



Mapa de Peligrosidad 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	9
Descripción de mapa y sus unidades	19
Conclusiones y Recomendaciones	26

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 y dinámica superficial haciendo uso de topografía a detalle y reciente (LIDAR) que se levantó al final de fase I, siendo zona crítica 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.

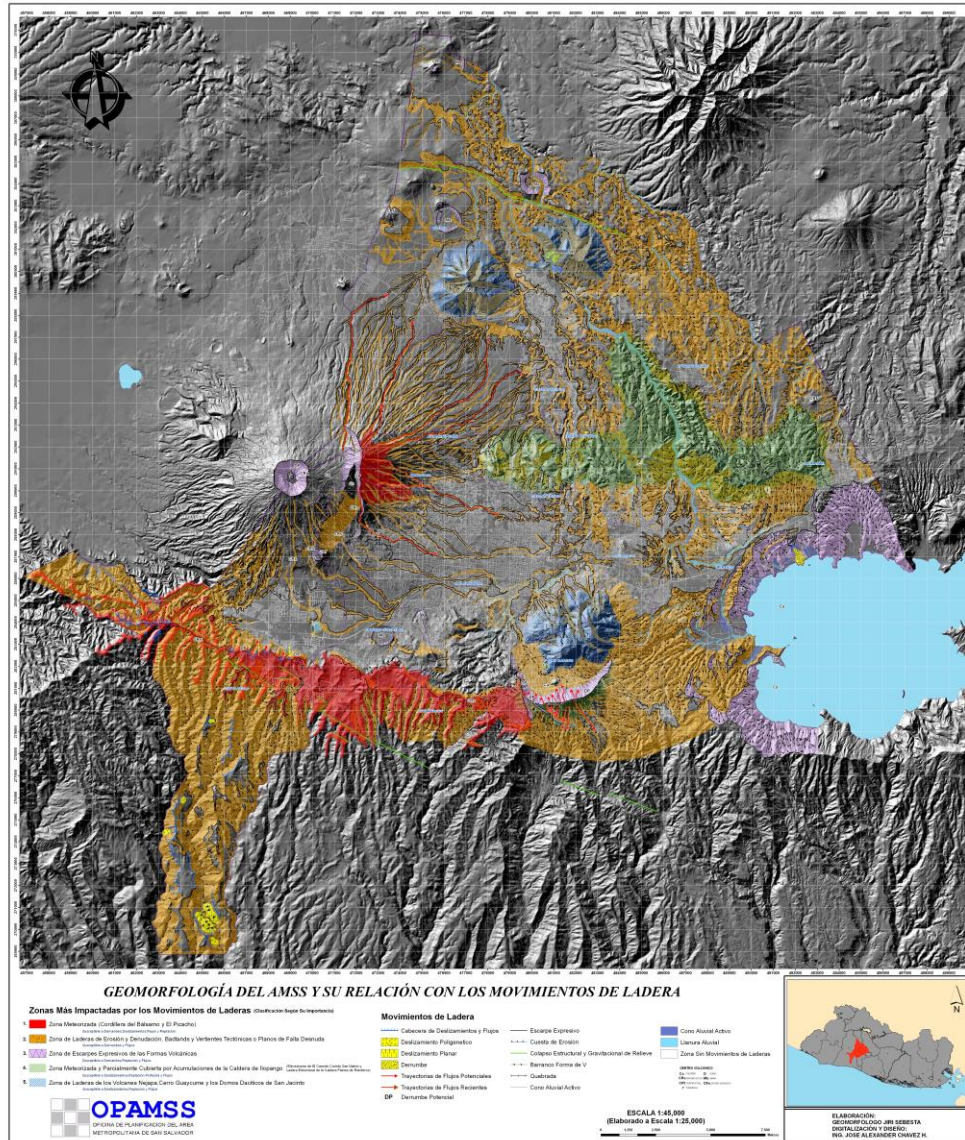
Por lo tanto, para conocer los procesos geodinámicos es muy bueno conocer el desarrollo de relieve de AMSS en general.

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 y dinámica superficial. Enfocándose en la aplicación de investigación usando mapeo de geomorfología, dinámica superficial, ingeniería geológica, caracterización y monitoreo del suelo problemático Tierra Blanca Joven (TBJ).

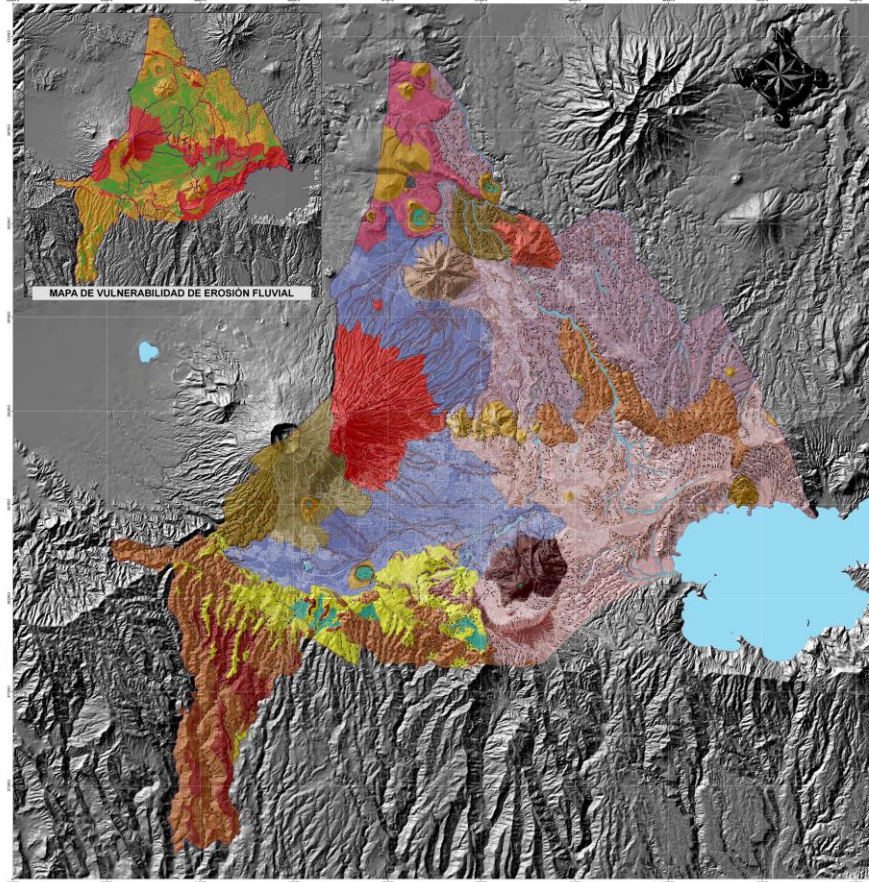
En los periodos de 2005-2006, 2011 y 2018-2019 se elaboró “El Mapa Geomorfológico del AMSS” en escala 1:25,000; debido al interés de la OPAMSS en incorporar el análisis de riesgo ante peligros naturales en los estudios de planificación urbana. Última actualización de este mapa corresponde a las actividades 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.



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

MAPA ESQUEMATICO DE EROSION FLUVIAL DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR



MAPA DE VULNERABILIDAD DE EROSION FLUVIAL

1:0000

TIPO DE VULNERABILIDAD	LEYENDA MAPA ESQUEMATICO DE EROSION FLUVIAL	UNIDADES Y FORMAS GEOMORFOLÓGICAS
1	Acumulaciones de fangos aluviales (no hay resistencia de rocas)	Conos o colinas
2	Acumulaciones de arenas de río (resistencia de rocas mediana)	Laderas de loma
3	Pedregos poligonales de depresiones en drenaje (no hay resistencia de rocas planicie)	Laderas de erosión de roca
4	Acumulaciones de arenas, arena y otros materiales de depósitos (depósitos como riego de Depresión Central) (resistencia de rocas mediana, laderas poco inclinadas hacia planicies)	Planicies Erosionales
1 (B)	Cerdeas y Riegos perimetrales de TB (no hay resistencia de rocas, poca inclinación de laderas, bordando y relleno de planicies)	Bancales Forma de V
2 (B)	Playas perimetrales y riego de TB (resistencia de rocas mediana y relleno de planicies)	Escarpa Esguereño
3	Conjuntos de lomas de TB y lomas antiguas de la Cumbre de Ilopango y Chapultepec, incluyendo horizontes de arena del volcán San Salvador (resistencia de rocas alta inclinación de laderas mediana)	Cañonales
4	Acumulaciones de arenas volcánicas depósitos con coque de productos (resacas, conos de escoria, domos, etc.) (resistencia de rocas alta inclinación de laderas mediana)	Quelchales de erosión retrogradada
1	Escoria y cenizas del volcán San Salvador (resistencia de rocas mediana, inclinación de laderas alta)	Valle Andén
2	Lomas andénicas del volcán San Salvador (resistencia de rocas alta, inclinación de laderas alta)	
3	Lomas de cerros y andénicas de San Jacinto (resistencia de rocas alta, inclinación de laderas alta)	
4	Lomas y otros afloramientos de cerros volcánicos Como Largo (resistencia de rocas alta inclinación de laderas alta hacia mediana)	
1	Lomas y otros afloramientos del volcán Itzapa (resistencia de rocas alta, inclinación de laderas alta)	
2 (B)	Gravetas de la Cumbre, Acajutla (resistencia de rocas alta, inclinación de laderas alta hacia mediana, relleno de planicies)	
3	Acumulaciones de un conito volcánico secundario (resistencia de rocas mediana)	
4	Lomas de conito volcánicos del norte (lomas mineralizadas, parícutos de Itzapa)	
1	Lomas y otros afloramientos de conito volcánico Itzapa (resistencia de rocas mediana, inclinación de lomas, parícutos de Itzapa)	
2	Aglomerados y conglomerados de gravetas y lomas de El Estero (resistencia de rocas alta, inclinación de laderas alta hacia mediana)	
	Resaca	

LEYENDA MAPA DE VULNERABILIDAD DE EROSION FLUVIAL

- Superficie con erosión de sustrato interna y profunda
- Superficie con erosión de sustrato mediana
- Superficie con erosión de sustrato hacia un estrato de sustrato

EMBAJADA DE LA REPUBLICA CHECA EN SAN JOSÉ, COSTA RICA

OPAMSS OFICINA DE PLANIFICACION DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR

SNET SISTEMA NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

INTEGRA INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

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).

Del 2015 al 2017, retomándose en 2021, 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.

Todos estos productos ayudan en la toma de decisiones en cuanto al uso de suelo, zonas de protección, obras de mitigación e investigación necesaria para los proyectos dentro del AMSS. Todo con la idea de disminuir los riesgos y tener un Área Metropolitana sostenible. La idea de los mapas es que quede plasmada situación del terreno (litología, situación de estabilidad de ladera, rellenos artificiales, zonas de movimientos de ladera, tectónica, peligrosidad volcánica etc.) que ayuden a dar recomendaciones para el uso del suelo, zonas de protección, criterios para futuros proyectos urbanísticos y laderas/taludes.

Metodología

El tener la información de curvas topográficas a 1 m (mediante LIDAR) ayudo a actualización de mapa geomorfológico a mejor detalle (ampliándose la zona de estudio), 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. Esta información es la usada como base para derivar en un mapa de peligrosidad por dinámica superficial.

La geomorfología dinámica permite evaluar la superficie del territorio tanto por los procesos geomorfológicos exodinámicos, así como, los endodinámicos; los cuales han ocurrido a lo largo del tiempo y los que están sucediendo actualmente, siendo el relieve existente un resultado de la combinación de estos procesos. El análisis geomorfológico, como un método deductivo estudia estos procesos, mapeando y verificando en el campo los

procesos mencionados anteriormente. En combinación con la evaluación litológica aporta una base de datos nueva, que después permite evaluar diferentes sectores según su conveniencia para los diferentes tipos de uso de suelo, además de dar alguna información para la geología ingeniera, Protección Civil, Ordenamiento Territorial etc.

Algunos procesos que no corresponden con las actividades humanas o antrópicas pueden crear peligro y complicar estas actividades antrópicas. La evaluación de cada unidad y forma geomorfológica desde este punto de vista permite asignar un nivel de peligrosidad para un determinado uso de suelo.

Las zonas con problemáticas catalogadas como bajas, mediana, altas y muy altas según geomorfología, son un indicador de la dinámica superficial que se puede esperar en algunos sectores, sin embargo, es importante realizar estudios preliminares y visita de campo para valorar situación actual del terreno, esto ayudara a identificar estudios que tienen que realizarse.

Cuando una zona este en mediana o baja problemática hay que valorar que si esta al pie o en corona de zona que este en alta o muy alta problemática. El mapa indica en cada polígono su peligrosidad, pero hay que valorar el entorno también.

Es significativo realizar estudios preliminares para un proyecto ya que esta fase es la que marcara las consideraciones a tomar en cuanto al proyecto en el futuro; esto corresponde a la etapa de anteproyecto y esencialmente es la recopilación de información bibliográfica y cartográfica que exista en el área de estudio, además de visitas de reconocimiento, lo cual ayudara a conocer los lugares más adecuados para la construcción de la obra dependiendo de las condiciones geológicas y geotécnicas. Su resultado tiene que ser un informe en donde se haga la planificación de los estudios de detalle (de ser necesarios).

En cuanto a la recopilación de información es necesario conseguir los estudios hechos en esa área o cerca de esta, debiendo analizar dicha información para conocer algo sobre la geología, topografía, aguas, estratigrafía, litología, problemática, riesgos etc., además de la revisión de fotografías aéreas e imágenes satelitales existentes.

La visita de reconocimiento sirve para comparar la información recolectada contra la realidad, ayudando a conocer la factibilidad de la construcción, así como, información geológica, estructural, geodinámica, geomorfológica, estado de las aguas entre otros, además de ayudar a elegir qué tipo de programa de exploración será necesario.

Esta visita de reconocimiento es muy importante ya que se puede descartar o aceptar un determinado terreno

Cada unidad del Mapa Geomorfológico fue clasificada según su problemática ante los fenómenos de denudación; esta clasificación se hizo con base al conocimiento de los procesos dinámicos endógenos y exógenos, rangos de pendientes, visitas de campo, problemática observada debido a lluvia y sismos, además de lo observado en las fotografías aéreas.

El mapa de pendientes refleja las condiciones topográficas en función del relieve y la inclinación del terreno, lo cual es un insumo para la generación de los mapas de peligrosidad.

La secuencia para la construcción de los mapas de peligrosidad por dinámica superficial es a partir del mapa de pendientes y geomorfológico. Al realizar un cruce entre el mapa geomorfológico y el mapa de pendientes, se obtuvo información de las condiciones de cada unidad geomorfológica situada en el territorio, relacionada con la inclinación respecto a la horizontal (pendiente). Luego se definió una categoría de las unidades geomorfológicas según problemáticas.

En la descripción de unidades se detalla su clasificación.

Las regiones más impactadas por la erosión fluvial son las siguientes:

- Laderas de erosión, que incluyen los badlands y sus bordes con laderas de superficies estructurales etc.; vertientes de fallas y escarpes expresivos de la Caldera Ilopango, que están compuestas por TBJ (ceniza y flujos piroclásticos mal compactados y flujos de pómez) en los municipios de Ilopango, Soyapango, San Martín, Tonacatepeque etc.
- Terraza fluvial tiene una problemática mediana a erosión y baja a movimientos de ladera. A licuefacción es mediana. Son zonas de recarga acuífera.
- las acumulaciones de deslizamientos (coluvio) tienen una problemática muy alta a la erosión fluvial y movimientos de laderas. La licuefacción es mediana.

La función de curvatura se usó para identificar zonas más críticas, y que se visualiza la forma o la curvatura de la pendiente. Una parte de la superficie puede ser cóncava o convexa. Es fácil de comprobar consultando el valor de la curvatura. La curvatura se obtiene calculando la derivada segunda de la superficie.

La salida de la función de curvatura se puede utilizar para describir las características físicas de una cuenca de drenaje para intentar entender los procesos de erosión y escorrentía. El valor de la curvatura se puede usar para encontrar los patrones de erosión de los suelos, así como la distribución del agua en tierra. La curvatura del perfil afecta la aceleración y desaceleración del flujo y, por lo tanto, influye en la erosión y la sedimentación. La curvatura de la plataforma influye en la convergencia y divergencia del flujo.

Hay tres parámetros en la función de curvatura:

- Ráster de entrada: ráster DEM en el que cada píxel almacena la elevación.
- Tipo de curvatura: el tipo de curvatura acentúa diferentes aspectos de la pendiente. Existen tres opciones para el tipo de curvatura: Perfil, Plano y Estándar.
- Factor Z: el factor z ajusta las unidades de medida para las unidades z cuando son diferentes de las unidades x, y de la superficie de entrada. Si las unidades x,y, y la unidad z están en las mismas unidades de medida, el factor z debería establecerse en 1. Los valores z de la superficie de entrada se multiplican por el factor z cuando se calcula la superficie de salida final. Por ejemplo, si las unidades z son pies y las

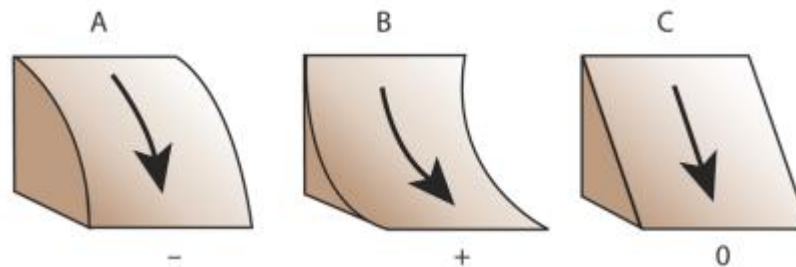
unidades x,y son metros, debe utilizar un factor z de 0,3048 para convertir las unidades z de pies a metros, ya que 1 pie = 0,3048 metros.

Tipo de curvatura

El tipo de curvatura acentúa diferentes aspectos de la forma de la pendiente. Elija el tipo de curvatura que mejor se adapte a la visualización que desee.

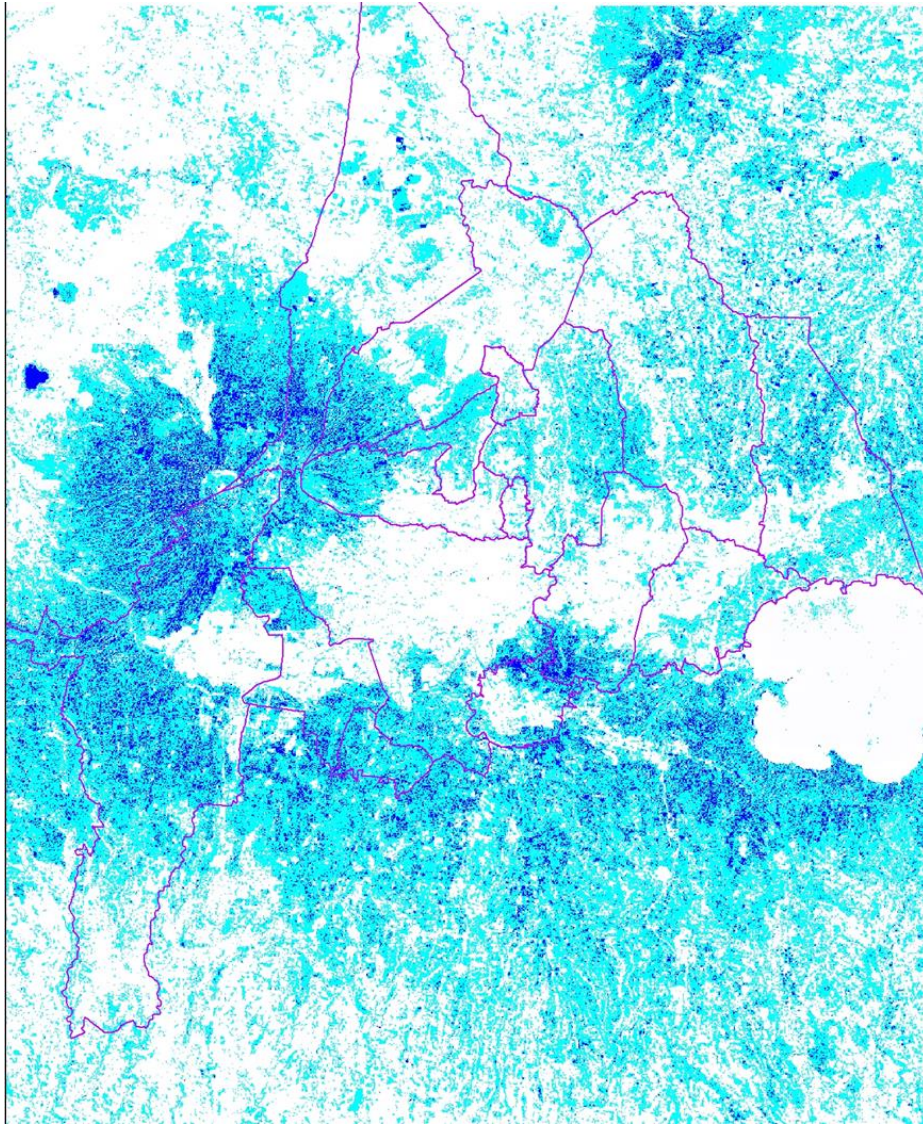
Perfil

La curvatura de perfil es paralela a la pendiente e indica la dirección de la pendiente máxima. Afecta a la aceleración y desaceleración de las corrientes por la superficie. Un valor negativo (A) indica que la superficie es convexa hacia arriba en esa celda y la corriente se desacelerará. Un perfil positivo (B) indica que la superficie es cóncava arriba en esa celda y la corriente se acelerará. Un valor de cero indica que la superficie es lineal (C).



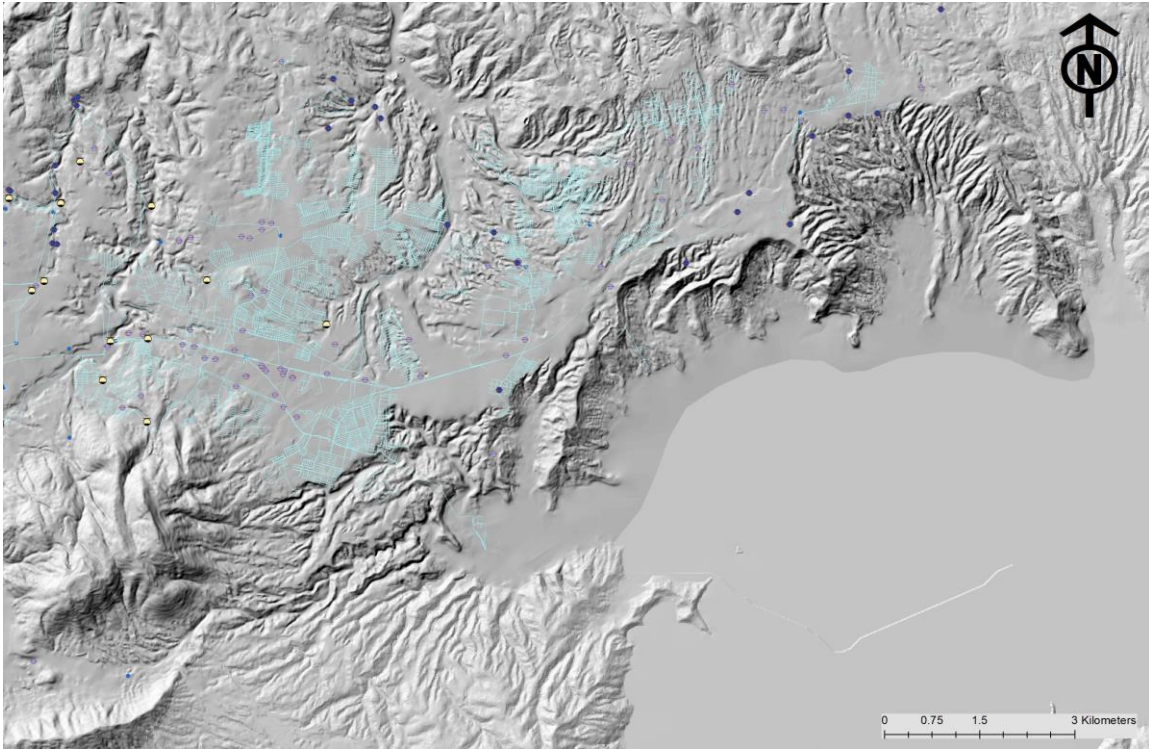
Stress de Humedad de Sentinel 2 se usos para identificar humedad anómala en verano. Haciendo uso del índice = $(B08 - B11) / (B08 + B11)$.

Para todos los valores de índice superiores a 0, conociendo el uso y la cobertura del suelo, es posible determinar si se ha realizado el riego. Siguiendo esta lógica, mientras se comprende el uso de suelo y las condiciones climáticas del área, es posible diferenciar entre áreas productivas y no productivas, así como ver cómo las diferentes parcelas agrícolas reflejan el índice. Según nuestro caso de uso, algunas de las parcelas tenían valores altos de NDMI en los meses de verano después de varias semanas sin lluvia. La única fuente de agua de podría ser acuífero, descargas o fugas.

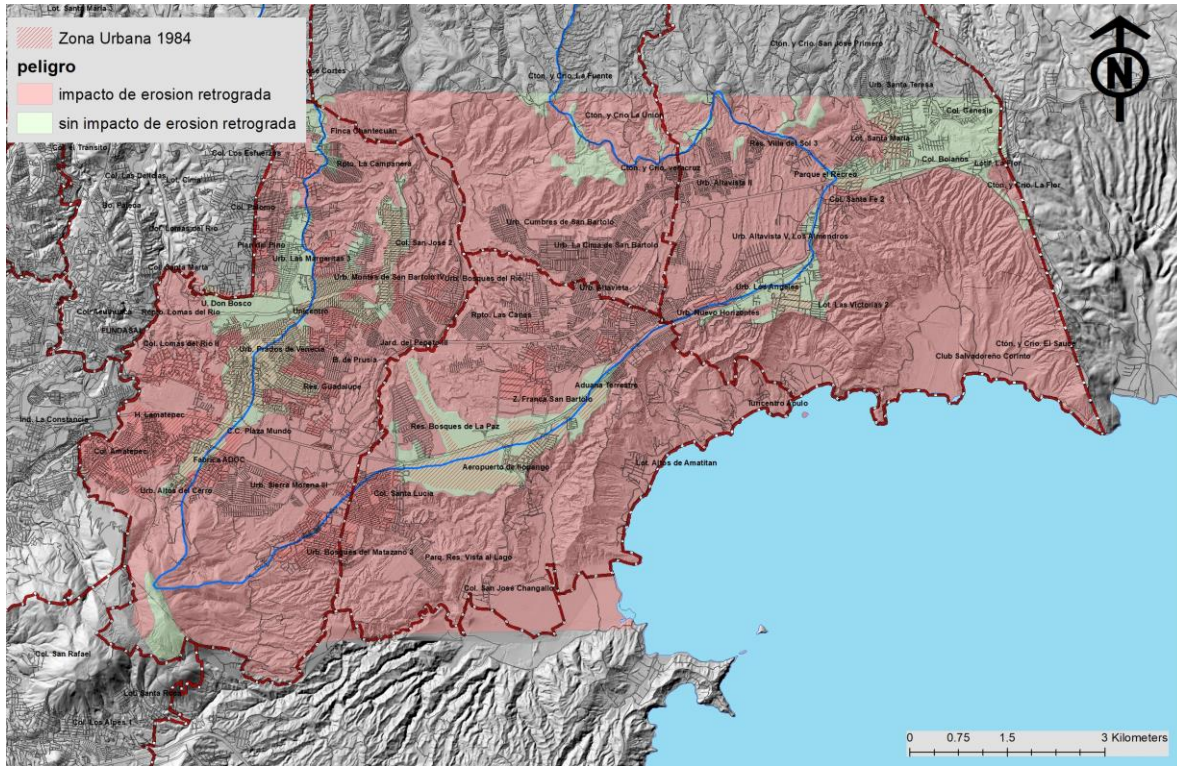


Ubicación aproximada de tuberías, sistemas de drenaje, obras de paso y descargas

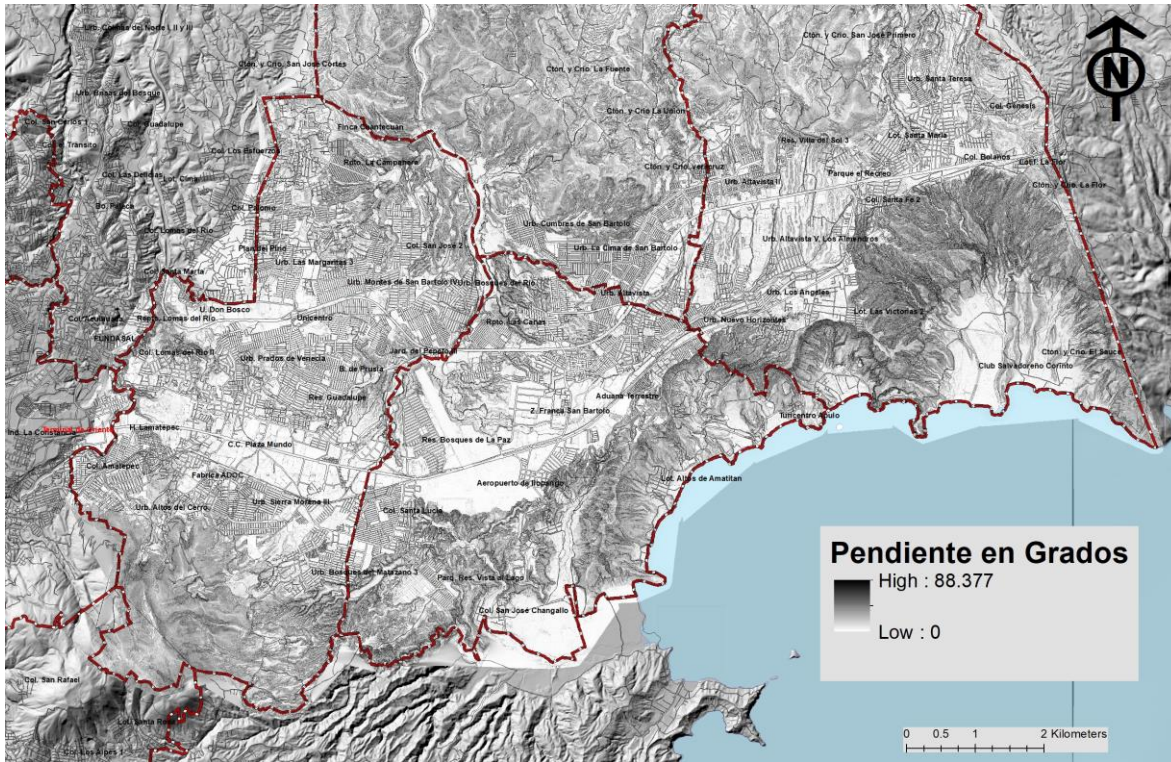
Se ubico información disponible de sistemas de tuberías de aguas lluvias, potables y negras, así como, descargas, sistemas de drenaje y obras de paso ya que son zonas donde se dan problemas de manera recurrente al fallar o donde se da erosión retrograda/subterránea. Estos puntos podrían ser más críticos si están en zona de relleno/corte en sectores de ladera erosión/Badlands.



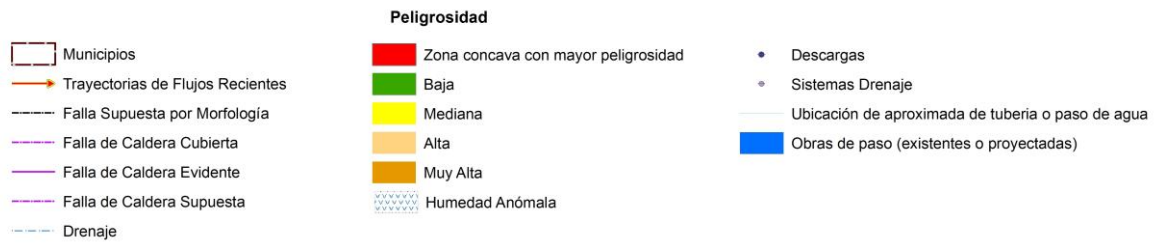
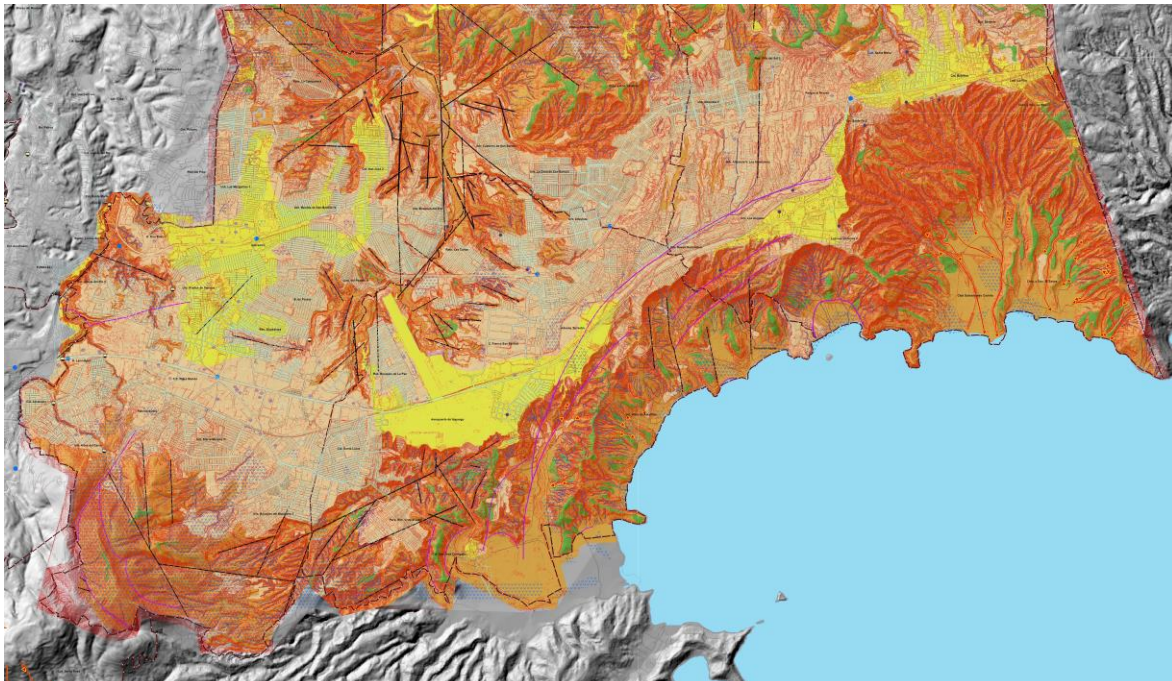
Tuberías, obras de paso, descargas y sistemas de drenaje



Mapa de impacto por erosión retrograda construido mediante fotografías antiguas de 1949 y 1984



Mapa de pendientes escala 1:10,000 construido mediante LIDAR



Mapa de peligrosidad por dinámica superficial escala 1:10,000 construido mediante LIDAR y Sentinel 2

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 subterránea. 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 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 Lucia 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).

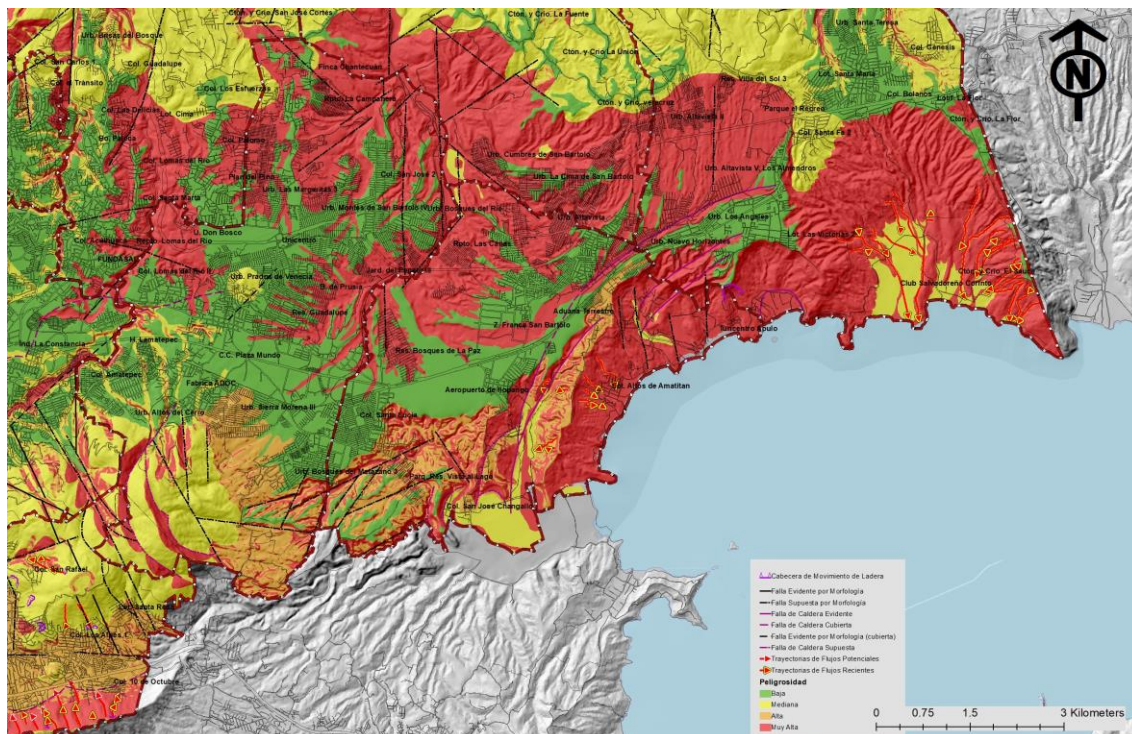
El relieve es un relieve muy joven con respecto a la edad geomorfológica y por eso los procesos endógenos como exógenos siempre funcionan y forman este relieve permanentemente. En su mayoría estos procesos se catalogan como peligrosos hasta catastróficos para las actividades humanas y por eso es importante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

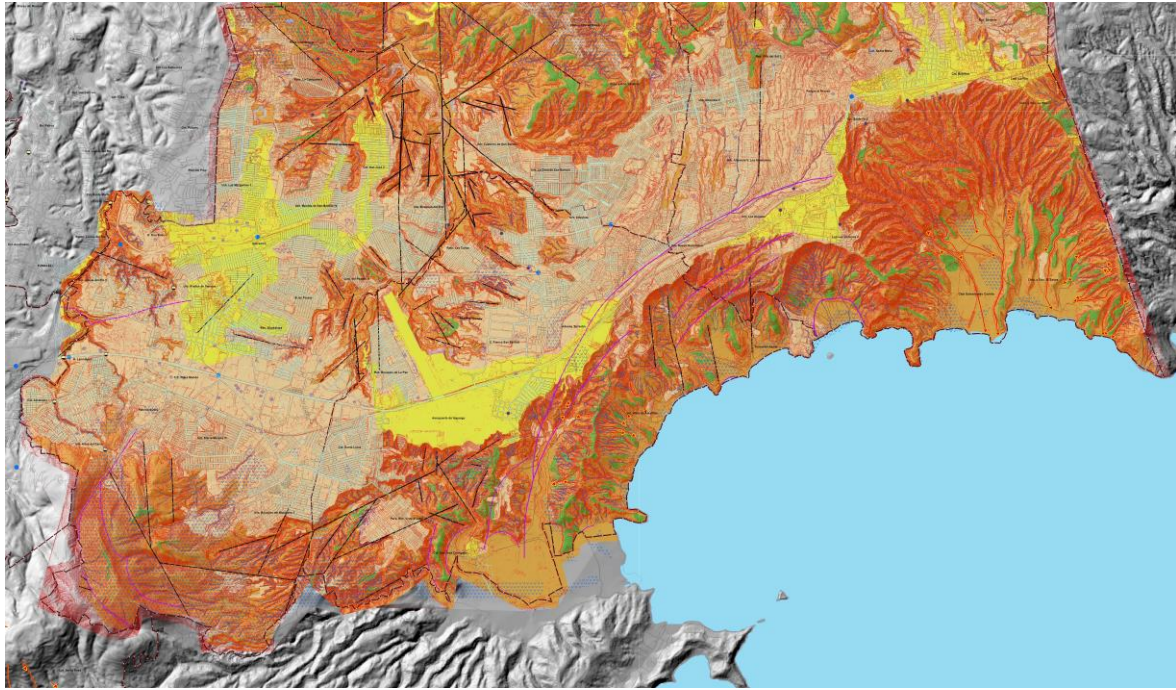
Este sector de las Cañas tiene espesores importantes de Tierra Blanca Joven (TBJ) la cual tiene problemas de colapso y denudación al saturarse, esto hace que casi toda zona se de

alta a muy alta problemática. Además, se urbanizo y relleno bastantes zonas donde hay peligrosidad de fugas o roturas de tuberías, o que agua retome cauce de valles enterrados. La sismicidad es un aspecto que puede acelerar problemática. La inclusión de humedad y de laderas con pendiente cóncava ayuda a identificar zonas que se le tiene que prestar más atención y seguimiento de su evolución para disminuir problemática de sector. El uso de geomorfología de ríos ayudara a conocer que se puede esperar del perfil de equilibrio y sus cambios que afectan todos los drenajes del sector.

Se ha incluido en mapa información de urbanización antigua y como fueron invadidas las zonas, además de ubicación de tuberías, obras de paso, descargas y sistemas de drenaje que podrían ser zonas a tomar en cuenta para monitoreo.

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. Sin embargo, mapa hecho con topografía antigua muestra zona que fueron urbanizadas y se tiene que valorar esto de manera que no sea engañosa





Comparación de mapa de peligrosidad por dinámica superficial de escala metropolitana y escala 1:10,000