriendo problemas de este tipo en esta ciudad de manera recurrente.

Se presenta trabajos de geomorfología haciendo uso de topografía a detalle y reciente (LIDAR) que se levanto al final de fase I, siendo zona critica el sector cercano a caldera de Ilopango, cunca de las Cañas y Chagüite.

Entre los problemas que se observa frecuentemente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) se pueden mencionar fenómenos como movimientos de ladera, inundaciones, terremotos, erosión intensa, intervención antrópica sin control, subsidencia o colapso y presencia de dos volcanes activos. Fenómenos como terremotos o huracanes hacen que el país retroceda en su desarrollo ya que se requieren elevadas sumas de dinero para la reconstrucción y dejan en la pobreza a las personas afectadas, siendo difícil que vuelvan a su nivel económico anterior.

Toda esta problemática podría ser reducida drásticamente si se conociera las características del territorio y se realizaran los estudios correspondientes cuando se proyecta una intervención antrópica; de manera que se pueda conocer de antemano la tecnología adecuada y las áreas en donde hay que tomar consideraciones puntuales.

En la actualidad en El Salvador hay escasez de profesionales preparados en las diferentes disciplinas de las ciencias de la tierra, se usa información de otros países o antigua. Esto produce poco conocimiento de temas como geotecnia, aguas subterráneas, sismicidad, geología, geomorfología, hidrología, riesgos etc. además de que no se trabaja a una escala adecuada. Esta situación se ve reflejada en la problemática que se vive actualmente en el AMSS ya que al no conocer el entorno natural o al tratar de bajar los costos evitando invertir en investigación, se puede llegar a tomar decisiones erradas que con el tiempo afectaran a un proyecto haciendo que la reparación sea más cara que si se hubiera hecho una investigación adecuada.

Actualmente son muchos los organismos que a nivel internacional apuestan a un desarrollo inclusivo y/o sostenible en el cual se priorice al ser humano como principio y fin del accionar. Estos enfoques que están siendo adoptados en El Salvador destacan por considerar la importancia de la interacción entre las diversas dimensiones del desarrollo: ambiental, sociocultural, económica, política e institucional.

Diferentes planteamientos coinciden en esta apuesta, entre ellos destacan el modelo de desarrollo inclusivo que ha venido implementando Japón en Centroamérica, los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y la Nueva Agenda Urbana promovida por ONU Hábitat.

Por su parte, el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 hace alusión a la de trabajar por conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles; así como el objetivo 13 que promueve la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

La Nueva Agenda Urbana centra también su interés en la Ecología Urbana y Medio Ambiente por la necesidad de una mayor participación de todos los actores urbanos en la planificación del medio ambiente, acción por el clima, y la reducción del riesgo de desastres.

Sin embargo, aunque estos modelos resulten innovadores y visionarios cabe traer a cuenta la importancia de contar con información pormenorizada y de fácil comprensión que dé cuenta de datos concretos en un primer momento para conocer la situación actual de las

ciudades, la elaboración de propuestas, posterior toma de decisiones de parte de las autoridades y ejecución de acciones específicas que puedan realizarse en los territorios.

Como ejemplo, es clave conocer de manera preliminar el tipo de investigaciones que se requiere para abordar temas vinculados a las amenazas geológicas e hidrometeorológicas, pues esto permitiría tener claridad sobre el diseño, obras de mitigación o uso del suelo más recomendado. Un elemento a considerar es que la investigación de ingeniería geológica pueda ser comprensible, ya sea a través de mapas fáciles de interpretar para planificadores urbanos, constructores y agencias gubernamentales. El objetivo de los trabajos de ingeniería geológica es que información geológica, dinámica superficial, peligrosidad geológica y recomendaciones geotécnicas puedan representarse y agruparse en un área determinada, dependiendo de las características intrínsecas de cada zona. El grado de simplificación dependerá del propósito y escala del mapa, la precisión de la información y las técnicas de representación.

Muy importante están las condiciones por erosión superficial y subterránea, especialmente en la zona de Badlands (erosión intensa) y cerca de los bordes expresivos de laderas erosionales con procesos dinámicos. La erosión subterránea provoca, especialmente en TBJ cavernas y cárcavas, que siempre producen problemas y daños sobre terrenos y casas ubicadas en estas zonas. La erosión superficial afecta por toda el AMSS en mayor o menor medida. Otras formas y unidades geomorfológicas problemáticas son los movimientos de ladera, especialmente los flujos escombros.

Por lo tanto, para conocer los procesos geodinámicos es muy bueno conocer el desarrollo de relieve de AMSS en general.

Antecedentes

A continuación, se presentará parte de la investigación hecha para el AMSS por parte de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS) y que está relacionada con geomorfología e ingeniería geológica. Enfocándose en la aplicación de investigación usando mapeo de geomorfología, dinámica superficial, ingeniería geológica, caracterización y monitoreo del suelo problemático Tierra Blanca Joven (TBJ).

Del 2005-2006 se elaboró “El Mapa Geomorfológico del AMSS” en escala 1:25,000; debido al interés de la OPAMSS en incorporar el análisis de riesgo ante peligros naturales en los estudios de planificación urbana. Última actualización de este mapa corresponde a las actividades de este proyecto.

En el año 2007 se continuó la elaboración de mapas y estudios especiales que aprovechan los datos básicos del mapa geomorfológico, resultando mapas temáticos sobre movimientos de ladera y sismicidad. Dichos mapas fueron incluidos dentro del Reglamento de Ley de Ordenamiento Territorial del AMSS en el 2009.

En el 2008 se empezó a trabajar en un sector de la cordillera del Bálsamo (Chamra et al. 2010) realizando mapeo de ingeniería geológica el cual utiliza el método de bandas para representar la estructura geológica debajo de los estratos más superficiales. Se realizó un

mapa de aptitud a la construcción donde se agrupo la información geológica, peligrosidad geológica y recomendaciones geotécnicas dependiendo de las características intrínsecas de cada zona. Además, se analizaron los riesgos desde una perspectiva de ingeniería geológica de zonas tales como el Picacho, el deslizamiento del Km.18 de la Carretera de Oro y se inició la recopilación de datos geotécnicos de estratos geológicos.

También en el periodo de 2008-2010 (Servicio Geológico Checo-OPAMSS) se obtuvieron el mapa geológico del sector del Bálsamo y mapa morfométrico del AMSS.

La elaboración de la cartografía y evaluación para estudiar los procesos erosivos en el AMSS se hizo en el 2010.

En el 2011 con proyecto del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) se actualizo mapa geomorfológico para toda la Subregión Metropolitana de San Salvador y se actualizaron los mapas derivados de geomorfología con nueva metodología (Flujos de escombros, deslizamientos, erosión fluvial, erosión subterránea, sismicidad y licuefacción, conveniencia de urbanización). Esta información fue incluida en la Zonificación Ambiental del MARN de Subregión Metropolitana de San Salvador (2013).

Desde el 2012 se ha investigado y caracterizado el comportamiento y propiedades de la Tierra Blanca Joven (TBJ) (producto de la última erupción pliniana de la caldera de Ilopango) la cual es el suelo más problemático dentro del AMSS (Chavez 2016). Se ha monitoreado con visitas a taludes dentro del AMSS mediante tensiómetro y sensores electromagnéticos TMS3, identificándose algunos factores que tienen que ver con los procesos de inestabilidad en los taludes. Además, en laboratorio se hizo uso de centrifuga, papel filtro y olla de presión para representar la succión a medida cambia humedad del suelo, lo cual sirve para diseño geotécnico (Chavez et al. 2016). También se ha caracterizado los flujos de escombros en Quebrada las Lajas de Mejicanos para conocer la capacidad hidráulica de las obras de paso y drenaje en caso de un flujo de escombros (Alfaro, 2014).

Del 2015 al 2017 se ha iniciado el monitoreo en taludes y en algunos drenajes con TBJ para medir y caracterizar los procesos erosivos para construir criterios en cuanto al uso del suelo, zonas de protección y obras de mitigación. Se han obtenido cambios horizontales y verticales de la superficie de estos suelos con el transcurso del tiempo con la idea de ir conociendo la tasa de erosión de la TBJ relacionando factores externos tales como las actividades antrópicas en estas áreas, clima, vegetación, usos de suelo entre otros. Este monitoreo se ha reiniciado en sectores cercanos a Caldera de Ilopango en el marco de fase II de este proyecto.

También en el 2015 se ha retomado el mapeo de ingeniería geológica en zonas de presión urbanística tales como carretera al Boquerón, Finca Mirasol para complementar sector mapeado en 2008 del Bálsamo. Dicha metodología ha sido retomada en fase I (incluyendo geomorfología) en sectores de el Carmen, Santa Tecla y cuenca de las Cañas, colocando litología y dinámica superficial observado en campo (Fig. 1-4).

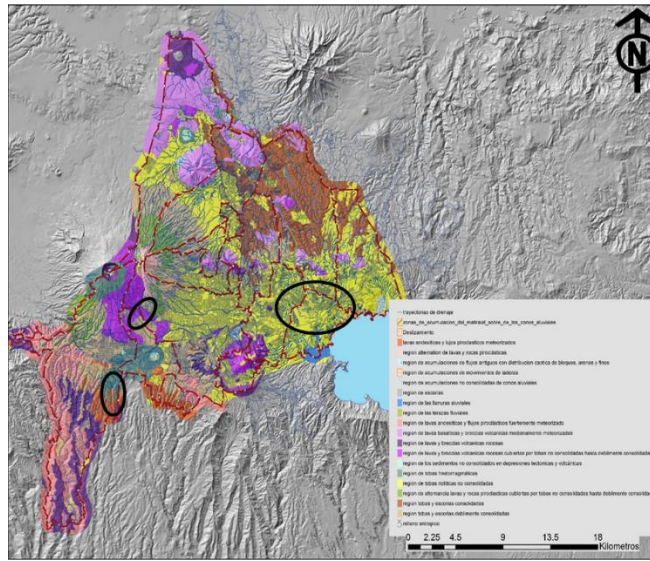


Fig. 1 Zonas trabajadas en fase I

MAPA GEOMORFOLÓGICO 1949 SECTOR CUENCA ALTA LAS CAÑAS

Proyecto financiado con fondos de la AACID
y ejecutado por COAMSS/OPAMSS

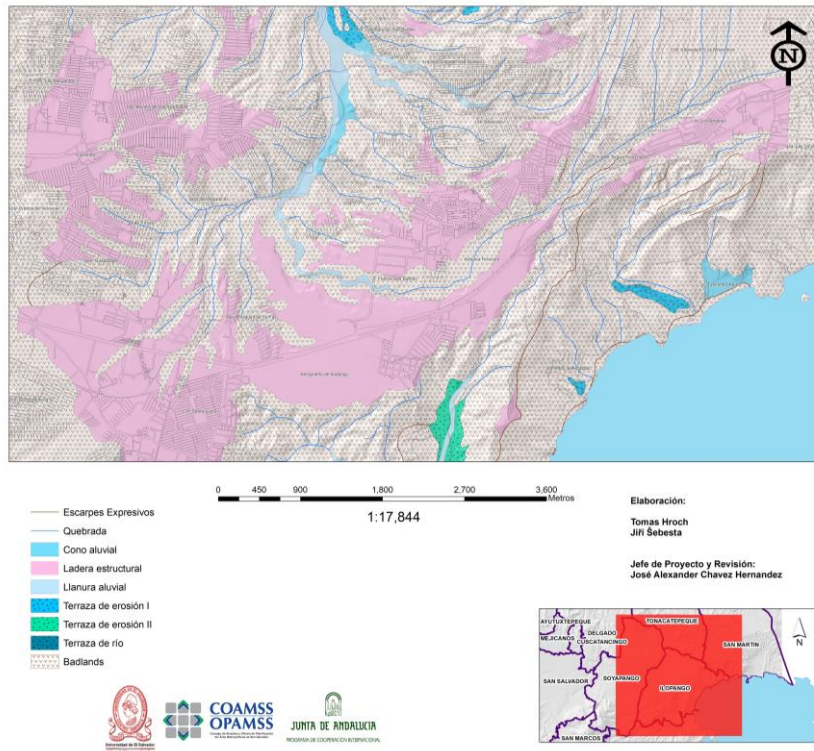
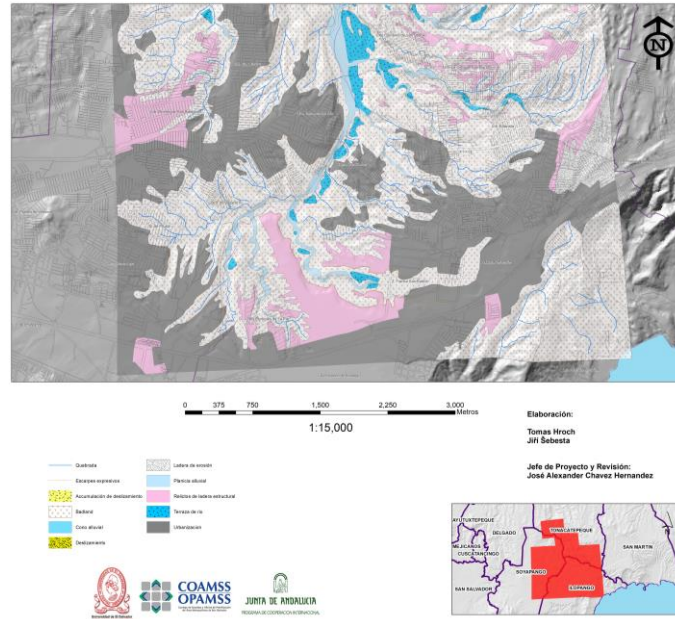


Fig. 2 Mapa Geomorfológico 1949 de zona las Cañas

MAPA GEOMORFOLÓGICO 1984 SECTOR CUENCA ALTA LAS CAÑAS

Proyecto financiado con fondos de la AACID
y ejecutado por COAMSS/OPAMSS



MAPA GEOMORFOLÓGICO 2001-2002 SECTOR CUENCA ALTA LAS CAÑAS

Proyecto financiado con fondos de la AACID
y ejecutado por COAMSS/OPAMSS

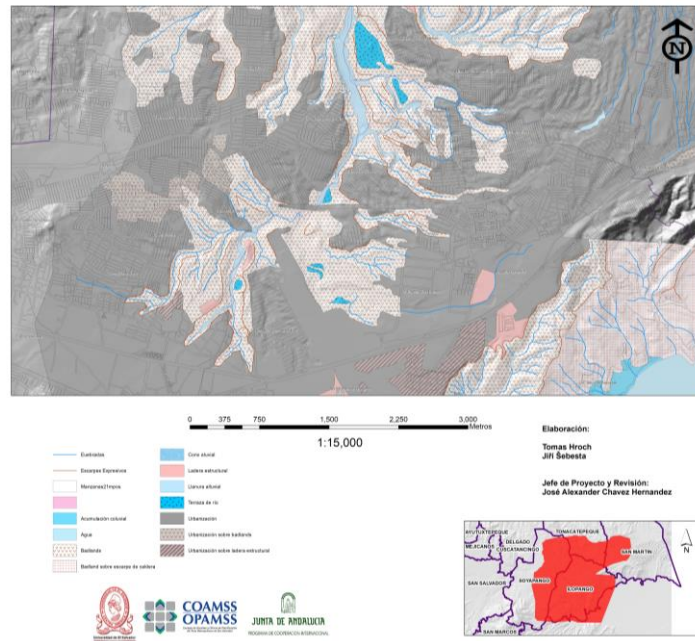


Fig. 2 Mapa Geomorfológico 1984 y 2001 de zona las Cañas

MAPA GEOMORFOLÓGICO SECTOR SANTA TECLA
Proyecto financiado con fondos de la AACID
y ejecutado por COAMSS/OPAMSS

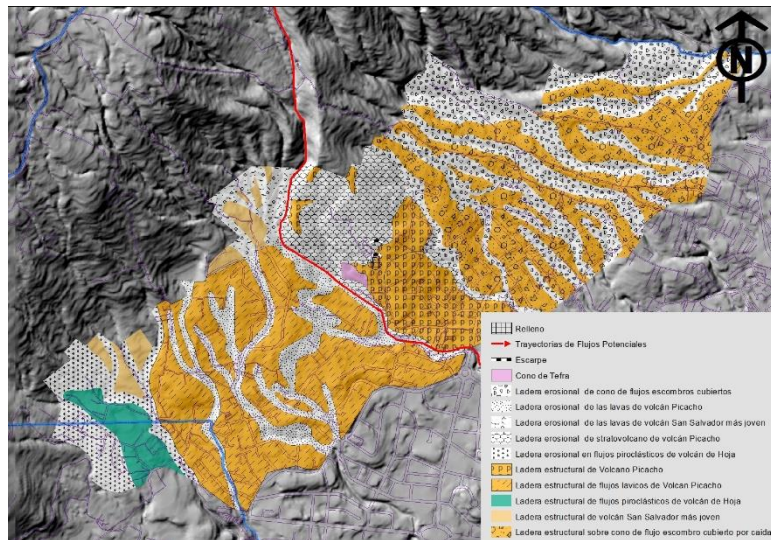
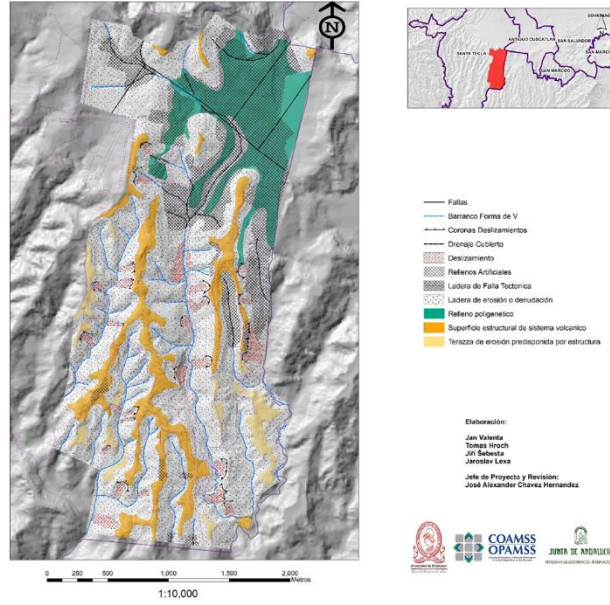


Fig. 4 Mapa Geomorfológicos zona Santa Tecla y el Carmen

Metodología

El tener la información de curvas topográficas a 1 m (mediante LIDAR) ayudo a actualización de mapa a mejor detalle, se hizo uso de fotografías aéreas antiguas para actualizar e identificar con estereoscopio sectores que actualmente están urbanizados y que antes eran zonas de Badlands o de laderas de erosión y por ende de mayor peligrosidad.

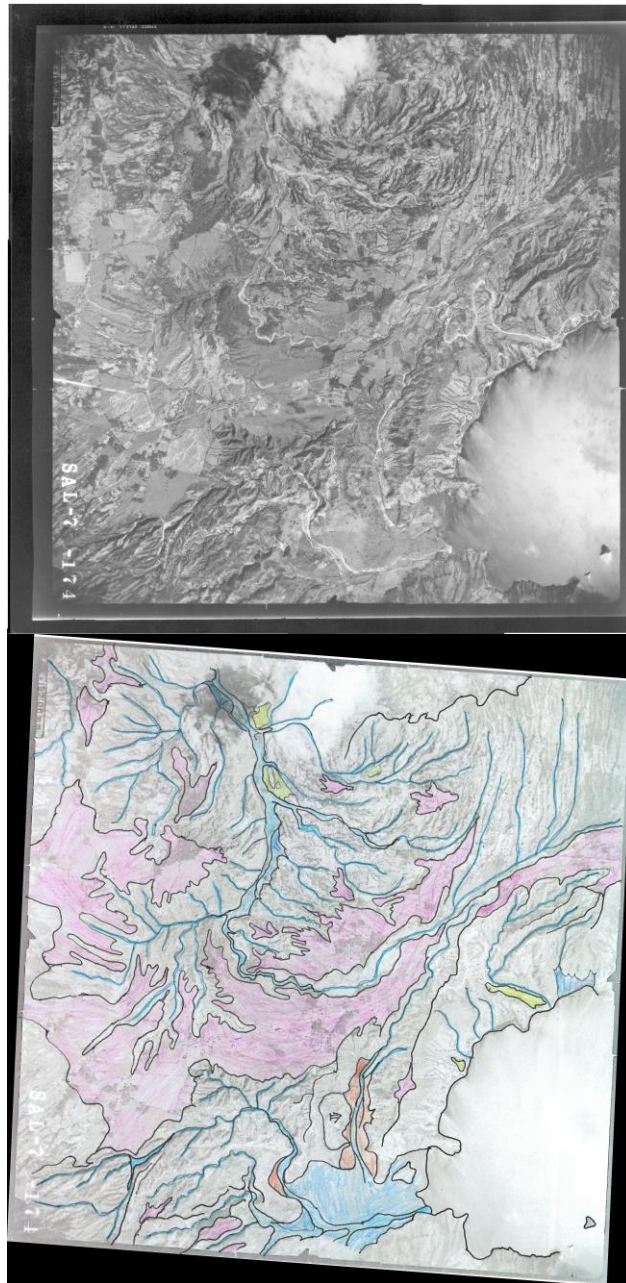


Fig. 6 Metodología de mapa geomorfológico con fotografías aéreas

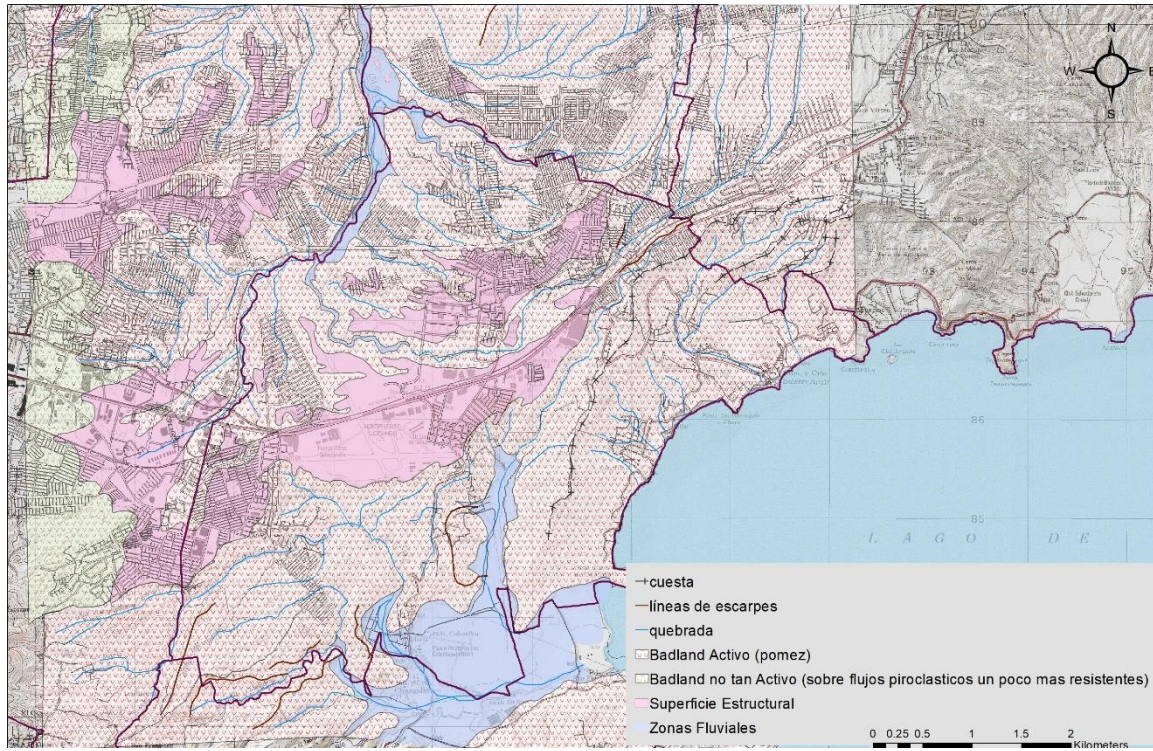


Fig. 7 Mapa geomorfológico actualizado de 1949 con zonas urbanizadas

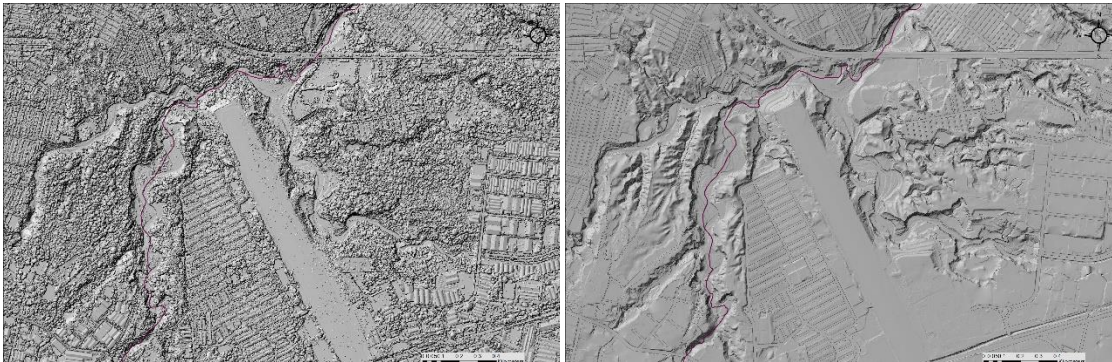


Fig. 8 Modelo de superficie (izq.) y de Terreno (der.) de zona de estudio

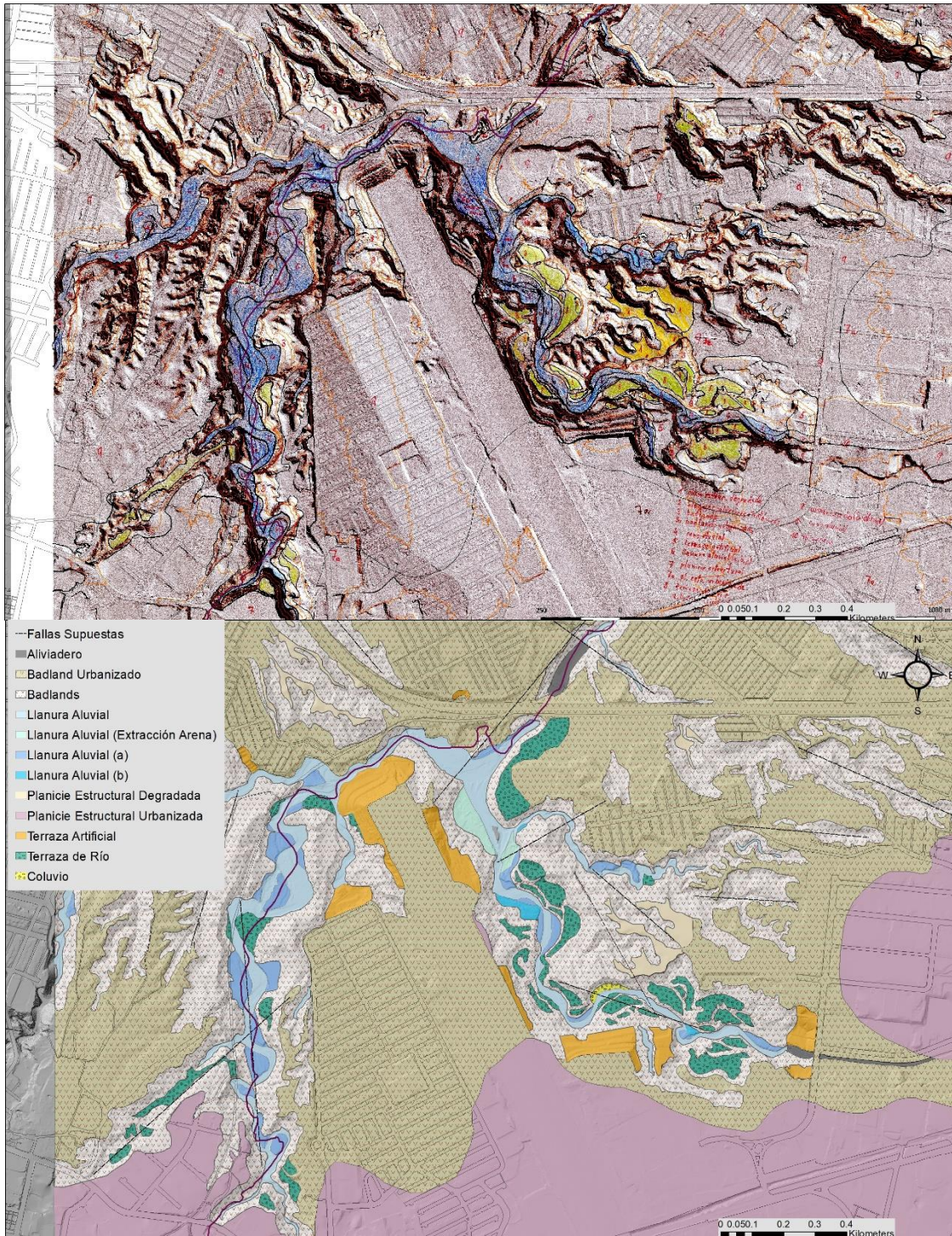


Fig. 9 Construcción e interpretación de mapa geomorfológico mediante LIDAR

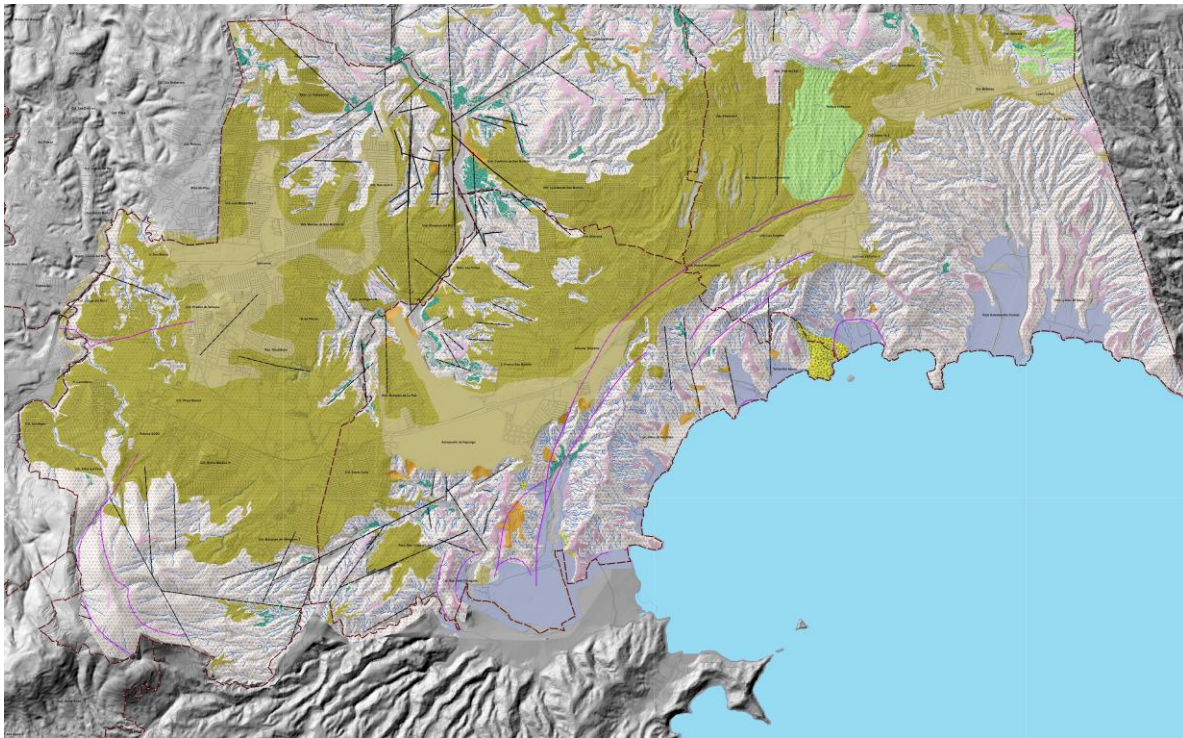


Fig. 10 Mapa geomorfológico escala 1:10,000 construido mediante LIDAR

Descripción de mapa y sus unidades

Fallas Geológicas

Las fallas principales son zonas de debilidad y discontinuidad que se forma en las rocas someras de la Tierra (~200 km de profundidad) por fracturamiento cuando concentraciones de fuerzas tectónicas exceden la resistencia de las rocas; cuando la actividad en una falla es repentina y abrupta, se puede producir un fuerte terremoto e incluso una ruptura de la superficie formando una forma topográfica llamada escarpe

de falla (Vertiente tectónica o plano de la falla desnuda). Son zonas de recarga y transporte de agua subterránea, pero también pueden actuar como barrera para las aguas subterráneas. Estas fallas pueden delimitar la ubicación de los acuíferos principales. Las fallas investigadas por análisis exodinámico representan líneas marcadas en la morfología de relieve y se supone, que se originan por los movimientos tectónicos y las cuales son afectadas por temblores y terremotos. Por algunas fallas ocurren movimientos de estructuras geológicas importantes como el colapso de Fosa Central (Depresión Salvadoreña). El sistema de fallas marginales relacionadas al colapso del Graben, el cual está conectado con el proceso de subducción en las costas del Océano Pacífico son sísmicamente activas (Colina de Santa Tecla 2001).

Problemas y riesgos: Sectores de fallas geológicas generalmente son impactadas por temblores y terremotos, siendo también zonas de transporte o de barrera de las aguas subterráneas. Generalmente están limitadas por laderas de fallas o vertientes tectónicas, siendo estas zonas peligrosas, especialmente las laderas, que puedan verse afectadas debido a sismicidad con movimientos de ladera (ejemplo de Colinas de Santa Tecla etc.) En todo caso las laderas de fallas no son estables y puedan iniciarse movimientos lentos (como reptación), que puedan también impactar las construcciones.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Las fallas son zonas con peligro muy alto debido a sismos y terremotos. Las fracturas de las fallas generalmente están abiertas y funcionan como zonas de recarga alta del agua subterránea y de entrada directa de contaminantes. Generalmente, si la falla pasa por una ladera, dependiendo de su ubicación se produce erosión vertical de barranco o quebrada (valle predispuesto por falla). En la intersección de la falla con el borde de ladera de erosión o borde de escarpe expresivo hay presencia frecuentemente de cabeceras de flujos de escombros (por fracturamiento y meteorización local) o deslizamientos y derrumbes. La susceptibilidad a erosión fluvial y a movimientos de ladera es alta

Planicie estructural

Las superficies estructurales más jóvenes de la Caldera de Ilopango (erosionada) son laderas poco inclinadas y relativamente planas, siendo las superficies cubiertas por las actividades volcánicas más antiguas de caldera de Ilopango u otros volcanes de AMSS.

Las planicies estructurales siempre han servido para la urbanización o para la agricultura. Pero sus escarpes u orillas son frágiles, especialmente debido a

movimientos de ladera (derrumbes) o por erosión retrograda, que puede impactar esta zona hasta decenas de metros lejos del escarpe.

Problemas y riesgos: La urbanización de esta zona que este cerca del escarpe, que limita la planicie estructural siempre sufre de problemas (por ejemplo Santa Lucía etc.).

Ladera estructural

Las superficies estructurales más jóvenes de la Caldera de Ilopango son laderas poco inclinadas y relativamente planas, siendo las superficies cubiertas por las últimas actividades volcánicas de caldera de Ilopango. Con respecto a las tobas de la Caldera de Ilopango corresponden a estructuras de Tierra Blanca Joven (TBJ) que se conservan.

La Caldera de Ilopango produjo caída y flujos piroclásticos de (TBJ), que cubren una extensión importante alrededor de la Caldera de Ilopango (de Lago de Ilopango). Esta cubierta por TBJ actualmente y en su mayoría esta erosionado por la erosión fluvial, pero todavía se conservan restos de la superficie estructural original, que todavía no están impactados por la erosión.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Las superficies estructurales más jóvenes de la Caldera de Ilopango son zonas con peligro de erosión bajo, excepto los bordes de estas superficies que colindan con las laderas de erosión, especialmente con Badlands. Los diferentes tipos de erosión y de movimiento de ladera siempre reducen su extensión cerca de los escarpes expresivos de ladera y pueden provocar problemas en las zonas urbanizadas.

Las superficies estructurales sobre TBJ tienen un equilibrio frágil y siempre es importante tener cuidado con cada actividad antrópica, porque puede provocar el origen de los diferentes tipos de erosión o hundimientos. Estas superficies son zonas de recarga alta.

La caldera es un centro volcánico activo (última erupción fue los años 1879 hasta 1880), por lo que puede tener actividad volcánica en el futuro. El diámetro del impacto catastrófico se estima de más de 30 km

Ladera de erosión, así como, denudación y su borde (orilla)

Las laderas de erosión forman las vertientes de los valles de erosión (quebradas, barrancos, cañones etc.). Generalmente tienen una inclinación alta, que permite la erosión de “suelo” alta hasta intensa. Según de las condiciones litológicas la erosión

es intensa o con menor intensidad. Las laderas de erosión de las zonas cubiertas (o con capas) de Tierra Blanca o cenizas de volcán San Salvador (materiales muy suaves y no consolidados) son las zonas más impactadas por la erosión de suelo y erosión fluvial. La erosión sucede junto con los procesos de movimiento de ladera como son los flujos superficiales y flujos de escombros. En algunos sectores son zonas de descarga de las aguas subterráneas (manantiales).

Las laderas de erosión se dividieron en badlands y otras laderas de erosión. Badlands es una ladera de erosión, que depende bastante de condiciones litológicas específicas (TBJ).

Problemas y riesgos: Las zonas de laderas de erosión son bastante jóvenes, lo que significa que los procesos de erosión siempre tienen una alta intensidad sucediendo de manera constante. Localmente es posible de manera temporal mitigar algunos sectores de la ladera de erosión, pero depende de dinámica de cada sector.

La ladera de erosión tiene diferentes inclinaciones, que son importantes para la erosión fluvial. También es importante la litología y meteorización de roca, pero siempre las laderas de erosión son expuestas a erosión, siendo las laderas con inclinación mayor que 25 grados con problemática muy alta; las laderas con inclinación entre 15 hasta 25 grados tienen problemática alta y menores que 15 grados tienen problemática mediana.

Badlands

Badlands pertenecen a las laderas de erosión, que dependen de las condiciones litológicas especiales de Tierra Blanca Joven (TBJ). En zona de estudio hay Badland que todavía no han sido afectados mucho por urbanización y se encuentran en cierto equilibrio que de ser roto podrían devenir en mas problemas.

Las superficies estructurales de Tierra Blanca Joven (TBJ) o Tierra Blanca más antigua (TB) que son suaves y poco resistentes son generalmente erosionadas a badlands. Son terrenos con una densidad de red de drenaje muy alta hasta extrema (quebradas muy cercanas entre si) y con los procesos de erosión muy intensos. Los badlands se originan antes que todo en la caída y flujos piroclásticos más débiles de TBJ – ceniza y flujos piroclásticos de pómez de la erupción pliniana más reciente de la Caldera de Ilopango. TBJ con su consistencia de compactación baja se erosiona fácilmente y tiene una permeabilidad relativamente alta y por eso también se inicia la erosión subterránea intensa. La erosión subterránea se origina por el agua subterránea que sale afuera por medio de manantiales o nacimientos y trae afuera del suelo las

partículas finas y minerales solubles. Cerca de los nacimientos el suelo está saturado debido al agua y en la ladera inclinada hay inestabilidad. Por eso la erosión subterránea produce un complejo de procesos que degradan el escarpe como son el colapso (hundimiento) de superficie (rápido y despacio) y movimientos de ladera (reptación de suelo o movimientos de ladera pequeños). El agua que sale afuera puede producir la erosión de suelo de tipo planar o de surcos hasta barrancos o cárcavas.

La profundidad de badlands depende de dos propiedades:

- el espesor de Tierra Blanca Joven (TBJ)
- distancia que está ubicada de la base de la erosión (Es el nivel bajo el cual el canal no puede erosionar, en la mayoría de casos es el nivel del mar, pero pueden ser lagos, represas o el nivel de un río principal donde descargan ríos tributarios).

Algunas zonas con espesor importante de TBJ tienen quebradas bastante profundas hasta decenas de metros. Algunas quebradas, que tienen superficialmente flujos piroclásticos o ignimbritas más resistentes tiene solo pocos metros de profundidad (por ejemplo en la zona de Alta Vista o Tonacatepeque etc.).

Podría originarse también licuefacción durante temblores o terremotos en sectores saturados. TBJ absorbe hasta 40% del agua de lluvia, lo cual podría permitir la licuefacción. Las laderas de las quebradas en la zona de badlands son muy inestables por la erosión de suelo y muy inestables por los movimientos de ladera, especialmente debido a flujos. Todos estos procesos no son convenientes para la urbanización y técnicamente es muy difícil parar o eliminar estos procesos. Para disminuir hasta cierto punto los procesos de erosión en la TBJ una posibilidad es la compactación de suelo, lo cual disminuye la infiltración del agua pluvial y para la erosión subterránea. Pero esta provisión es siempre temporal dependiendo de la estructura geológica (fallas, zonas de infiltración de agua pluvial, capas impermeables en el fondo etc.). Es necesario hacer una investigación detallada de las propiedades y comportamiento de este material geológico, de manera que se pueda tomar las decisiones más acordes con los procedimientos que normalmente son usados en el resto del mundo, siendo uno de ellos evitar que este material geológico entre en contacto con el agua.

Algunos terrenos de badlands fueron urbanizados o rellenados para diferentes construcciones. Generalmente el badland fue nivelado técnicamente a planicie o a alguna superficie poco inclinada, lo cual significa que las crestas fueron cortadas y ese material sirvió como relleno de quebradas. Cambiando el drenaje superficial y el sistema de drenaje subterráneo.

Problemas y riesgos: Cuando estos terrenos son urbanizados, generalmente se realizan rellenos artificiales, que después pueden ser afectados por la erosión subterránea produciéndose eventualmente cavernas. Las cavernas después colapsan y entra en riesgo daños en calles y viviendas. Los daños pueden desde pequeños hasta catastróficos. Si suceden lluvias fuertes y por bastante tiempo, el agua se puede mover de manera subsuperficial y puede iniciar erosión del tipo barranco o cárcavas, provocando que algunas zonas colapsen totalmente provocando daños en la infraestructura. En todo caso la unidad de badlands en el mapa geomorfológico representa una zona de peligrosidad muy alta. La mitigación de esta zona puede ser muy difícil, es mejor respetarla y no urbanizarla.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico y recarga: Los Badlands es una unidad geomorfológica con problemática muy alta para la erosión superficial y subterránea, así como, para los movimientos de ladera, especialmente debido a flujos. La peligrosidad de licuefacción es mediana.

Por la alta densidad de drenaje, saturación de agua de TBJ y alta permeabilidad los badlands son zonas de recarga alta.

Tipo de valle erosional

La mayoría de valles son valles erosionales, lo que significa, que en sus lechos ocurre erosión fluvial vertical y se profundizan permanentemente. La erosión fluvial vertical respeta las condiciones litológicas y tectónicas, especialmente la resistencia de las rocas contra la erosión. La curva de erosión generalmente no está equilibrada y por eso se originan escalones hasta saltos, pero también algunas partes son rellenadas por aluviones (Llanura aluvial). Las diferentes condiciones litológicas y tectónicas provocan las curvas de los ríos, que da como resultado la erosión lateral de ríos.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Los lechos de valles erosionales tienen problemática muy alta a erosión vertical y lateral de ríos. La erosión lateral siempre produce derrumbes o deslizamientos poligenéticos.

Barranco o valle de forma de V

Los Barrancos tienen el cauce excavado por la escorrentía superficial concentrada. En la cuenca alta donde la inclinación es alta, generalmente tienen forma de V. Predomina la erosión vertical. Este tipo de valles origina por mayoría en las ignimbritas.

Cauce del río (llanura aluvial)

Dentro del cauce del río se encuentra la llanura aluvial o llanura de inundación, que el río cuando viene crecido la ocupa toda (periodos de retorno de inundaciones pueden variar). El lecho del río se desplaza con bastante facilidad, inundando zonas alejadas del lecho principal actual. Las personas ocupan estas áreas al desconocer los periodos de retorno de las inundaciones provocando el estrechamiento del cauce y por lo tanto propiciando problemas grandes de erosión e inundación en zonas urbanas. Son zonas de recarga importante, así como de descarga de las aguas subterráneas y donde la contaminación que se vierte de las zonas urbanas puede entrar a los acuíferos (entrada de contaminantes puede ser directa si hay fracturamiento en roca).

Cauce o lecho de río en llanura aluvial siempre cambia su posición durante la inundación.

El impacto humano (tales como puentes, bóvedas, tuberías, muros de canalización etc.), puede provocar erosión natural en otros sectores, afectando infraestructura que normalmente no hubiera sido perturbada.

Problemas y riesgos: Las llanuras aluviales son zonas de inundación. Las inundaciones provocan cambios en la superficie de la llanura por erosión lateral y transporte de los sedimentos, siendo muy importante no urbanizar.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: La Llanura aluvial tiene una problemática muy alta a erosión fluvial como a inundaciones y acumulaciones de aluviones. En esta zona se puede dar recarga acuífera.

Cono aluvial activo

El cono aluvial activo es una forma de modelado fluvial donde se depositan sedimentos de ríos y quebradas de manera constante, tienen una silueta cónica o en abanico y una suave pendiente. Su forma cónica hace que ejerzan de barrera natural en los ríos obligando a estos a desviar su curso y adaptarse al relieve; de existir personas viviendo en esta zona pueden tener problemas de inundación y colmatación debido a la acumulación de material y a que el río puede cambiar su curso provocando problemas de erosión lateral y vertical.

La diferencia entre el cono activo y fósil reside en que el primero está actualmente en funcionamiento y el segundo ha quedado abandonado siendo actualmente un relicto. Son zonas de recarga importante.

Problemas y riesgos: Los conos aluviales activos son zonas de inundaciones y cambios de la superficie debido a la erosión y acumulación de sedimentos. Se recomienda no urbanizar.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Cono aluvial tiene problemática muy alta a inundaciones, acumulaciones de aluviones y licuefacción. La susceptibilidad a movimientos de ladera es baja.

En esta zona se puede dar recarga acuífera.

Terraza fluvial

Terraza fluvial es una estructura o forma que se origina debido a la acumulación de grava en la llanura aluvial antigua y que está cortada por la erosión vertical de río, quedando como resto de llanura aluvial antigua.

Susceptibilidad a riesgo geodinámico: Terraza fluvial tiene una problemática mediana a erosión y baja a movimientos de ladera. A licuefacción es mediana. Son zonas de recarga acuífera.

Acumulación de Derrumbe

Los derrumbes son movimientos de ladera importantes (algunos antiguos) que se pueden observar por la escala de trabajo y que de ser alterados por la urbanización pueden reactivarse.

Los coluvios, que son los productos de movimientos de ladera pueden ser acuíferos locales de explotación limitada o temporal. Las áreas susceptibles a movimiento de ladera son los bordes de donde hay cambios drásticos en la inclinación de la ladera. Los derrumbes son afectados por erosión lateral de ríos, temblores y terremotos, meteorización mecánica de roca y la actividad antrópica. Pueden iniciar también debido a lluvias fuertes.

Problemas y riesgos: Los derrumbes y otros movimientos de ladera siempre indican problemas relacionado con el cambio en la superficie.

Conclusiones y Recomendaciones

Lo que se busca con el análisis geomorfológico es *delimitar* y *explicar* el origen de cada forma de la superficie terrestre, así como, conocer el comportamiento que se puede esperar.

Los procesos geomorfológicos que actúan en la región se dividen en: *endógenos* (fuerzas internas de la Tierra) y los *exógenos* (factores o fuerzas externas que afectan la superficie terrestre, incluyendo la intervención antrópica).

Las formas y unidades del relieve pueden clasificarse en: tectónicos y estructurales, de denudación y de acumulación.

Las fuerzas que edifican el relieve, empujando, plegando, rompiendo, elevando y hundiendo fragmentos de la corteza terrestre son las fuerzas tectónicas. Las formas estructurales, tienen que ver con el relieve formado debido a procesos volcánicos, tales como laderas volcánicas de los conos o cráteres, por ejemplo.

La denudación es el conjunto de procesos que degradan el relieve, pudiendo acentuar los desniveles e incluye los procesos de erosión, así como, de movimientos de ladera. Al terminar de nivelar la superficie, puede reanudar su trabajo de excavación luego de que exista una nueva alteración en el relieve ya sea por procesos endógenos o por procesos exógenos. Gracias a la diferencia de resistencia litológica (dureza o resistencia) en las rocas se obtienen las formas del relieve.

Las unidades y formas geomorfológicas se dividen según su tipo genético (por los procesos, que participan a su origen) por ejemplo las *endógenas* pueden dividirse en: origen tectónico (la depresión salvadoreña y Fallas) y por actividad volcánica (volcanes, calderas, maares, domos, etc.); las *exógenas* se pueden dividir en Erosión (erosión retrógrada, erosión en el sistema de drenaje, erosión de suelo, erosión subterránea etc.); Movimientos de ladera (reptación, deslizamiento, flujo, derrumbe); meteorización de las rocas (laterita, esmectita); acumulación de aluvión (conos aluviales, lecho de río); Inundación (Llanura aluvial, lecho de río, agradación de aluviones); actividad humana (todos tipos de urbanización y formas antrópicas).

El relieve es un relieve muy joven con respecto a la edad geomorfológica y por eso los procesos endógenos como exógenos siempre funcionan y forman este relieve permanentemente. En su mayoría estos procesos se catalogan como peligrosos hasta catastróficos para las actividades humanas y por eso es importante eliminar al mínimo sus impactos.

Se observa la mejoría de mapa y por ende de información que servirá para delimitación de zonas de protección, propuesta de obras de mitigación estructurales/no estructurales, criterios de alerta temprana.

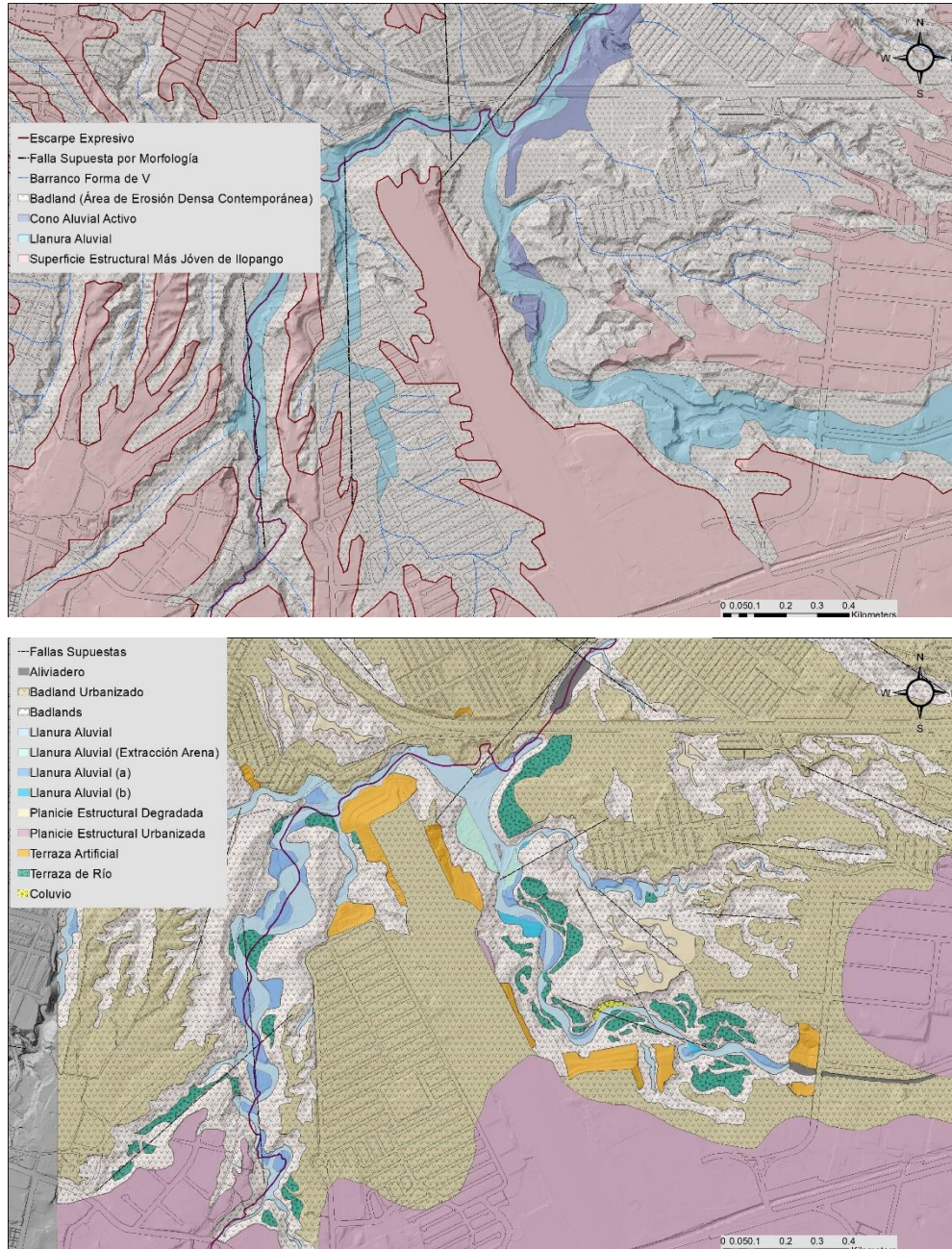


Fig. 11 Comparación de mapa geomorfológicos de escala metropolitana y escala 1:10,000