



Mapa de Ingeniería Geológica a 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

Jav Valenta
José Alexander Chavez H.



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





Índice

Introducción	3
Antecedentes	6
Metodología	11
Descripción de mapa y sus unidades	18
Conclusiones y Recomendaciones	37
Referencias	43

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 ingeniería geológica dando complementando otra zona dentro del AMSS, siendo zonas críticas el sector cercano a caldera de Ilopango, cuenca 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. 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

La Ingeniería Geológica puede apoyar en la planificación por medio de mapas e identificación de áreas de amenaza natural, pero también puede ayudar solucionando problemas e investigación en sitio, obtener datos para diseño y aprovechamiento de los materiales para la construcción los materiales.

El mapa de ingeniería geológica es un producto que se elabora en base al mapeo de campo, donde se evalúan durante la campaña de campo parámetros como la estructura geológica, la hidrogeología, zonas de depósito de quebradas, los parámetros geotécnicos de las rocas (estimados), los riesgos erosionales, la pendiente y la morfología del terreno.

Hay que evaluar también amenazas como el volcanismo y la sismicidad si se tiene información.

Pero como primer paso es recopilar toda la información existente de la zona de estudio (mapas de pendiente, topográfico, denudación, geológico, geomorfológico y sus derivados, recarga acuífera, pozos existentes y manantiales, imágenes satelitales, entre otros.

Detalle del mapa depende de:

- Materiales de archivo recopilados
- Recorrido detallado de mapeo
- Calidad del mapa topográfico
- Cantidad de puntos de mapeo
- Número de afloramientos (naturales o artificiales)
- Perforaciones, pozos de prueba
- Educación y experiencia de geólogo o ingeniero geólogo.
- Habilidad para extrapolar e interpolar

Un principio fundamental es representar información en el mapa en el punto exacto.

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 la ingeniería geológica. Enfocándose en la aplicación de investigación usando mapeo de 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 (Fig. 1). 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).

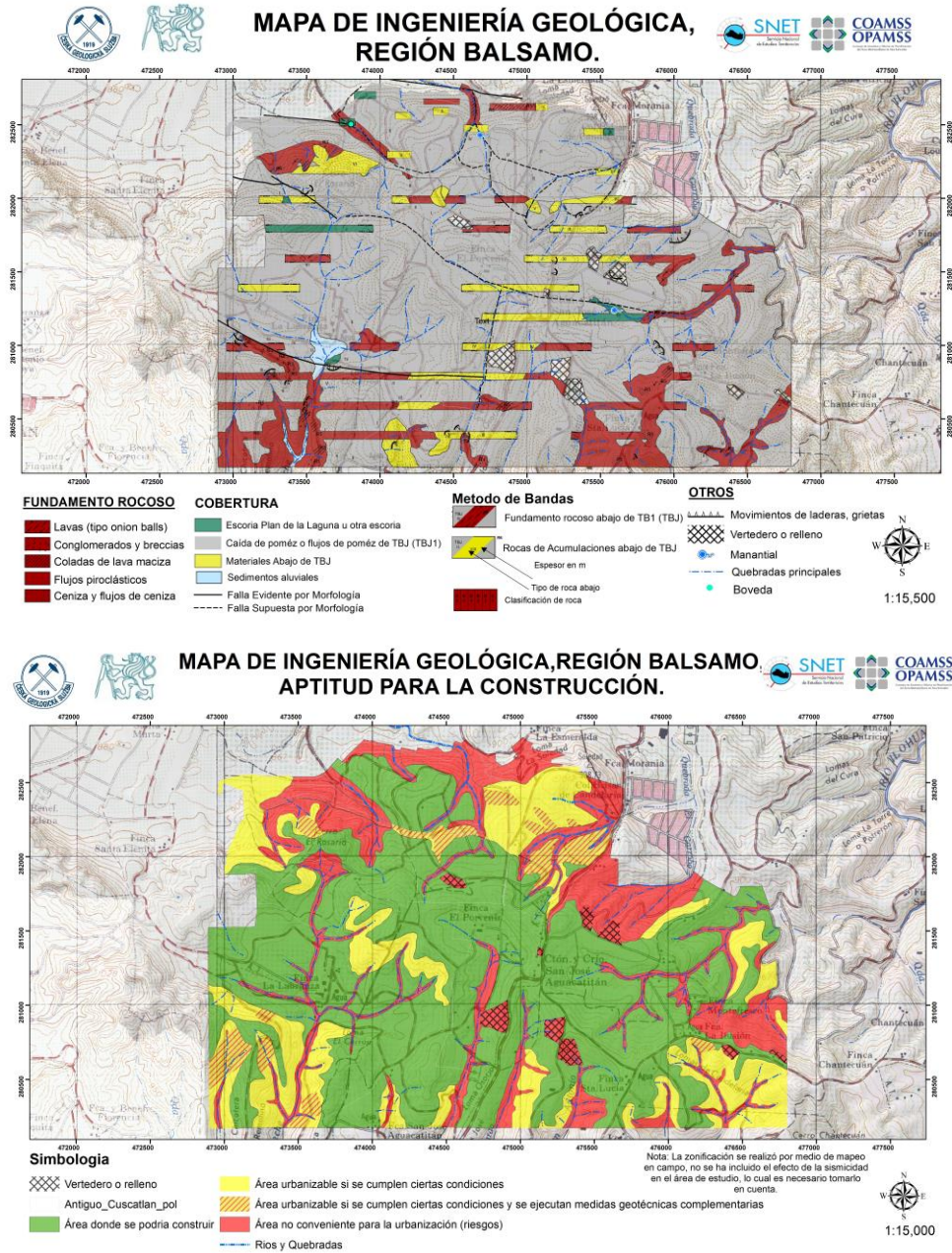


Fig. 1 Mapa de Ingeniería Geológica de sector Bálsamo (2008 y 2015)

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.

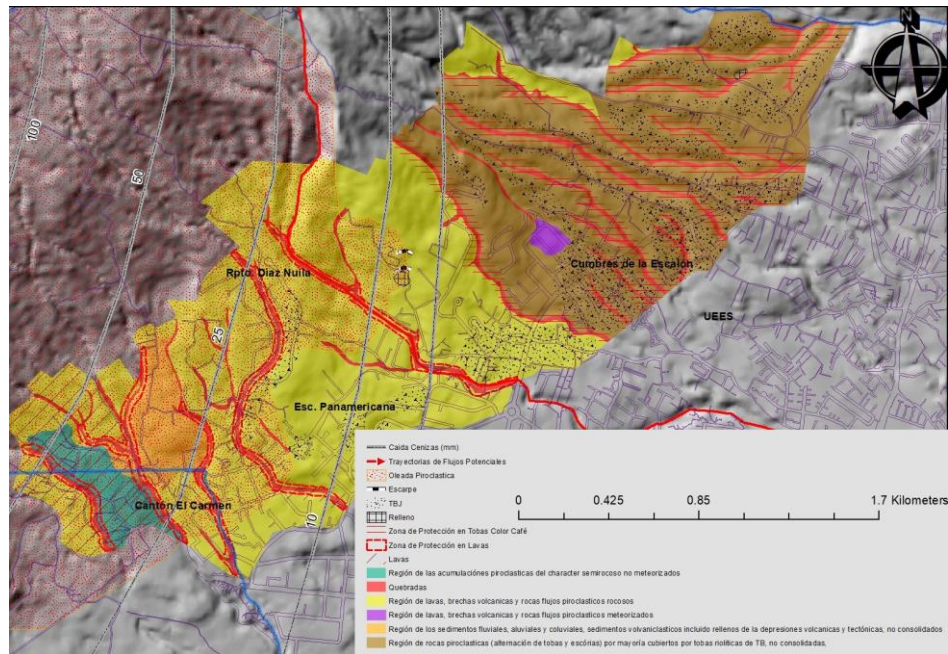
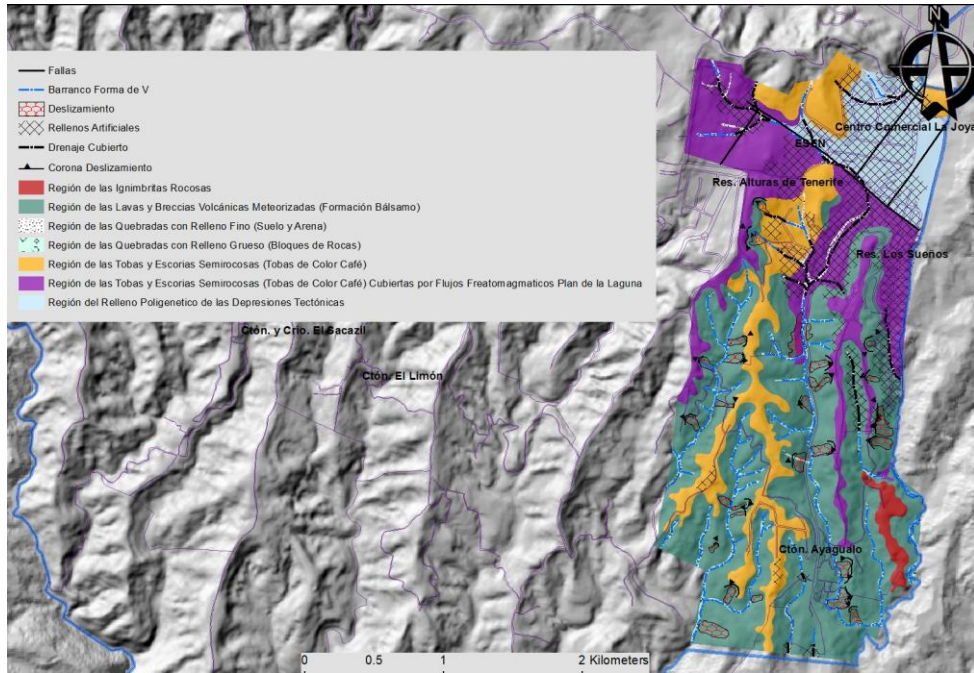


Fig. 3 Mapa de Ingeniería Geológica de sector Santa Tecla y el Carmen (OPAMSS, 2020)

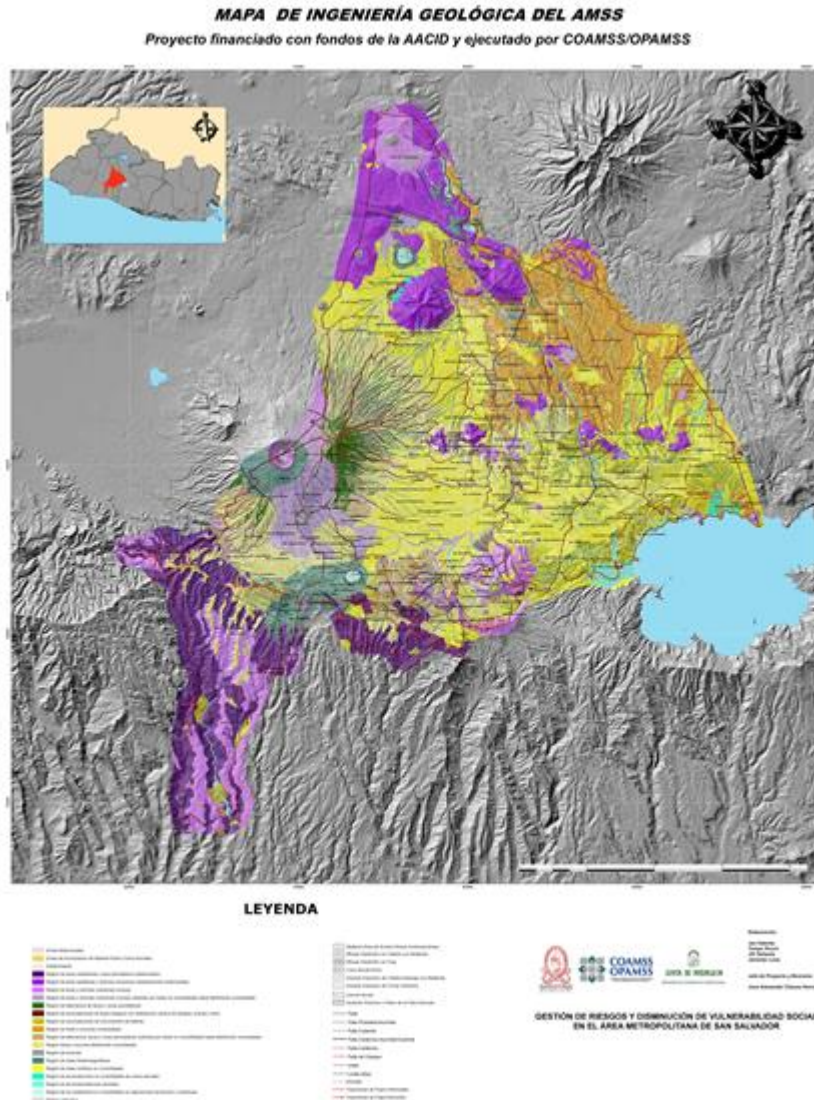


Fig. 4 Mapa de Ingeniería Geológica AMSS (OPAMSS, 2020)

Metodología

Se visitaron sectores de río Sumpa, Chagüite, Arenal Seco y las Cañas, observándose problemas de erosión retrograda, lateral y vertical, lo cual se ha ido incrementando en el tiempo (Fig. 5).

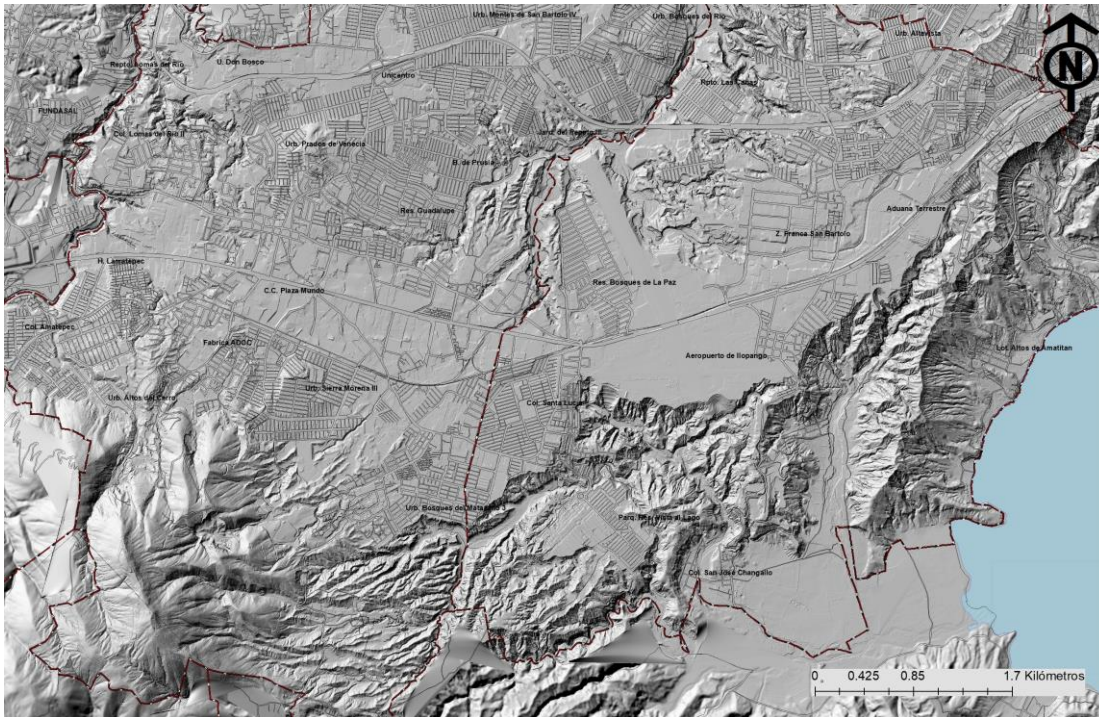


Fig. 5 Zona de estudio de las Cañas, arenal Seco, Sumpa y Chagüite

Los puntos visitados sufren problemas graves por ejemplo las Pilitas, Colonia Guadalupe cuya bóveda ha sufrido falla otra vez, por cambio de nivel en el lecho del río, zona franca de San Bartolo y Santa Lucía. En estos sectores se pudo observar que río está acomodando su pendiente mediante la excavación y formación de meandros que ha ensanchado el cauce, afectando colonias antiguas.

Recientemente en el Sumpa el problema comenzó con Jardines del Pepeto y la erosión ha ido retrocediendo a Bosques de Prusia, para posteriormente afectar bóveda de las Pilitas donde se había realizado obra de mitigación (ya por segunda vez). Esto se ha ido repitiendo en el tiempo y al parecer seguirá afectando el sector (Fig. 6-8).



Fig. 6 Zona de Santa Lucia, Chagüite



Fig. 7 Zona de arenal Seco



Fig. 8 Vista aguas arriba y debajo de sector de bóveda en las Pilitas, Sumpa

En parte baja (aguas abajo) también se han dado muchos cambios (pareciera que acá se está acumulando sedimentos), aparte de erosión lateral que provocó que casas colapsaran al río. En este sector de río se observa bastante extracción de arena.

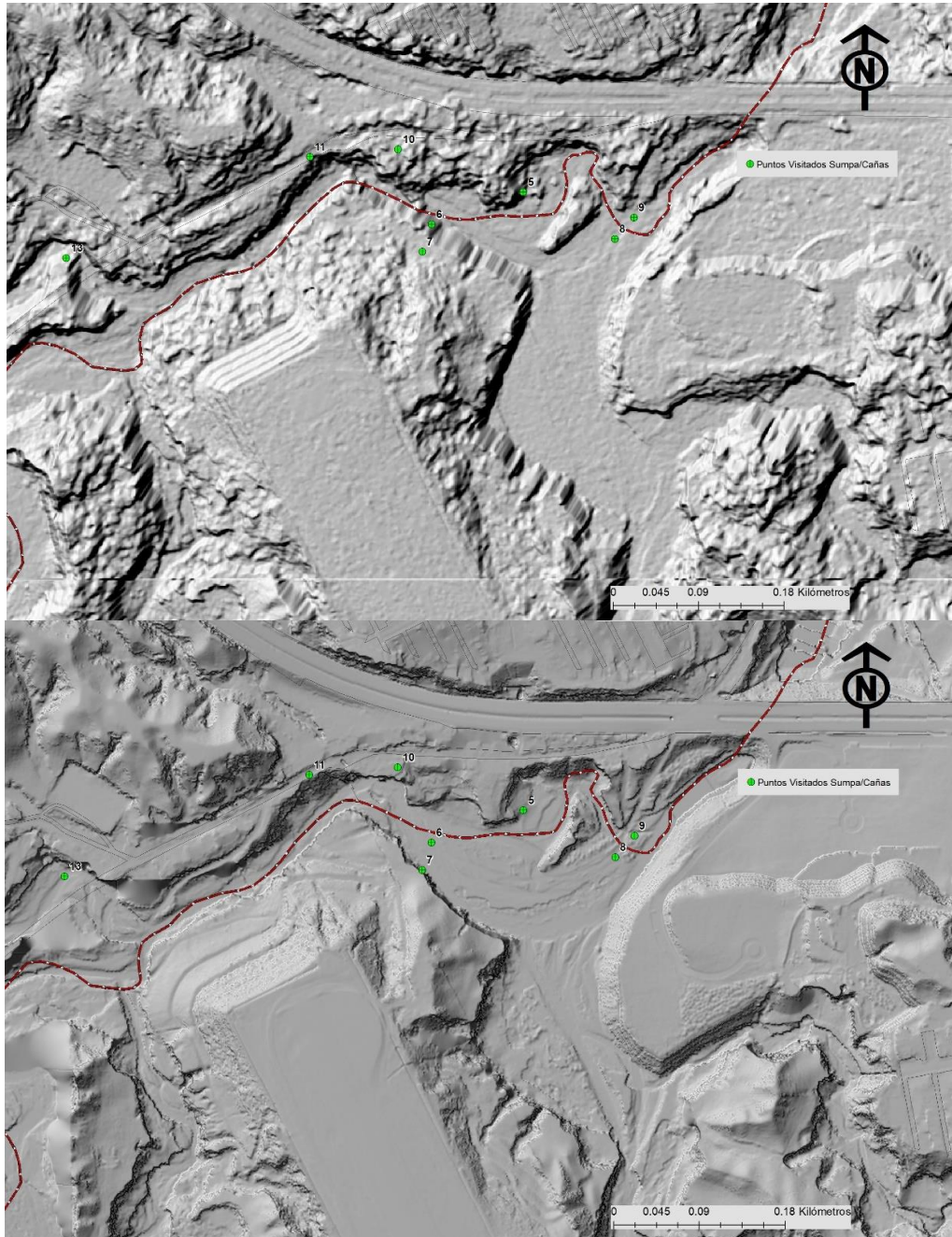


Fig. 9 Cambios en sector de unión entre Sumpa y las Cañas (años 2000, MOP y 2020, OPAMSS)

Descripción de mapa y sus unidades

El sector se encuentra ubicado en sector con cobertura de Tierra Blanca Joven (TBJ) con espesores importantes (Fig. 11). Existiendo evidencia de terrazas que demuestran dinámica erosiva del sector. Abajo de TBJ debido a fallamiento quedan expuestas tobas mas consolidadas y que no se ven afectadas tan fuertemente ante la erosión.

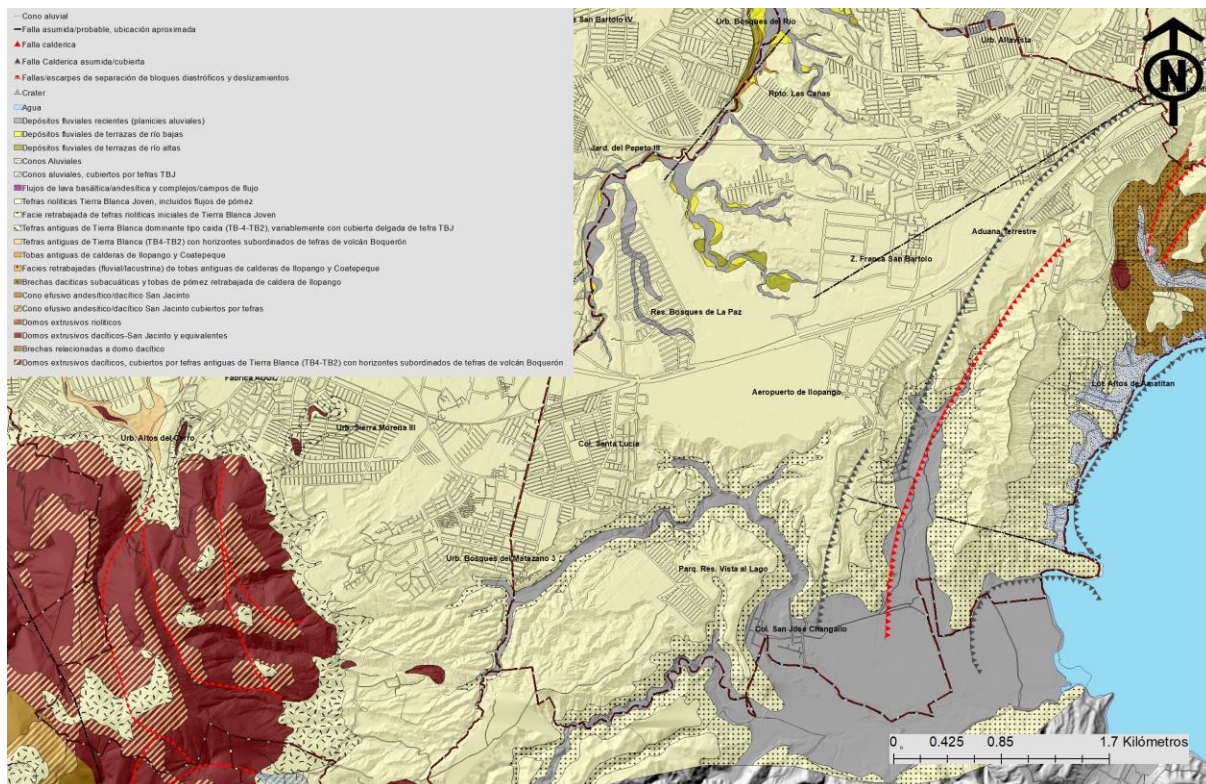


Fig. 11 Mapa Geológico 1: 50,000 del AMSS (OPAMSS, 2020)

La consistencia de las tefras es suficiente para formar taludes verticales en los cañones, asociado a una cohesión aparente (suelos parcialmente saturados). Las tefras riolíticas TBJ (Fig. 12) son mayormente permeables e inestables. La región, sin las debidas consideraciones, presenta condiciones que pueden ser inadecuadas para las construcciones. El material es fácilmente erosionable. En los sectores donde hay mayor espesor se puede formar erosión retrógrada, profundos cañones y la superficie se transforma al relieve tipo badland. Debido al impacto de la erosión, los sistemas de drenaje actuales pueden extenderse lateralmente y profundizarse, se pueden formar nuevos barrancos y debido a la erosión lateral pueden ocurrir derrumbes en la orilla. En casos extremos puede transformarse todo el relieve. La erosión vertical de drenaje vertical es acompañada con erosión lateral y deslizamientos, que se forman en casos donde las tefras yacen en lateritas

(arcillas) o en tobas meteorizadas más antiguas. Otro proceso muy peligroso es la erosión subterránea (piping) con hundimiento y colapsos gravitacionales de la superficie. Debido a los procesos erosionales, pueden ocurrir numerosos daños sobre todo en la infraestructura.

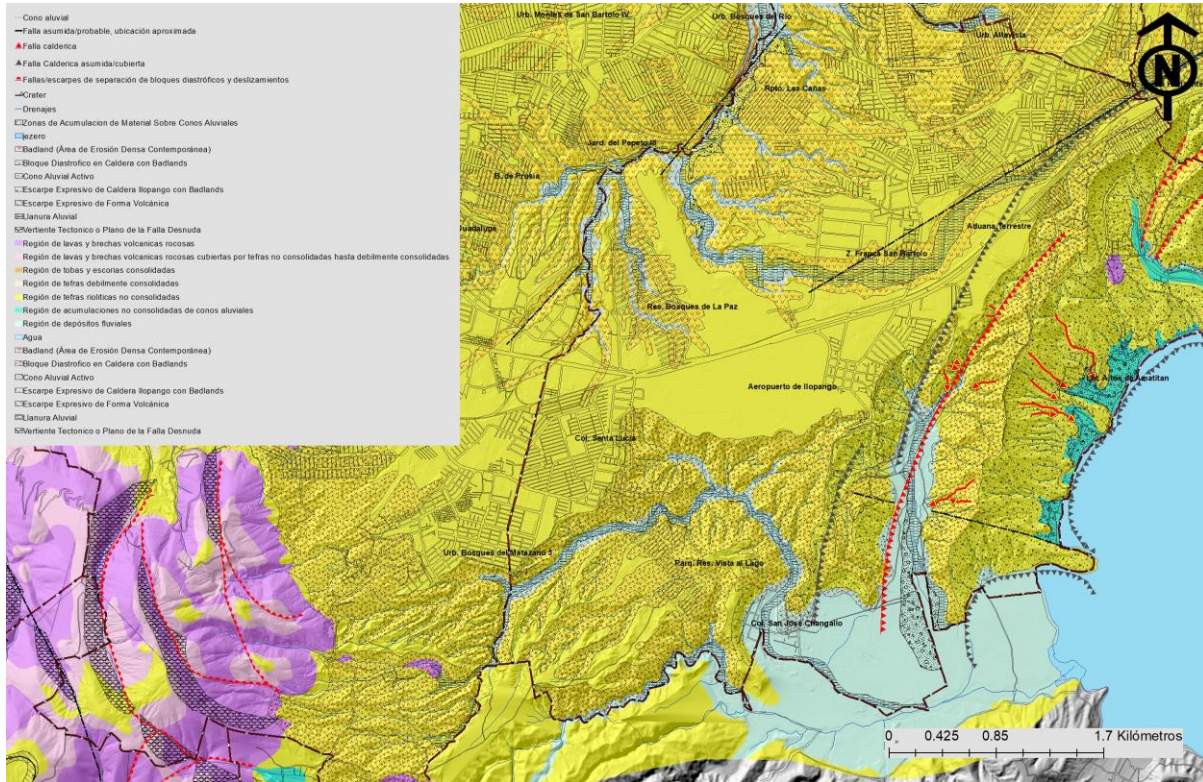


Fig. 12 Mapa de Ingeniería Geológica 1: 50,000 del AMSS (OPAMSS, 2020)

Según el mapa geomorfológico y de peligrosidad (1:10, 000) a detalle y hecho con topografía reciente (Fig. 13) muestra y corroboran que zona es de muy alta problemática observándose fallamiento en sector (es de estudiar posible relación de tectónica con dinámica del río), además de la presencia de humedad anómala en y su relación con comportamiento suelo, así como actividades antrópicas.

La erosión vertical y horizontal se ve a lo largo de toda la zona (Fig. 14) y produce más sedimentos que al mismo tiempo incrementan la erosión en el sector.

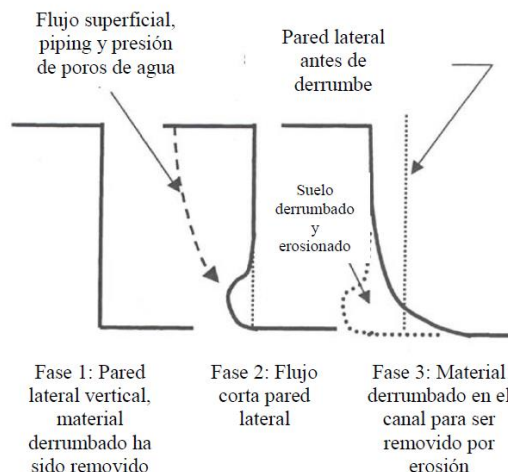


Fig. 14 Fases de erosión en un lateral de un barranco (gully) (Toy et al., 2002)

Los 4 factores principales que determinan la erosión fluvial son: **el clima, la geología, la topografía y el uso del suelo.**

El clima influye directamente e indirectamente siendo la precipitación la variable que afecta más a la erosión fluvial. Las dos variables más importantes de la lluvia y que determinan la erosividad es la cantidad de lluvia y la intensidad; ya que toman en cuenta tanto el impacto de las gotas de lluvia como la escorrentía superficial. (Toy et al., 2002)

La geología de un sector es importante ya que materiales con problemas de erosión pueden ser 10 veces más susceptibles a la erosión que los resistentes a la erosión (Como Tierra Blanca Joven en este sector).

En cuanto a la topografía entre las variables importantes se puede mencionar la longitud de la pendiente y la inclinación, forma del perfil, y planta. La erosión aumenta a lo largo de pendientes uniformes debido a la acumulación de escorrentía a lo largo de la pendiente. (Toy et al., 2002). Este aspecto se ha introducido en mapa de peligrosidad (Fig. 13) con laderas con inclinación/curvatura cóncava que aceleran corriente de agua. También la topografía tiene un efecto indirecto en la erosión, ya que hay más humedad en las partes bajas. (Toy et al., 2002)

El uso del suelo afecta tanto a las fuerzas aplicadas al suelo y la resistencia del suelo a esas fuerzas. La vegetación intercepta las gotas de lluvia. Algunas gotas son evaporadas, de ser grande la cobertura de vegetación entonces la escorrentía superficial se disminuye. (Toy et al., 2002). Las raíces son importantes ya que ayudan a proteger de la escorrentía, además de que la biomasa de las raíces al descomponerse reduce la escorrentía y ayuda en la infiltración. Aunque en el caso del AMSS se ha visto que las raíces son las zonas donde se mueve de manera preferencial el agua y son las zonas de falla por flujos deslizantes y derrumbes.

La cubierta de superficie es el material en directo contacto con el suelo que protege de impacto de gotas de lluvia y frena la escorrentía superficial. Pueden ser desperdicios vegetales tales como hojas caídas, residuos de siembras o materiales manufacturados etc. (Toy et al., 2002). La perturbación mecánica de suelos crea aspereza que retrasa escorrentía y reduce la erosividad. Crea depresiones donde el agua se empoza, reduce la erosividad de las gotas de lluvia y deja que se guarde de manera local los sedimentos depositados. La perturbación mecánica de suelos también puede incrementar la erosibilidad. (Toy et al., 2002)

Además es importante entender, que en los procesos fluviales hay controles externos (Fig.15) que controlan el comportamiento o posible respuesta que estos sistemas pueden presentar en un determinado periodo, los cuales son: **el clima, la tectónica, el nivel base y la actividad humana**. Cualquier cambio de una de estas variables produce una secuencia de reacciones y efectos que son complejos produciéndose ajustes dentro del sistema fluvial. Algunas variables internas tienen mayor grado de independencia porque son afectadas de forma limitada por los sistemas fluviales. Estas variables son la geología, suelos, vegetación y topografía. Todas son variables internas porque son controladas hasta alguna extensión por los controles externos de la cuenca, sin embargo su influencia principal en la operación de los sistemas fluviales es de control. (Charlton, 2007)

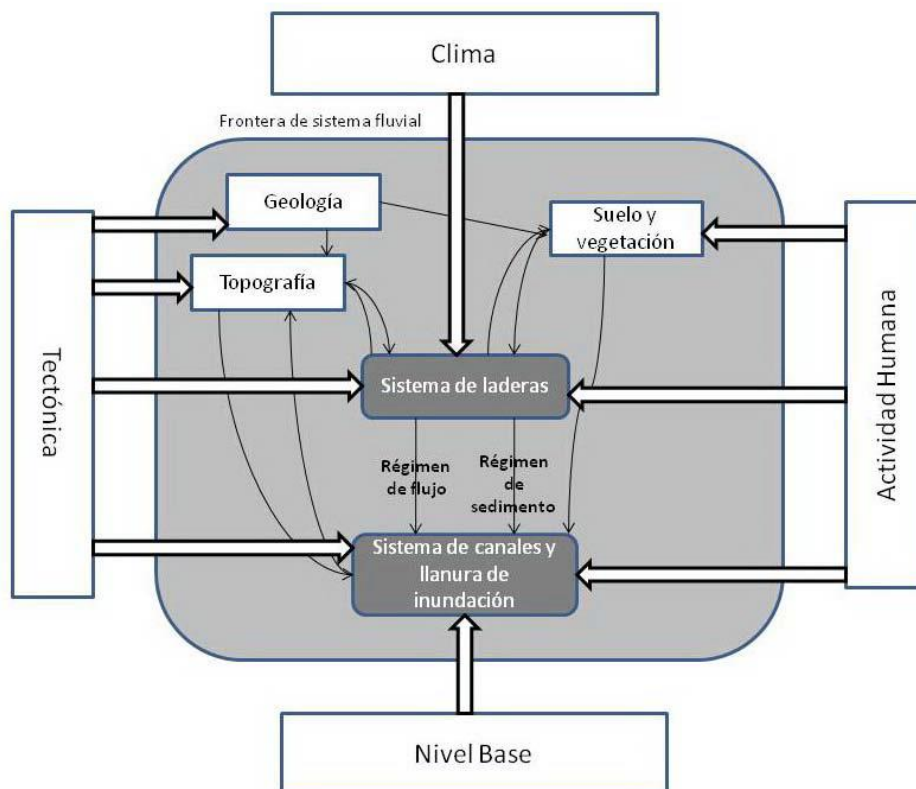


Figura 15 Representación simplificada del sistema fluvial (Charlton, 2007)

Charlton (2007) describe estos controles externos del sistema fluvial:

- **Clima**

Describe la fluctuación en forma de clima promedio. A pesar que el clima siempre está cambiando, algunas características a largo plazo como variaciones inter-anales y de estaciones se pueden definir. Otras características incluyen la frecuencia de las tormentas de determinado tamaño, así como, duración de sequías. Cuando no hay cambios a largo plazo entonces se puede decir que hay una evolución normal. El cambio del clima ocurre cuando esta evolución cambia y una nueva etapa de condiciones climáticas inicia.

- **Tectónica**

Se refiere a las fuerzas internas que deforman la corteza terrestre. Estas fuerzas pueden llevar a elevamientos a gran escala, subsidencia localizada, giros, fracturamiento y fallamiento. Donde hay elevación se incrementa la energía de la velocidad del agua que baja por un drenaje. Una de las tasas más altas de producción de sedimentos se da en las zonas de elevación tectónica. Las pendientes de los valles es afectada por el fallamiento y elevación localizada, lo que podría afectar el patrón lateral del canal; el giro puede causar la migración de canales y afectar los patrones de sedimentación en los ríos.

- **Nivel Base**

Es el nivel bajo el cual en canal no puede erosionar (en la mayoría de casos es el nivel del mar, pero pueden ser lagos, represas/bóvedas o el nivel de un río principal donde descargan ríos tributarios). Si baja el nivel del agua en relación a la superficie terrestre, habrá más energía disponible para mover flujo y sedimento. De igual manera una subida en el nivel de agua base significa que hay menos energía disponible, resultando en la deposición neta en la parte baja del canal. Con el tiempo estos efectos se podrían propagar aguas arriba a través de una secuencia de ajustes internos complejos y retroalimentaciones.

Las actividades en el sistema fluvial tales como la deforestación, urbanización, agricultura y operaciones de minería/extracción de arena afectan el flujo de agua y producción de sedimentos, también hay afección cuando se hacen obras de ingeniería de canales (presas, agrandamiento de canales para navegación, control de inundaciones, alinear por medio de canales, etc.).

Los drenajes pueden alcanzar un equilibrio dependiendo de aspectos como el **clima, vegetación, litología y suelos**, al romperse el equilibrio por factores externos como la **tectónica, cambios climáticos, actividades humanas o cambios en el nivel base**, entonces poco a poco tratara de recuperar su equilibrio ya sea profundizando su cauce, por medio de erosión retrograda o con cambios en la geometría de su canal (paredes laterales, meandros, agradación o degradación)

La respuesta del sistema fluvial al cambio generalmente es compleja por las muchas interrelaciones que existen entre los diferentes componentes del sistema. Un ejemplo de esta respuesta compleja de un tributario, debido a que descendió el nivel base de elevación en su salida (Schumm, 1977) se presenta en la figura 16; donde se muestra el caso en que el río principal ha bajado la elevación por erosión; esto lleva a una secuencia compleja de erosión episódica y deposición en el tributario a medida el sistema busca un nuevo

equilibrio. Una secuencia similar de eventos puede ser observados en experimentos de simulaciones en redes de drenaje de laboratorio (Charlton 2007).

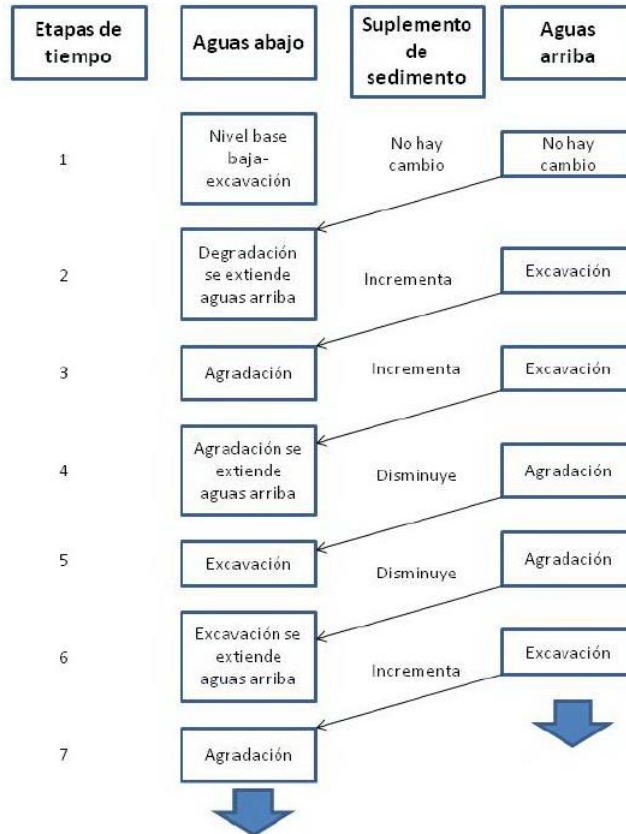


Fig. 16 Representación esquemática de una respuesta compleja de un sistema de drenaje como resultado de una caída en el nivel base, el proceso sigue hasta que alcanza un equilibrio (Charlton 2007)

El ejemplo expuesto anteriormente sirve para representar la complejidad de cambios que suceden, es de tomar en cuenta que dichos cambios pueden suceder también, aparte de los cambios en el nivel base, a las actividades humanas; a los procesos tectónicos y a los cambios climáticos o por una combinación de ellos.

Los ríos ajustan sus secciones transversales en respuesta no solo a eventos aislados sino también a cambios más sostenidos ya sean de origen natural o antropogénicos. El ancho y profundidad de un drenaje pueden ajustarse rápidamente a las condiciones cambiantes aunque la escala y el rango de ajuste es probable que varíe considerablemente (Knighton, 1998).

Si los cambios solo son temporales entonces el drenaje tendera a volver a su estado anterior, pero si los cambios son muy fuertes o se mantienen de manera constante el drenaje

ya no volverá a su estado natural y buscará un nuevo equilibrio. Parte del ajuste que puede darse en un drenaje se puede dar por cambios en la sinuosidad del canal.

Modificaciones artificiales al sistema fluvial pueden tener impactos inmediatos en la continuidad del transporte de sedimentos, siendo el más reportado los asociados con la construcción de presas o en el caso del AMSS bóvedas u obras de paso (Fig. 17). La descarga de agua sin sedimento después de la presa comúnmente resulta en una degradación o excavación que va progresando aguas abajo y una pendiente más plana. A pesar que inicialmente se localiza cerca de la presa/bóveda u obra de paso, el efecto puede ser transmitido rápidamente a lo largo de grandes distancias.

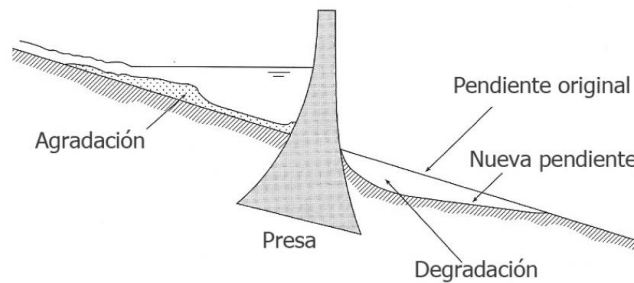


Fig. 17 Agradación y degradación en una presa/bóveda u obra de paso (Charlton 2007)

El impacto es mayor cuando el nivel base baja y lo hace de manera significativa, donde los resultados de excavación son particularmente rápidos y donde el río es confinado. El confinamiento del canal por la resistencia de materiales geológicos, forma de morfología valle o un aluvión cohesivo puede impedir un ajuste de pendiente a través de un cambio en la sinuosidad; de manera que el ajuste vertical se vuelve la única opción (Knighton, 1998).

En el largo plazo los grandes cambios son debido a efectos climáticos, tectónicos y efectos de nivel base, mientras que en el mediano plazo las actividades humanas se vuelven importantes en conjunción con los cambios climáticos y la elevación de nivel del océano. En el corto plazo los cambios antropogénicos en el medio fluvial se vuelve la forma dominante de cambio con eventos extraordinarios extremos como causa secundaria de cambio (Knighton, 1998).

En el caso del sector del Sumpa al comparar los cambios de nivel de lecho de río con ayuda de modelos de terreno de topografía de los años 80, 204 y 2020 (Fig. 18) se vislumbran cambios observados en campo (línea de cauce drenaje corresponde a la de 2020, por eso es que aparecen bastantes picos que indican sectores que desaparecieron por erosión y cambio dirección cauce). Se denota inicialmente que cambio en el perfil de río pudo haberse iniciado con la urbanización del sector (Fig. 19) y luego al construir obra de paso de carretera de Oro. Siendo obvio la cantidad de depósitos que han sido erosionados, actualmente pareciera que se depositan sedimentos antes de caja quintuple de Carretera de

Oro y la erosión retrocede hacia aguas arriba, lo cual coincide con lo visto en campo en visita de campo.

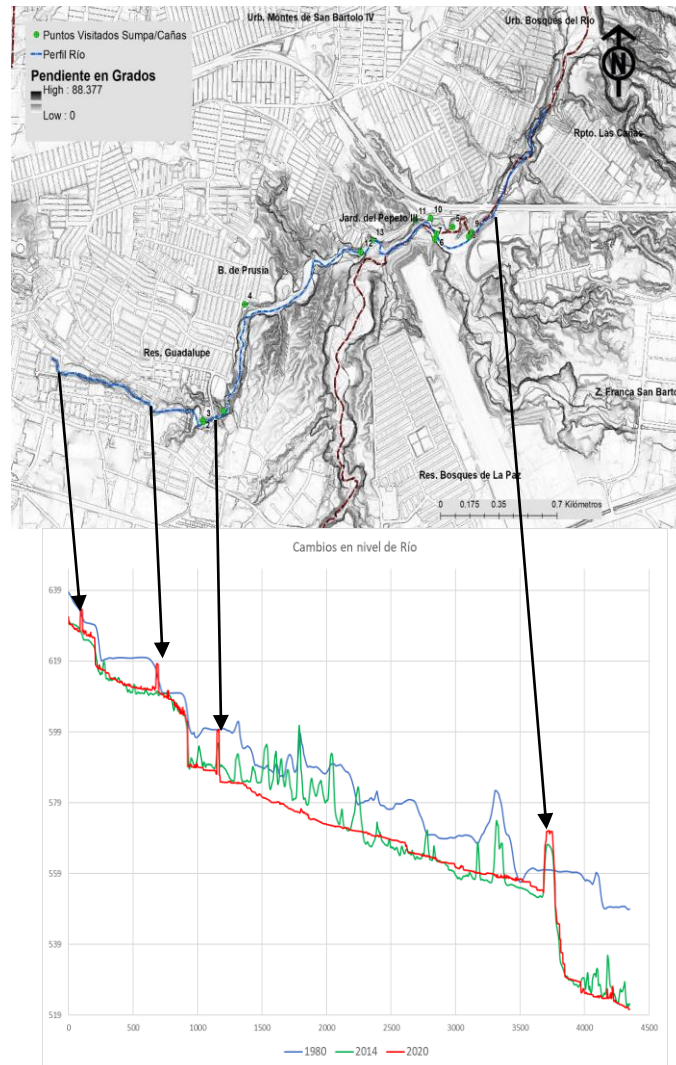


Fig. 18 Cambios en el nivel de cauce (OPAMSS, 2021)



Fig. 44 El río Las Cañas en el cual se han conservado restos de niveles del río o terrazas. A un lado de la fotografía, la fecha de formación de la terraza.

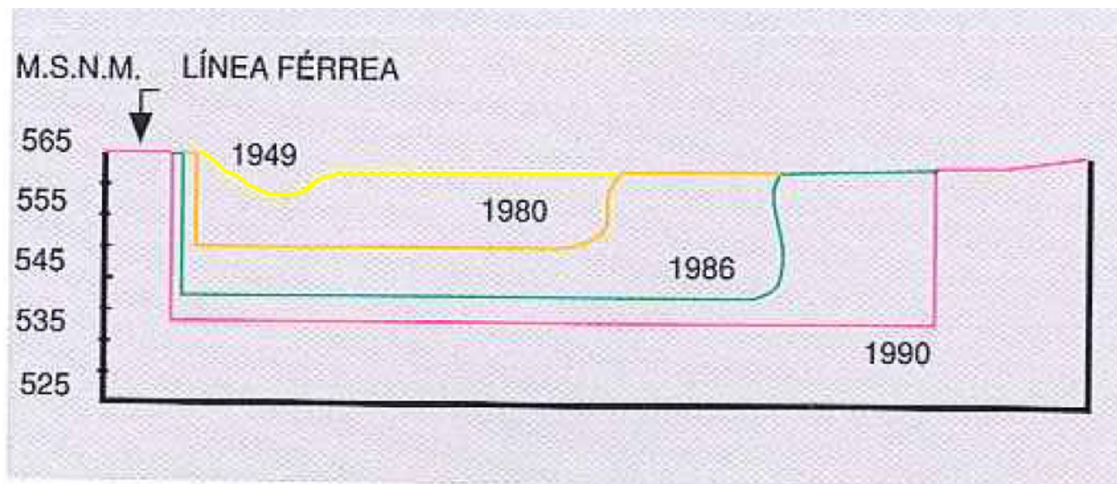


Fig. 45 **Sección del río Las Cañas**, frente a la urbanización Las Cañas. Observe como el río ha erosionado lateralmente y en profundidad. La escala vertical y horizontal son similares, 1:1.000.

Fig. 19 Cambios en el sector de Río las Cañas (Baxter, 1995)

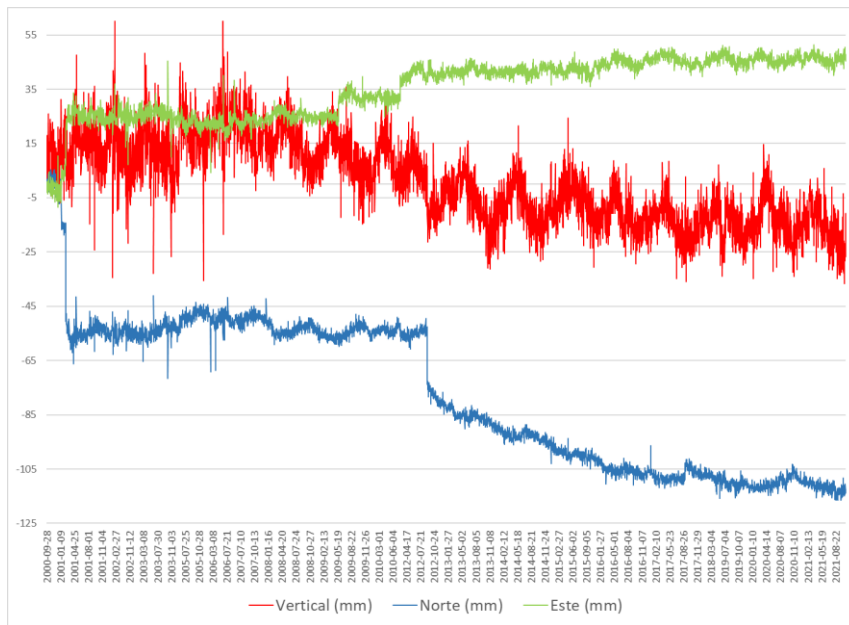
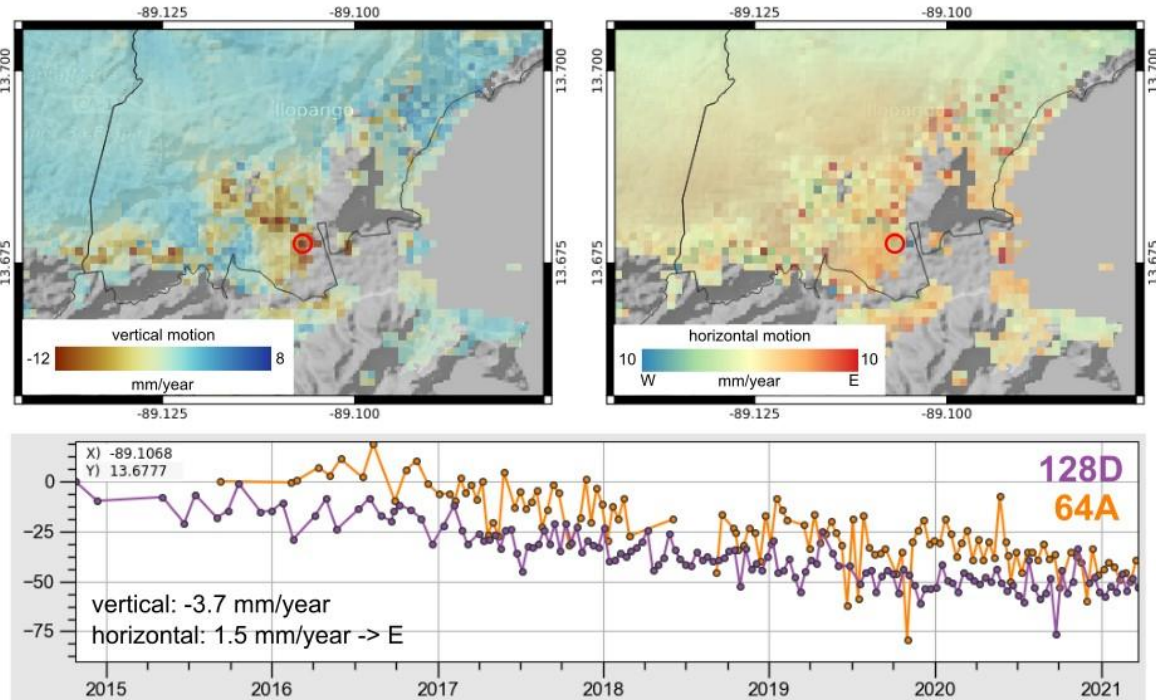


Fig. 20 Subsistencia en sector de cuenca baja Chagüite en Guluchapa

Mapa de dinámica superficial obtenido mediante InSAR muestra que sector de cuenca baja de Chagüite en Guluchapa sigue proceso de subsistencia, todavía es de comprender incidencia en comportamiento de erosión retrograda en río y afluentes.

A continuación se muestran cambios en el perfil de los valles desde los años 80, 2013 y 2020, al analizar los cambios se ven que son bastante pronunciados.

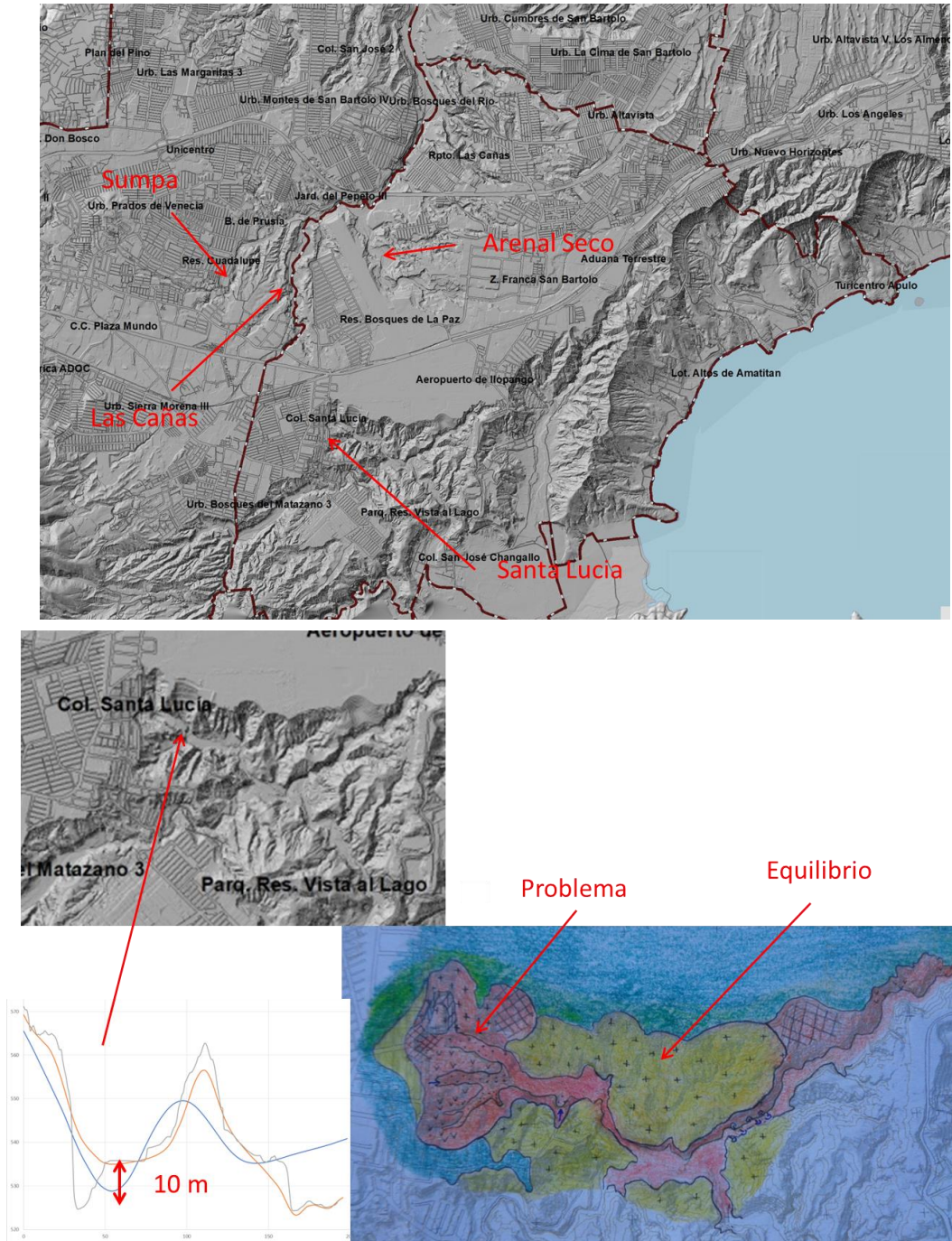


Fig. 21 Cambios en sector de Santa Lucia y zonificación propuesta

En Santa Lucía en 2005 se dieron problemas posiblemente asociados a falla de tubería, pero falla de 2019 pareciera que está asociada a erosión retrograda debido a que muro que sostenía nivel de quebrada cedió y rápidamente retrocedió. Además a la par se ha formado otra cárcava de retroceso asociada a descarga de aguas por desvío y a que se ocupe material de pie de esta para relleno de obra.

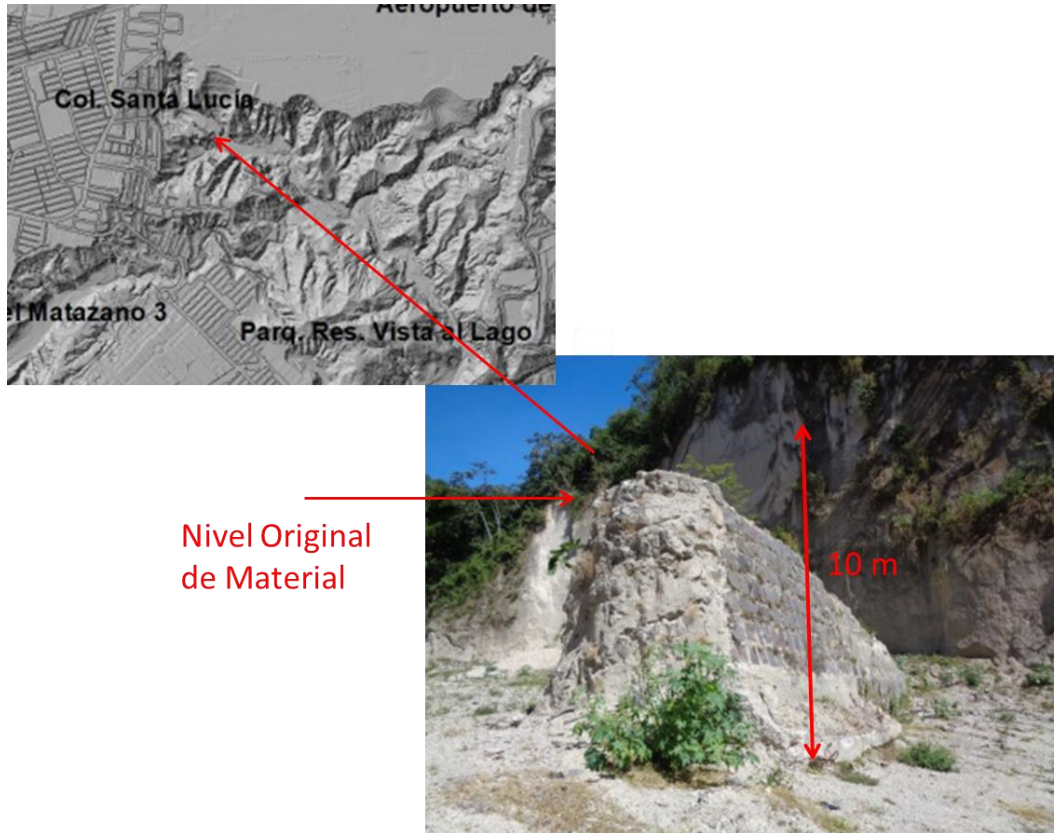


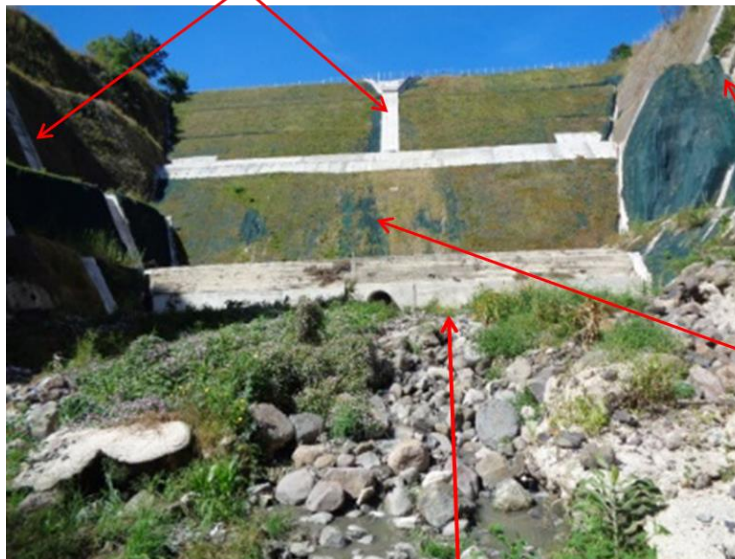
Fig. 22 Sector de muro que retenía nivel de quebrada hasta Santa Lucía

Al hacer visitas de campo se observó que pareciera que hay agua subterránea que aflora en las laderas de Tierra Blanca Joven y eso tendría que investigarse con más cuidado para poder conocer incidencia que tenga en inestabilidad del sector.

Al ver la obra de mitigación en sector de Santa Lucía se observa que obra se dejó con mucha inclinación, las canaletas llegan a descargar a TBJ y ya se ven problemas de daños, y humedad en parte baja (se ven reparaciones), además de erosión retrograda. Hay que dar seguimiento a esto para ir reparando con tiempo y evitar que problemas crezcan.



Demasiado inclinada para la energía del agua



Canaletas para agua terminan en TBJ

Humedad, vegetación inestable

Erosión retrograda

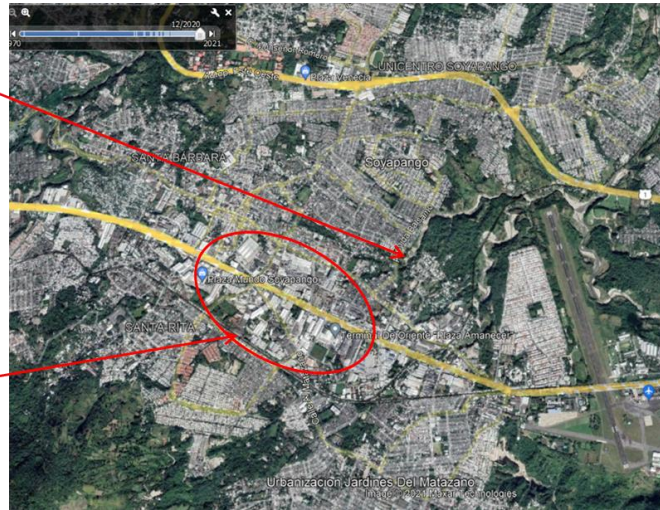
Fig. 23 Cárcava a la par de obra de mitigación y detalles que hay que tomar en cuenta para monitoreo de obra

Esta zona se mapea con mayor afectación debido a los procesos erosivos intensos y desequilibrio.



Fig. 24 Problemática y zonificación propuesta para sector de Arenal Seco

Sumpa



Zona
Industrial

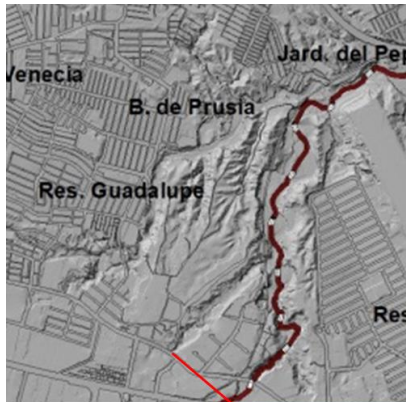


Fig. 26 Problemática y zonificación propuesta para sector de Arenal Seco

A continuación se muestra mapa de ingeniería geológica del sector de estudio. Hay sectores en equilibrio donde se podría urbanizar pero con baja intensidad y manejando de manera adecuada el agua, (reúso y evitar descargas concentradas, respetando vegetación nativa).

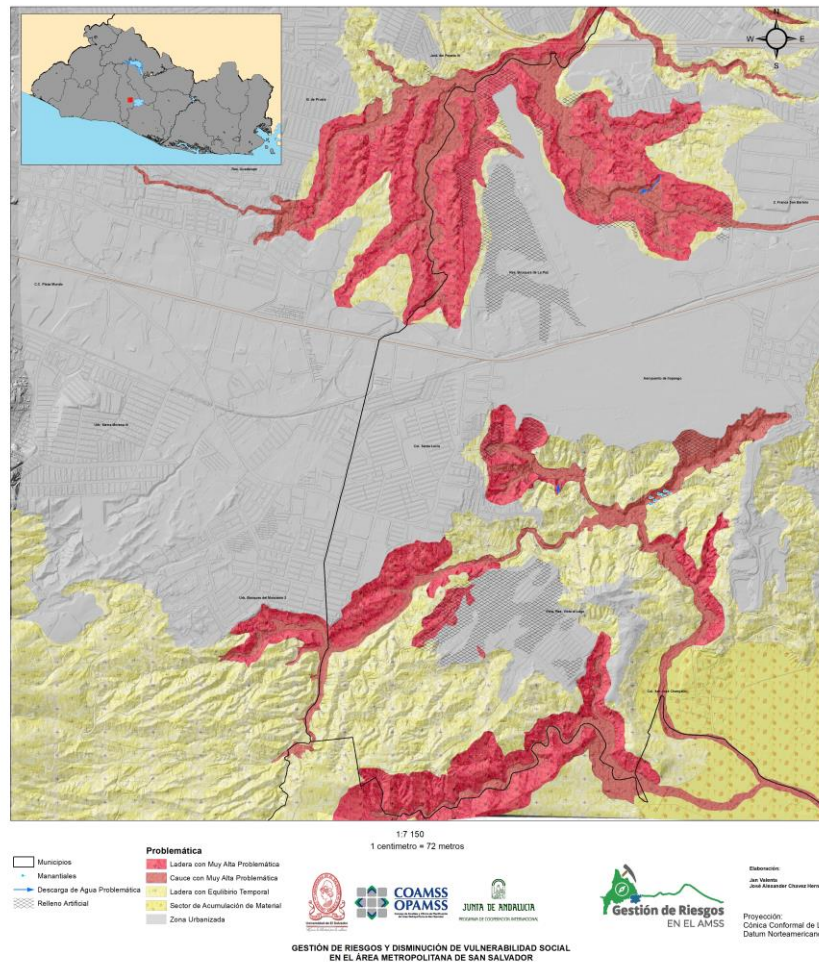


Fig. 27 Mapa de Ingeniería Geológica de sector de estudio

Se recomienda para las zonas ya urbanizadas:

- ✓ **Para la erosión retrograda - llenar el valle está bien (pero tener cuidado con detalles, como los mencionados en obra de mitigación de Santa Lucia)**
- ✓ **Para la erosión retrograda - rellenar el valle está bien en obras de mitigación (pero tener cuidado con detalles que pueden hacer que obra de mitigación falle en futuro)**
- ✓ **Reducir el flujo de agua y su energía es deseable. El agua de lluvia necesita ser capturada y reutilizada o incluso extender el proceso de descarga. Manejo de agua en cuenca alta y en zona urbana (retención).**
- ✓ **¿Qué hacer con población? Alerta temprana (acciones con población) organizar a la población de la zona en equipos para que monitoreen el territorio al momento de las lluvias, y en caso de riesgo puedan alertar y se active el protocolo que corresponda.**
- ✓ **Hacer ensayos de geofísica en las calles comúnmente inundadas, para el monitoreo de la infiltración, daños de tuberías (fugas) e inundaciones.**
- ✓ **Mapear zonas de riesgo, seguimiento y monitoreo de obras de mitigación (incluyendo humedad)**
- ✓ **Seguimiento a niveles y secciones de río.**
- ✓ **Monitoreo de las lluvias, intensidades y volúmenes de precipitación para activar protocolos de evacuación y alerta temprana.**
- ✓ **Promocionar como medidas de adaptación el guardar agua lluvia por sectores más pequeños o por vivienda pudiendo ser incluso de reúso y concientizar al sector al buen manejo de los desechos sólidos, considerando una limpieza constante de la red de aguas lluvias (tema priorizado desde consultoría de Lotti 2004).**

Algunos aspectos que se podrían valorarse de manera general son:

- Observar o investigar las zonas críticas de manera permanente y si inicia algún problema, enseguida dar mantenimiento o mitigarlo. Especialmente dar seguimiento al estado de las tuberías, bóvedas y sus descargas (censo o levantamiento de sistema de tuberías y descargas para identificar más críticas). Observar también las descargas de agua de lluvias y agua negra hacia ríos u quebradas (frecuentemente están conectadas). Si hay algún problema, reparar rápidamente para evitar crecimiento. La priorización de zonas más críticas ayudara a la identificación preliminar de obras de mitigación estructurales/no estructurales.
- Para el monitoreo es posible usar diferentes metodologías modernas de geofísica, sensores remotos (humedad (Fig. 29) y cambios en cada sector, incluyendo movimientos superficiales) y equipo que mida humedad. Para monitorear las descargas superficiales que pueden ser inaccesibles se puede usar el dron o visitas de campo con alguna frecuencia. La construcción de información nueva a más detalle (geomorfología, geología e ingeniería geológica) ayudará en la limitación de zonas críticas, su descripción, propuestas como observar o evaluar el riesgo de zonas críticas, así como propuestas para la mitigación.

- Involucrar a habitantes y comunidades en monitoreo, seguimiento y mantenimiento de obras realizadas o uso de suelo recomendado.
- Recopilar los datos meteorológicos para ambas cuencas de lluvias: lluvias extremas, para estudiar periodos de recurrencia y eventos típicos.

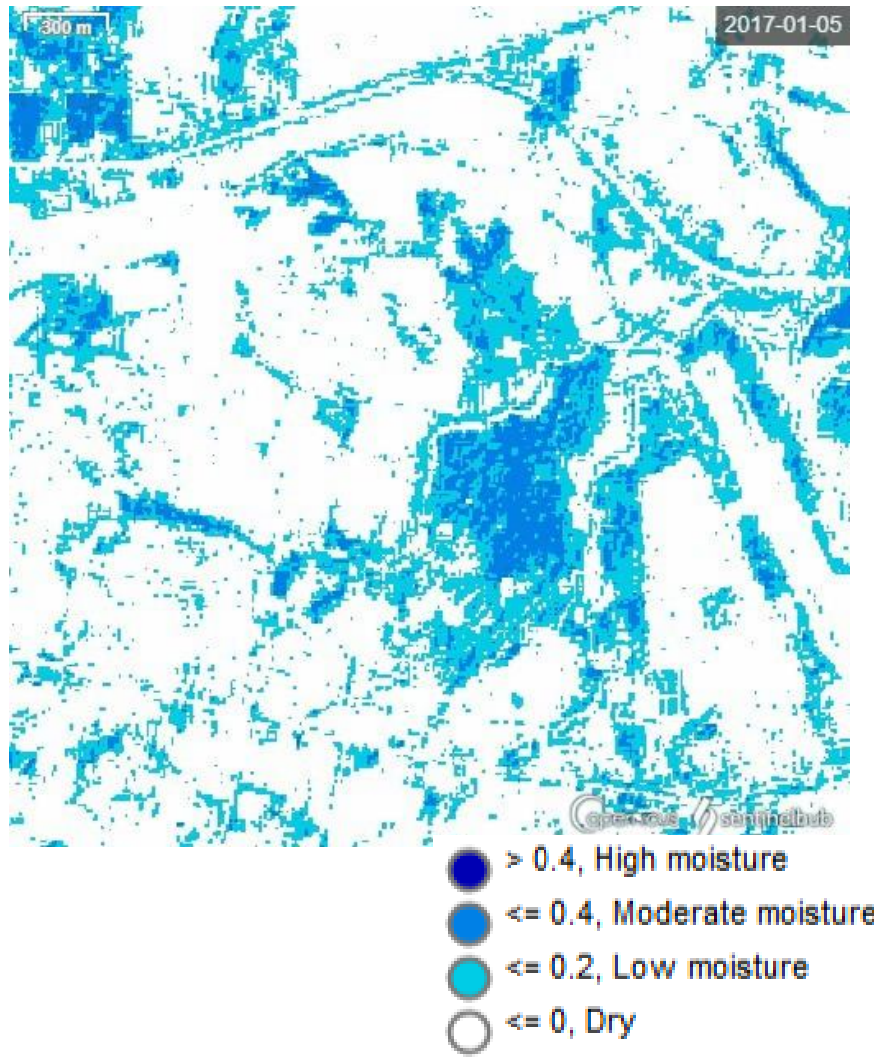


Fig. 29 Cambios de humedad mediante sensores remotos

- Es necesario recopilar información de sismos históricos y recientes, así como gravimetría del sector, esto para evaluar influencia de tectónica en erosión.
- Saber manejar la erosión lateral de río y quebradas, siendo importante (de ser posible) modelar y conocer erosión, cambios lecho, sedimentos y meandros. En el

caso de sector de las Pilitas, colonia Guadalupe hay una quebrada pequeña que podría afectar el sector urbano por erosión retrograda, este es solo un ejemplo, pero se ven otros casos en el sector.

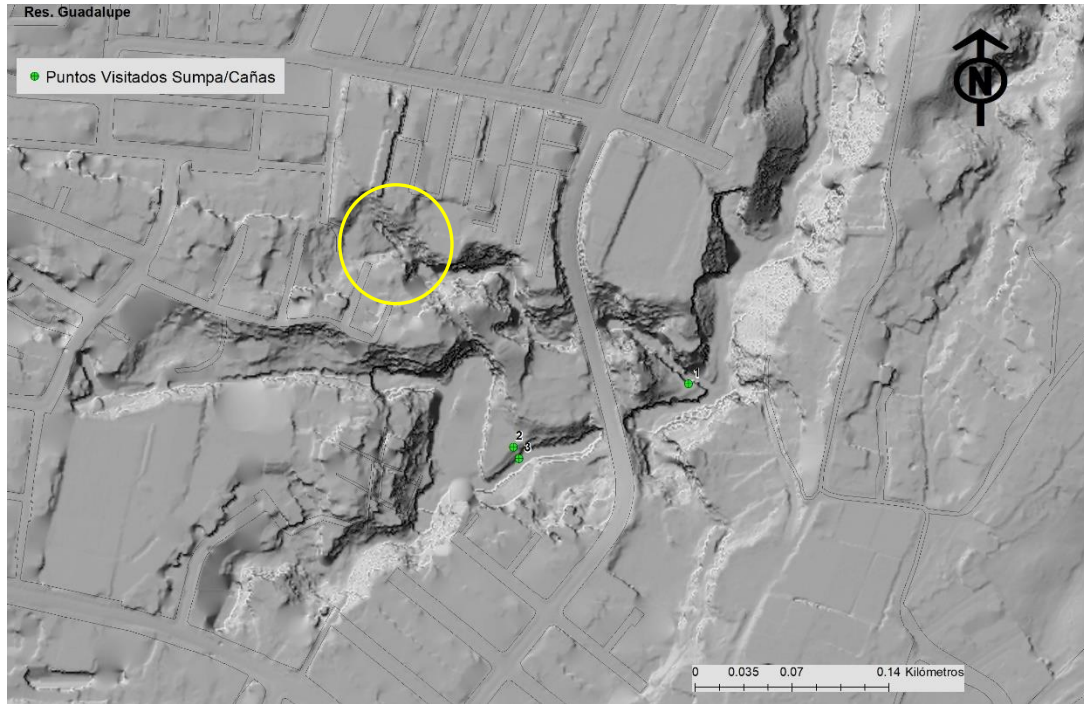


Fig. 30 Problema erosión retrograda en quebrada a la par de bóveda fallada y que podría provocar problemas futuros

- La canalización de algunos sectores se podría valorar pero dependerá de sus características y dinámica. La canalización de ríos es usada generalmente para el control de inundaciones, navegación, drenaje y control de erosión pero a veces solo se mueve los problemas aguas abajo, por lo tanto es de tener mucho cuidado si se piensa implementarla. Una gran cantidad de sedimento es transmitido aguas abajo del canal intervenido, al aumentar pendiente y velocidad debido a un enderezamiento de drenaje; en los sectores aguas abajo al tener una pendiente más plana no puede transportar la cantidad de sedimentos, por lo que se va depositando el exceso en cantidades que van decreciendo gradualmente a lo largo del drenaje. La degradación entre la parte enderezada puede causar el colapso del escarpe, por lo tanto incrementando más la fuente de sedimentos. Así, el drenaje modificado intenta establecer una nueva pendiente de equilibrio a través de la combinación de degradación progresiva aguas arriba y agradación aguas abajo. (Knighton, 1998)
- Para controlar y proteger contra la erosión lateral y frentes impactados por erosión retrograda, podría valorarse el uso de pilotes bien profundos, buscando que erosión vertical de río no puede desnudar las cimentaciones de pilotes, evitando el uso de gaviones ya que se ha observado que no duran mucho tiempo.

- Es importante calcular el caudal que recorre las tuberías y descargas de aguas lluvias y negras para emplear el diámetro adecuado tomando en cuenta el caudal máximo y el nivel de la inundación máxima). Así como mejorar las descargas de las aguas lluvias de carretera en taludes y quebradas (ya que se han observado muchos problemas debido a esto), además se puede dividir caudal e ir disminuyendo velocidad.
- También se podría valorar desviar parte del caudal de un sector por medio de tubería y descargar de manera segura a otro lugar, evitando la concentración de escorrentía porque eso es lo que puede hacer que erosión evolucione a problema mayor.
- Se puede disminuir el caudal de un sector por medio de sistemas de detención y Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Para la construcción de sistema de tuberías hay que tomar en consideración la intensa erosión y el sistema de drenaje del terreno. Los puentes y alcantarillas deben ser diseñados para un caudal máximo y considerar la erosión vertical, horizontal y retrograda. Hay que evitar cambiar el perfil del río/quebrada y las descargas a su lecho deben considerar posibles cambios de altura en ríos/quebradas.
- Donde sea posible retener el caudal máximo (pico o la ola de inundación) de ríos se podría valorar construir una presa de retención, diques o polders (es necesario estudio a detalle para no crear más afectaciones al hacer estas intervenciones). Las descargas de agua lluvia a ríos/quebradas se podrían canalizar y construir hasta llanura aluvial y lecho de ríos (previendo que nivel de lecho podría bajar o subir también, esto evitara fallas que después afecten urbanizaciones, necesario revisar estado de descargas actuales). Además, es necesario manejar pendiente para ir controlando la velocidad del agua. Siendo importante manejar el caudal máximo de cada cuenca, según situación actual, pero también valorando la futura.
- Se puede también proteger el nivel base en unión de quebradas de manera que se proteja el nivel base, controlando cambios en nivel lecho cauce y evitar la evorsión.
- La erosión vertical se podría disminuir valorando un sistema de aliviaderos o presas, pero es de conocer afectación en erosión lateral y vertical que podría provocar. Ya que habría que controlar la curva exponencial de río ya que se puede disparar erosión lateral; se podría manejar sectores con diferente nivel (como cascada) protegiendo laterales.
- Mejorar rellenos en zonas de Badlands para construcciones; es importante compactar relleno con capas de espesor adecuado, para evitar problemas de erosión superficial/subterránea y que se vean afectadas las cimentaciones de infraestructura o carreteras.
- La reforestación en algunos sectores podría ayudar a disminuir problemática, lo mismo con cambios de usos de suelo especialmente en zonas donde la agricultura o tipo de siembra pueda ser perjudicial. Se podría hacer proyectos piloto con Bambú en sectores de Tierra Blanca Joven (TBJ) para valorar sus beneficios.
- Hay que tomar en consideración la intensa erosión y el sistema de drenaje del terreno. Para disminuir la erosión fluvial mantener y recuperar la vegetación nativa

es recomendable, ya que puede ayudar a que se mantenga equilibrio, además de otras estrategias para controlar la erosión.

- No ubicar las construcciones en el margen de las planicies o escarpes, cerca de barrancos erosionales y en los márgenes de badland, ya que, en el futuro, estos sitios también pueden tener problemas por los procesos de la erosión.
- Evaluar la influencia de extracción de arena en la llanura aluvial de sistemas de drenaje. Para disminuir la extracción de arena se podría valorar identificar otras zonas o banco de materiales en otros sectores donde se podría extraer arena (roca triturada, por ejemplo)
- Se podría valorar la conformación de taludes (con diferente inclinación, así como cobertura en la ladera y corona) para evitar infiltración y mantener o aumentar su factor de seguridad. Proyecto piloto ha mostrado resultados prometedores.
- Es necesario mejorar diseño geotécnico de taludes mediante el uso de mecánica de suelos parcialmente saturados (como TBJ) y modelos constitutivos adecuados los cual sirve para obtener la estabilidad de taludes y factor de seguridad que indicara obras o conformación de taludes para evitar inestabilidades.
- Algunas técnicas para mejorar el suelo se pueden valorar tales como por medio de compactación adecuada (incluyendo compactación dinámica), así como pre-saturar y/o saturar el suelo y posteriormente provocar colapso o nivelación mediante carga estática.
- Se podría proteger relleno de tuberías flexibles con compactación, geopolímeros o proteger contra infiltración, poner dren de arena (arriba y debajo de tubería) para evitar socavación en caso de fuga.

Referencias

- Baxter, S. (1995). Impacto ambiental en el río las Cañas. San Salvador: Ed. Biblioteca BANCASA.
- Chavez J, Šebesta J, Kopecky L, Lopez R, Landaverde J (2014) Application of geomorphologic knowledge for erosion hazard mapping. *Nat Hazards* 71:1323–1354. doi:10.1007/s11069-013-0948-8
- Chávez, J.A, Landaverde J, Mendoza L, Lopez R, Tejnecký v, (2016) Monitoring and behavior of unsaturated volcanic pyroclastic in the Metropolitan Area of San Salvador, El Salvador. *SpringerPlus* 5(1): 1-24. doi: 10.1186/s40064-016-2149-x
- Charlton, R., (2007): *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Routledge (2007).
- Derruau, M., (1991): *Geomorfología*. Editorial Ariel, S.A. (1991)
- Knighton, D., (1998): *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*. A Hodder Arnold Publication (1998)
- Šebesta J., J. A. Chavez Y W. Hernández “Cartografía y evaluación para estudiar los procesos de Erosión en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador, América Central” OPAMSS-SGC, San Salvador, El Salvador, Reporte Técnico, 2010.
- Toy, T., Foster, G., Renard, K., (2002): *Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control*. Wiley (2002)