



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

INVENTARIO Y CUANTIFICACIÓN DE VOLÚMENES DE MATERIALES
APORTADOS POR PROCESOS GRAVITACIONALES EN LA CUENCA DEL RÍO
EL ESTADO, LADERA SUROESTE DEL VOLCÁN PICO DE ORIZABA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

DANIELA ROMERO RICO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL LEGORRETA PAULÍN
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, OCTUBRE 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Resumen	4
I. INTRODUCCIÓN	7
II. OBJETIVOS	
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares	9
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
IV. JUSTIFICACIÓN.....	11
V. HIPÓTESIS	11
VI. ANTECEDENTES	12
VII. MARCO TEÓRICO	17
Causas de los deslizamientos	20
Clasificación de los procesos gravitacionales.....	24
Inventario de deslizamientos	29
Metodologías para el cálculo de volúmenes	32
CAPÍTULO 1. ÁREA DE ESTUDIO	35
1.1. Localización geográfica del área de estudio	35
1.2. Geología y geomorfología	40
1.3. Clima.....	55
1.4. Edafología	65
1.5. Hidrografía	67
1.6. Vegetación y uso de suelo	69
1.7. Cambio de uso de suelo.....	72
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE VOLÚMENES EN LA CUENCA EL ESTADO.....	74
2.1. Etapas del proceso metodológico.....	74
CAPÍTULO 3. INVENTARIO Y ANÁLISIS DE VOLÚMENES DE LA CUENCA EL ESTADO.....	100
3.1. Inventario de procesos gravitacionales.....	100
3.2. Análisis de los procesos gravitacionales.....	103
3.3. Factores preconditionantes y desencadenantes predominantes en el área de estudio.....	110

3.4. Análisis morfométrico.....	112
3.5. Unidades geomorfológicas.....	119
3.6. Análisis Geotécnico: conductividad hidráulica y granulometría.....	121
3.7. Cálculo de volúmenes de materiales.....	128
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	137
REFERENCIAS.....	143
ANEXO I	152

RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología semiautomática la cual permite cuantificar los materiales aportados por procesos gravitacionales, además, se realizó una para la elaboración de un inventario de estos procesos. Dicha metodología se propone para terrenos volcánicos, ya que en sus sistemas fluviales ocurren pequeños, pero potencialmente peligrosos procesos gravitacionales.

La cuenca del Río El Estado, localizada en la ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba, es un área propensa a que se generen este tipo de procesos, esto es principalmente por las características de los materiales que la componen, así como a diversos factores climáticos, geológicos y antrópicos.

En primer lugar, se realizó un inventario de procesos gravitacionales del área de estudio, el cual se creó a partir de diversos recorridos durante el trabajo de campo, con el objetivo de identificar los procesos que se encuentran en las laderas de ambos márgenes del río. El inventario está conformado por 94 procesos, de los cuales, 39 son deslizamientos de escombros, 19 caídas de rocas, 17 deslizamientos de suelo, 12 flujos de escombros y 7 deslizamientos de asentamiento profundo.

También se realizó un análisis geomorfométrico, el cual permitió conocer que la mayor parte de los procesos gravitacionales se distribuyen en los valles fluviales con un 59% del total, el 26% en las laderas de montaña constituidas de arenas y lahares y, un 15% en las laderas de montaña de andesitas de pendientes medias.

Como parte de la metodología se realizaron análisis geotécnicos (granulometría y conductividad hidráulica) del suelo que componen las cabeceras de los procesos gravitacionales, con el objetivo de conocer los diferentes tamaños que componen el suelo y la rapidez con la que se infiltra el agua en dichos procesos. Los resultados obtenidos con estas dos pruebas permitieron definir que, en primer lugar, la composición de los materiales en el área de estudio es heterogénea, es decir, poco consolidados y cohesivos y, en segundo lugar, que el agua se infiltra muy fácilmente por dichos materiales, lo que hace entre otros factores que se generen dichos procesos. Además, se definió que la mayoría de los sedimentos que se aportaron

al cauce por los procesos, estaban constituidos principalmente por arenas en su mayoría, gravas y un porcentaje bajo de finos y también de bloques de roca de diferentes tamaños, producto del proceso de caída.

Para la estimación del volumen de los procesos gravitacionales se usaron dos métodos, uno manual y uno automático. El método manual se realizó a través de las medidas tomadas a los 94 procesos durante el trabajo de campo. En diversos recorridos, se obtuvo el largo, ancho y espesor de las cicatrices de cada uno de los procesos, y con estas se calculó el volumen multiplicando las medidas, obteniendo un volumen de 29,532 m³.

En lo que se refiere al método automático, este se realizó a 19 procesos a través de un SIG, el cual con la ayuda de las curvas de nivel generó dos modelos digitales de elevación. Estos modelos representaron la superficie del terreno antes y después del proceso gravitacional, y con la diferencia de ambos, se calculó el volumen de materiales de los 19 procesos, los cuales se identificaron en campo y son parte del inventario, pero fue necesario cartografiarlos en forma de polígonos en trabajo de gabinete para poder obtener el volumen de cada uno. El volumen calculado con este método para los 19 procesos fue de 12,615 m³, mientras que el volumen calculado manualmente para los mismos procesos fue de 8,748 m³, lo que indica que a pesar de que no hay una diferencia muy grande entre un método y otro, el automático es más preciso.

Los resultados permitieron confirmar que el área de estudio tiene un alto potencial para que se generen dichos procesos, así como también se conocieron los diversos factores que favorecen la ocurrencia de estos, como: la infiltración del agua, el tamaño y composición de los materiales, las pendientes y otros factores climáticos y antrópicos. Finalmente, se pudo conocer la diferencia en el volumen de los materiales aportados al cauce entre un método y otro, el cual no dista mucho, sin embargo, los volúmenes que se calcularon están por debajo de lo real y de lo que potencialmente pueden llegar a aportar, esto debido a diferentes razones como: erosión fluvial, los errores humanos que se pudieron cometer en el trabajo de campo para obtener las medidas de los procesos, el equipo utilizado el cual tiene un nivel

de precisión y la resolución de las imágenes utilizadas para el trazo de los procesos en forma de polígono para calcular el volumen mediante el SIG.

Por lo tanto, dicha metodología es práctica e integral ya que, para calcular los volúmenes de materiales, se realizaron otros análisis que permitieron conocer las características y el comportamiento de los procesos gravitacionales en el área de estudio y su aplicación en otros terrenos volcánicos puede resultar conveniente.

I. INTRODUCCIÓN

El volcán Pico de Orizaba, localizado a 290 km al oriente de la Ciudad de México, es el volcán más alto de México (5,675 m s.n.m). Es una estructura geológica que cuenta con un sistema hidrológico importante para la población y es un área que alberga una gran cantidad de especies de flora y fauna endémica. Por ello, se encuentra en estado de conservación desde que el gobierno mexicano lo decretó Área Natural Protegida, en la categoría Parque Nacional, el 4 de enero de 1937 (SEMARNAT, 2017).

El área que comprende el volcán también se caracteriza por la ocurrencia de procesos gravitacionales que generan sedimentos, los cuales representan un peligro para la población, así como para las actividades económicas y la infraestructura. Estos procesos se generan por diversos factores, entre los que destacan, están las características litológicas ya que presenta áreas extensas donde la estructura de la roca está debilitada, las precipitaciones fuertes que son comunes en verano y por ende saturan de agua sus laderas, las pendientes abruptas, la resistencia del suelo que influye en el desprendimiento de material, la deforestación y el impacto antrópico, entre otros.

La investigación sobre los procesos gravitacionales que ocurren en la ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba y que causan daños significativos a la población se ven limitados por la escases de información cartográfica temática y de inventarios de deslizamientos; tal es el caso de la cuenca del Río El Estado. Por esto, es importante generar conocimiento que se utilice en la prevención de riesgos por deslizamientos y en la promoción de un ordenamiento territorial adecuado.

En cuanto a las afectaciones causadas por los procesos gravitacionales en el volcán, cabe mencionar dos eventos. En junio de 2003, cuando lluvias de gran intensidad generaron flujos de escombros y sedimentos, los cuales descendieron por varios cauces y causaron inundaciones en ciudades como Nogales y Ciudad Mendoza (Rodríguez et al., 2006). Sin embargo, la mayor afectación estuvo relacionada con la ruptura de un poliducto de hidrocarburos. Dicho fracturamiento

se derivó por el desbordamiento del Río Chiquito, el cual se saturó por las fuertes lluvias y arrastró grandes cantidades de lodo y detritos provenientes de los deslizamientos generados en la parte media y alta de la cuenca. Este evento ocasionó un desastre considerable, principalmente para la localidad Balastrea, ya que hubo pérdidas humanas, varios heridos, daños a los cultivos, casas, animales domésticos, vehículos y, también, provocó la contaminación de los ríos y manantiales de la región. (La Jornada, 2004).

Es por esto por lo que el área del volcán requiere múltiples estudios en el campo de las Ciencias de la Tierra y es ahí donde la geomorfología, la cual es una rama de la geografía y la geología, cuenta con un potencial para generar información que refleje la relación entre los procesos gravitacionales y los materiales aportados, y al mismo tiempo puede establecer una metodología que permita cuantificar los volúmenes de dichos materiales en áreas donde se presenten estos procesos.

A pesar de que se han utilizado diferentes metodologías para cuantificar los materiales producidos por los procesos gravitacionales, no existe hasta el momento una establecida. El monitoreo de los procesos se ha caracterizado por su variabilidad espacial y temporal. No obstante, se han hecho trabajos e investigaciones para cuantificar y monitorear los procesos gravitacionales en el área del volcán, de los cuales los más importantes han sido desarrollados por Legorreta et al. (2014, 2017, 2020). Específicamente, en el estudio "*Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz*", Legorreta et al. (2014) realizan una cuantificación de volúmenes de materiales en el área de estudio de esta investigación, pero sólo a una escala regional.

Por la recurrencia de los procesos gravitacionales en áreas localizadas en la ladera suroeste del volcán, en el presente trabajo se elabora un inventario de procesos, a partir del cual se desarrolla y aplica una metodología para la cuantificación semiautomática de volúmenes de materiales aportados por deslizamientos. En este trabajo se determinan los mecanismos que generaron dichos procesos, con el fin de conocer la estabilidad de la cuenca del Río El Estado.

II. OBJETIVOS

Objetivo general

Elaboración un inventario de procesos de remoción en masa y aplicación de una metodología para la estimación de volúmenes de materiales aportados por dichos procesos a la Cuenca del Río El Estado, localizada en la ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba, entre los estados de Puebla y Veracruz.

Objetivos particulares

- Elaborar un inventario de los procesos gravitacionales, así como un mapa de las áreas afectadas por éstos, en la cuenca del Río El Estado.
- Realizar un análisis geomorfométrico de las áreas afectadas por procesos gravitacionales a partir de información en campo y gabinete, para caracterizar los volúmenes aportados por estos procesos.
- Obtener muestras de suelo y realizarles análisis geotécnicos (conductividad hidráulica y granulometría) para analizar parámetros geotécnicos y determinar su relación con dichos procesos.
- Cuantificar los volúmenes de materiales (sedimentos, detritos, rocas) aportados por procesos gravitacionales de manera semiautomática.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la cuenca del Río El Estado, se presentan diversos procesos de remoción en masa generados por diferentes factores: 1) Las características litológicas de los materiales presentes, ya que hay áreas extensas donde la estructura de la roca está debilitada; 2) Las precipitaciones fuertes que son comunes en verano y por ende saturan de agua las laderas; 3) Las pendientes abruptas que favorecen dichos procesos por las fuertes inclinaciones; 4) La resistencia del suelo que influye en el desprendimiento de material; 5) La deforestación para la comercialización de madera y el aprovechamiento agrícola del suelo (Alanís, 2018) y 6) El impacto antrópico como la extracción de materiales para la construcción, la construcción de caminos y carreteras y la instalación de ductos que transportan hidrocarburos (*Ibidem*).

Estos factores han contribuido a que se generen dichos procesos a lo largo de ambos márgenes del río, y los sedimentos generados se han acumulado en el cauce o han sido transportados por el agua a las áreas bajas de la cuenca y, en conjunto con otros sedimentos de los demás cauces, han provocado eventos desastrosos para la población.

En cuanto a las afectaciones causadas por los procesos gravitacionales en el volcán, cabe mencionar que, en junio de 2003, lluvias de gran intensidad generaron flujos de escombros y sedimentos, causaron inundaciones en Nogales y Ciudad Mendoza (Rodríguez et al., 2006). Sin embargo, la mayor afectación estuvo relacionada con la ruptura de un poliducto de hidrocarburos debido al desbordamiento del Río Chiquito, el cual arrastró grandes cantidades de lodo y sedimentos provenientes de los deslizamientos generados en la parte media y alta de la cuenca, lo cual causó grandes afectaciones a la población en general.

IV. JUSTIFICACIÓN

Los procesos de remoción en masa presentes en el área de estudio y los sedimentos aportados han causado daños a la población en términos sociales, económicos y territoriales. Es por esto por lo que se requiere establecer una metodología que permita cuantificar los volúmenes de materiales en áreas del volcán donde se presentan dichos procesos, ya que permitirá conocer la cantidad de material que puede ser arrastrado a las partes bajas del volcán donde se ubica la mayoría de la población en caso de que se presente un evento como el ocurrido en 2003. Es por lo anterior, que esta investigación implementó una metodología que permitiera cuantificar los volúmenes de materiales de manera práctica y sencilla, a fin de conocer el volumen en metros cúbicos que pueden generar los procesos que se generan en la cuenca. Esto con la finalidad de que las autoridades municipales, estatales y federales puedan acceder a la información generada e incluso implementen la metodología para hacer una gestión adecuada y puedan mitigar y prepararse en caso de que se presenten flujos de escombros.

V. HIPÓTESIS

La cuantificación de volúmenes de materiales en el cauce del Río El Estado aplicando una metodología de manera automática y manual, permitirá conocer el volumen en metros cúbicos que han generado los procesos de remoción en masa presentes en el área.

VI. ANTECEDENTES

En México los estudios sobre los procesos gravitacionales se han ido incrementando debido a que se encuentran entre los más destructivos en el planeta y constituyen una de las causas más frecuentes de pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo (CENAPRED, 2014). Es uno de los países que presenta una alta incidencia a la ocurrencia de éstos (CENAPRED, 2016), por lo que, conocer sus causas y mecanismos ha sido un tema de gran interés para la comunidad científica, así como para el Gobierno, ya que han contribuido para tomar medidas de prevención contra desastres generados por dichos procesos.

Actualmente, existen diversos instrumentos de prevención para mitigar dichos procesos, tales como los Atlas de Riesgos Estatales y los Municipales, los cuales han sido elaborados mediante el financiamiento de los municipios con recursos propios y con el de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2018) al menos hasta el año 2018 y que son revisados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Los Atlas de Riesgos municipales constituyen uno de los instrumentos que el Gobierno Federal ha privilegiado en los últimos años, con el fin de proporcionar a los municipios del país y a la población en general, herramientas de prevención de desastres (como los procesos gravitacionales) y el ordenamiento de los asentamientos humanos (Ruíz et al., 2015).

También existe el Atlas Nacional de Riesgos, el cual presenta un mapa nacional de susceptibilidad por inestabilidad de laderas donde muestra las áreas susceptibles por inestabilidad, así como las áreas libres. Con los datos que se muestran en el Atlas, se pueden emitir recomendaciones para la toma de decisiones y establecer medidas efectivas de prevención y mitigación (CENAPRED, 2018).

Las investigaciones sobre zonas de susceptibilidad y riesgo por procesos gravitacionales no solo se han realizado en México, sino en diversos países del mundo como, por ejemplo, las que han estado a cargo del Departamento de

Recursos Naturales del Estado de Washington (2006); Hervás y Bobrowsky (2009) y Blahut et al. (2010).

Por otro lado, no solo se han desarrollado e incrementado los estudios de procesos gravitacionales, sino que también se han desarrollado diversas investigaciones sobre inventarios de deslizamientos y cálculo de volúmenes de materiales aportados por dichos procesos.

Jaboyedoff et al. (2020) realizaron una investigación sobre la revisión de los métodos utilizados para estimar y caracterizar las superficies iniciales de falla por deslizamientos y calcular los volúmenes en función de la información de la superficie. En dicho artículo se revisan los modelos más sencillos, como la medición de volúmenes basada en elipsoides y la información que se puede obtener del desplazamiento y morfología de la superficie, también se describe un método simple para estimar el volumen de un deslizamiento de rocas utilizando discontinuidades identificadas, entre otros. Dichos métodos se ilustran con ejemplos y se aplican a estudios de caso y se comparan cuando los datos disponibles lo hacen posible.

Peark et al. (2005), realizaron un estudio sobre deslizamientos y el aporte de sedimentos a un sistema de drenaje en una pequeña cuenca de Hong Kong. Observaron que los deslizamientos pueden influir en la producción de sedimentos en pequeñas cuencas de drenaje y depositarse directamente en el cauce, asimismo, presentan ejemplos de volúmenes de los materiales que se generaron por deslizamientos.

Kalderon-Asael et al. (2008), realizaron un modelado de la relación entre área y volumen de deslizamientos en pendientes homogéneas utilizando un programa de estabilidad de taludes siguiendo una ley de potencias.

Guzzeti et al. (2009), también realizaron un estudio de volúmenes de deslizamientos y tasas de movilización en donde seleccionaron un inventario de 677 deslizamientos, así como sus medidas para establecer una relación empírica para vincular el área y el volumen; dicha relación tomó la forma de una ley de potencia.

Wenkey et al. (2011), evaluaron el aporte de sedimentos por deslizamientos; mencionan que los deslizamientos juegan un papel importante en la evolución topográfica de los sistemas montañosos y que son una fuente importante de sedimentos en los sistemas fluviales de los volcanes.

Por otro lado, la mayoría de los trabajos realizados acerca del volcán Pico de Orizaba son investigaciones enfocadas en su historia eruptiva (Carrasco-Núñez, 1993; Palacios, 1999; Sheridan, 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002; Macías, 2005; Rodríguez, 2006), los peligros que han representado los principales eventos eruptivos, los programas de manejo ambientales y ecoturísticos desarrollados en el Parque Nacional (SEMARNAT, 2015), entre otros.

Otros estudios sobre el volcán, como los de Hubbard (2001), Sheridan et al. (2002), Zimbelman et al. (2004), Concha-Dimas et al. (2005) y Hubbard et al. (2007), e instituciones como el CENAPRED (2004) y la Secretaría de Protección Civil (2010) han propuesto métodos a escala regional y local para identificar los peligros por deslizamientos y flujos de escombros, en general, estos estudios se han enfocado en identificar los sitios, pero no evalúan los volúmenes removidos ni su captura por parte de los afluentes de los ríos cercanos.

De forma específica, también se han hecho esfuerzos para el estudio de los procesos gravitacionales en distintas áreas del volcán Pico de Orizaba. Tras el desastre ocurrido en 2003, cuando un flujo de escombros provocó la explosión de un poliducto de hidrocarburos de Pemex y, con ello, un gran desastre en la localidad Balasterra, Rodríguez et al. (2006) estudiaron este proceso a partir de la evaluación de las condiciones geológicas y climatológicas de la región. Los investigadores hallaron que estas condiciones generaron un flujo de baja concentración en los ríos Chiquito y Barranca del Muerto. A pesar de esto, no realizaron un inventario de deslizamientos.

Existen pocas investigaciones en las que se hayan realizado inventarios de deslizamientos y cálculo de volúmenes. Una de éstas fue realizada por Legorreta-Paulin et al. durante 2014. En ésta se elaboró un inventario multitemporal, un análisis de susceptibilidad y una estimación de volumen de deslizamientos en el

flanco suroeste del volcán Pico de Orizaba. Este estudio proveyó un panorama general sobre los deslizamientos en dicha ladera del volcán a partir de una metodología integral.

En su investigación, plantearon que para calcular el volumen de material es necesario realizar con anterioridad un inventario de deslizamientos, ya sea histórico o multitemporal. Señalaron que con esta información se debe elaborar una base de datos que sea procesada en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Después de realizar ambos procedimientos en la ladera suroeste del volcán, los investigadores calcularon el volumen y el área de 102 cicatrices de deslizamientos, con el objetivo de desarrollar una relación teórica entre volumen y área en deslizamientos superficiales ocurridos en el área. En esta parte se excluyó el volumen de depósitos o el área de evacuación del deslizamiento (Legorreta-Paulin, 2014).

Aceves et al. (2016), desarrollaron una metodología que integra la cartografía geomorfológica con la elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos usando un SIG y el método de regresión logística múltiple (RLM) en la cuenca del Río El Estado.

En otro estudio elaborado por Legorreta-Paulin et al. (2017), estiman el volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, particularmente en la cuenca del Río El Estado, a través de un SIG bajo un criterio geomorfológico y elaboraron un inventario multitemporal y susceptibilidad del área.

También se han realizado algunas tesis de nivel maestría y doctorado en el área de estudio. Gómez (2017), realizó su investigación sobre la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos, y por su lado Alanís (2018) desarrolló su trabajo sobre la influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de laderas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En la Figura 1 se muestra una relación de las publicaciones más relevantes sobre el Pico de Orizaba y la cuenca del Río El Estado. Las publicaciones fueron clasificadas de acuerdo con el tema abordado por las investigaciones.

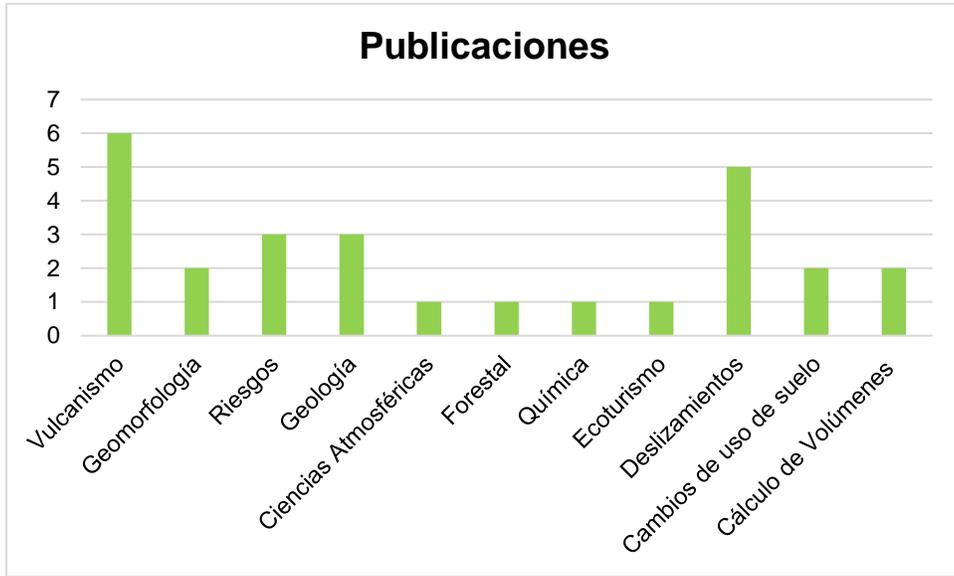


Figura 1. Publicaciones más relevantes del volcán Pico de Orizaba y de la Cuenca del Río El Estado. Fuente: *Elaboración propia.*

VII. MARCO TEÓRICO

Los deslizamientos son procesos gravitacionales (también llamados procesos de remoción en masa o movimientos de masa) que se caracterizan por los movimientos pendiente abajo de material influido por la acción de la fuerza de gravedad. Son procesos geológicos que pueden ocurrir en cualquier momento en un lugar con relieve abrupto e incluso en terrenos casi llanos, y que no precisan de un medio de transporte como agua o viento (Tarbuck y Lutgens, 2000).

Este tipo de procesos pueden llegar a ser muy peligrosos si se presentan en lugares donde existen asentamientos humanos; afectan también las actividades económicas y la infraestructura, por lo que son considerados con frecuencia como un riesgo latente. Este riesgo se ha incrementado en los últimos años debido al crecimiento de la población, la cual ha ocupado espacios donde el relieve es abrupto y las condiciones geológicas no son muy estables (Crozier, 1986).

A pesar de que los deslizamientos se presentan en diferentes áreas, son más frecuentes en las zonas tropicales; incluso, su extensión es mayor debido a las altas precipitaciones y la deforestación. Estas condiciones facilitan el movimiento superficial o profundo de la capa alterada, producida principalmente por las lluvias. Por ello, es necesaria la realización de cartografía geomorfológica detallada y sondeos de reconocimiento del terreno (Tricart, 1974).

Aunque existen distintos tipos de procesos de remoción en masa, en esta investigación se hace referencia a cuatro, los cuales se presentan en la cuenca del Río El Estado: deslizamientos superficiales, deslizamientos de asentamiento profundo, caídas y flujos de escombros.

Los deslizamientos tienen cabeza, cuerpo, pie y base; a su vez, se componen de los siguientes elementos: corona, escarpe principal, escarpe secundario, cabecera, grietas de tensión, superficie de falla, zona de desprendimiento, zona de acumulación, flanco derecho e izquierdo, superficie original del terreno, base y punta (Figura 2 y Figura 3). De acuerdo con el *Diccionario Geomorfológico* de Lugo (1989, 2011), éstas son las definiciones de cada elemento:

- **Corona:** capa de roca o suelo resistente sobre otra poco resistente a la erosión, formando la mesa de una elevación.
- **Escarpe principal:** superficie muy inclinada a lo largo del movimiento. Se forma en el punto de origen de un proceso gravitacional de desprendimiento o deslizamiento.
- **Escarpe secundario:** superficie inclinada que se produce por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- **Cabecera:** porción superior del proceso que se encuentra entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Grietas de tensión:** ruptura longitudinal de la superficie, sin desplazamiento de las porciones que separa.
- **Superficie de falla:** área debajo del proceso que delimita el volumen del material desplazado.
- **Zona de desprendimiento:** área donde se empieza a desprender el material. Abarca desde la corona hasta la parte media del proceso.
- **Zona de acumulación:** área donde se acumula el material desplazado.
- **Flanco derecho e izquierdo:** cada lado del deslizamiento (perfil lateral). Para reconocer el flanco, se mira desde la corona hacia el pie.
- **Superficie original del terreno:** superficie que se encontraba antes de que ocurriera el deslizamiento, aún existen pequeñas proporciones de esta en su estado original.
- **Base:** área cubierta por el material desplazado.
- **Punta:** área que se encuentra más alejada de la cabecera y cercana a la base.

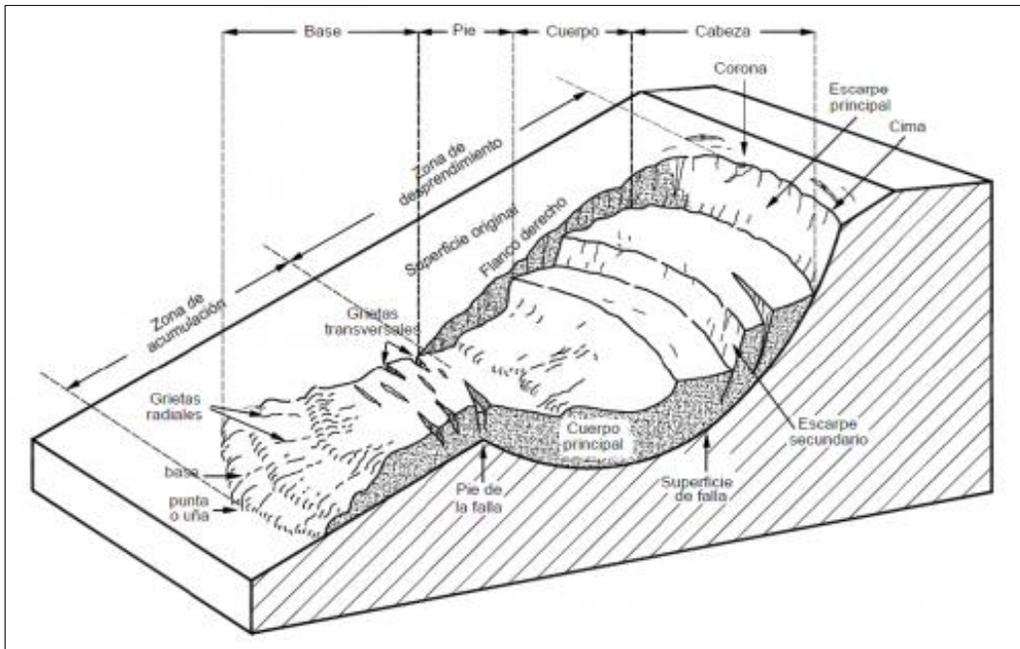


Figura 2. Características de un deslizamiento. Fuente: Varnes (1958).



Figura 3. Deslizamiento superficial antrópico en la parte baja del Pico de Orizaba cercano a los ductos de Pemex, se puede observar que presenta los elementos de un deslizamiento. Fuente: Captura propia.

Causas de los deslizamientos

En los estudios de deslizamientos es sustancial conocer los factores que condicionan la estabilidad de laderas y que generan estos procesos. Crozier, 1986 mencionó que, para entender adecuadamente las causas y desarrollo de la inestabilidad. Los factores pueden deberse a causas geológicas, morfológicas, físicas o antrópicas (Cruden y Varnes, 1996), aunque sólo una suele ser la desencadenante (Varnes, 1958). En algunos casos pueden producirse deslizamientos por la combinación de varios factores, sin que exista una causa desencadenante. Un ejemplo es la meteorización, que paulatinamente produce una disminución de la resistencia a la erosión de la ladera (Wieczorek, 1996).

De acuerdo con Cruden y Varnes (1996), entre las causas geológicas de los deslizamientos están los materiales débiles, sensibles, intemperizados, con fisuras y diaclasas, discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad o planos de inclinación), discontinuidades estructurales (fallas, discordancias o contactos), permeabilidad contrastante o contraste de materiales con diferente plasticidad. Estas causas representan las características fundamentales del material que constituye la ladera. Comprenden la litología, composición mineralógica y textura del material, así como su estructura. En conjunto, determinan el comportamiento geomecánico (Borgatti y Soldati, 2005).

Entre las causas físicas están la precipitación intensa, derretimiento rápido de nieve y hielo, eventos de precipitación extraordinarios, actividad sísmica, erupciones volcánicas, gelifracción, expansión e hidratación de arcillas, e incluso el cambio climático (Cruden y Varnes, 1996). Por su parte, las principales causas morfológicas son los levantamientos tectónicos o volcánicos; la erosión glacial, marina, pluvial, fluvial o subterránea; la remoción de vegetación por incendios o sequías; la energía del relieve; la geometría (altura, longitud y forma); la pendiente y la exposición de la ladera (Cruden y Varnes, 1996).

Entre las causas antrópicas, es decir, aquellas que ocurren por la actividad humana, están las labores mineras y las obras de ingeniería civil, como excavaciones, trazado de caminos, sobrecargas y los cambios de uso de suelo (Ayala et al., 1987).

Entre los diversos factores, se pueden diferenciar principalmente los siguientes:

- **Factores precondicionantes:** son factores estáticos e inherentes en los que no sólo influye el margen de estabilidad, sino que actúan como catalizadores para permitir que otros factores dinámicos desestabilizadores operen con mayor efectividad.

Ejemplos de estos factores precondicionantes son:

a) Geológicos (litológicos)

- Presencia de materiales alterados por el intemperismo.
- Falta de cohesión de los materiales que componen la roca.
- Alternancia de diferente litología.



Figura 4. Deslizamiento en donde se puede observar los diferentes tipos de materiales y la falta de cohesión. Fuente: Captura propia.

b) Geológicos (estructurales)

-Disposición paralela de los planos de estratificación de las rocas respecto de la pendiente.

-Fallas o fracturas.

c) Climáticos

-Responsable directo de la erosión.

-Aporta agua al subsuelo.

-Alternancia de épocas de sequía-lluvia.



Figura 5. Se observa como la erosión está afectando algunos caminos en el área de estudio. Fuente: Captura propia.

d) Hidrológicos

-Aumento de la escorrentía superficial.

-Estancamiento del agua.

-Cambios del nivel freático de las aguas subterráneas.

-Alternancia de estratos de diferente permeabilidad.

e) *Vegetación*

-Ausencia o escasez de vegetación que sujete el terreno.



Figura 6. En la imagen se puede observar la ausencia de vegetación e incluso en línea punteada se señalan algunas grietas de tensión e inestabilidad en el área.

Fuente: Captura propia.

- **Factores desencadenantes:** son aquellos que inician el movimiento y hacen que la ladera llegue a ser inestable.

Ejemplos de estos factores desencadenantes son:

a) *Factores desencadenantes naturales*

- Fuertes precipitaciones.
- Inundaciones.
- Socavamiento (oleaje) y erosión fluvial.
- Erupciones volcánicas.
- Sismos.

-Cambios de volumen.

b) Factores desencadenantes antrópicos

-Aumento de peso de talud (pendiente) por acumulación de escombros y construcciones.

-Excavaciones con retiro de materiales al pie del talud.

-Creación de taludes artificiales.

-Inundaciones causadas por roturas de presas.

-Estancamiento de agua.

-Deforestación de taludes.

-Explosiones realizadas en construcción de carreteras y minas.

Clasificación de los procesos gravitacionales

Existen diferentes procesos gravitacionales y, por lo tanto, se han elaborado diferentes clasificaciones según el tipo de movimiento, el tipo de material, su estado de actividad, velocidad de movimiento y etapa de desarrollo, entre otros elementos (Cruden y Varnes, 1996). Debido a la variedad de clasificaciones, la terminología científica varía entre diversos autores. Hutchinson (1968) los denomina *movimientos de masa*, mientras que Varnes (1958) los llamó *deslizamientos*, pero después prefirió el término *movimiento de pendiente* (1978).

Zaruba y Mencl (1969) basan su clasificación en el carácter de las rocas afectadas y en los tipos de movimientos. Skempton y Hutchinson (1969) toman como principios la fábrica del suelo y la presión de los fluidos en los poros. La clasificación de Crozier (1975) se fundamenta en índices morfométricos y en grupos de procesos. La clasificación europea (EPOCH, 1993) se basa en el movimiento y en los materiales afectados. Finalmente, la clasificación de Brunsden (1993) se fundamenta en los procesos que causan deslizamientos.

Las clasificaciones de Varnes (1978), Hutchinson (1988) y la de Cruden y Varnes (1996) son consideradas unas de las más consistentes. En por eso que en esta investigación se utilizó una clasificación de remociones en masa, definida por movimiento, tipo y material comprometido (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de remociones en masa para ambientes montañosos. Fuente: Adaptado de Varnes (1978); Hauser (1994); en Becerra (2006).

Movimiento	Tipo	Material comprometido
Flujos/Coladas (Flows)	-Barro/Lodo	-Material fino (fluido viscoso), regolito fino y limo arcilla.
	-Detritos	-Derrubios, regolito (suelo), pequeñas rocas, residuos (escombros).
	-Bloques rocosos/rocas	-Derrubios, regolito (suelo), rocas medianas, residuos (escombros).
Deslizamientos (Slide)	-Detritos	-Masa de suelo (regolito), derrubios, pequeños a medianos. bolones de rocas, superficie del manto o lecho rocoso,
	-Detritos /bloques Rocosos	arcillas duras, escombros. - Masa de suelo (regolito), detritos de diferente tamaño, masa del sustrato rocoso (una o más unidades), bolones
	-Bloques rocosos/ rocas	de rocas medianas (derrubios). - Masa del sustrato rocoso (una o más unidades), rodados de rocas medianas (derrubios), detritos medios y regolito, escombros.

Desprendimientos (Falls)	-Caída de rocas	- Unidades individuales de rocas, bloques sanos y desfragmentados.
	-Derrumbes	-Unidades colectivas de rocas, bloques sanos y desfragmentados.
	- Tierras	- Porciones de terreno (suelo/tierra/roca), material fino, regolito fino y limo arcilla, material no consolidado de tamaño muy pequeño.
Complejos (Complex)		- Dos o más tipos de movimientos.

A continuación, se describen los procesos existentes en el área de estudio:

Deslizamientos de suelos (Figura 7): son fallas traslacionales en pendientes compuestas de suelos finos o escombros más gruesos con una matriz fina. Los suelos meteorizados, especialmente derivados de arcilla o lodo, están comúnmente involucrados (Goudie, 2004). Estos deslizamientos consisten en el movimiento por una cizalla próxima a la superficie. El ángulo de deslizamiento está relacionado con el grado y la profundidad de meteorización. Se caracterizan por su desarrollo superficial, con una longitud y anchura mucho mayores que las del material deslizado. En la cabecera presentan una grieta vertical arqueada y se desencadenan con precipitaciones fuertes (Ibsen et al., 1996).



Figura 7. Deslizamiento superficial de suelo en la cuenca de estudio, se puede observar la corona y el escarpe. Fuente: Captura propia.

Deslizamientos de escombros (*debris slide*) (Figura 8): consisten en roturas en material no consolidado, que en su avance se rompen en pequeñas partes (Varnes, 1978). La geometría del deslizamiento se caracteriza por ser poco profunda y tener una elevada relación entre la longitud y la anchura. Su velocidad de recorrido aumenta con la pendiente y disminuye con el contenido de arcilla (Hutchinson, 1988).

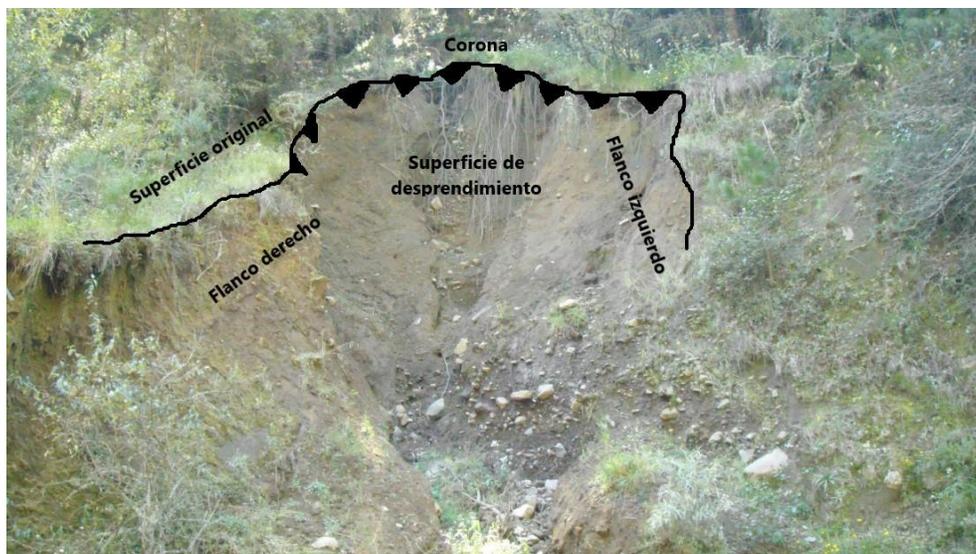


Figura 8. Deslizamiento de escombros en el área de estudio donde se ven algunos elementos como son la corona, los flancos, la superficie de desprendimiento y parte de la superficie original. Fuente: Captura propia.

Flujos de escombros (*debris flow*) (Figura 9): consisten en un tipo de movimiento en masa fluidificada por el agua o aire. El flujo implica mayor deformación interna que en un deslizamiento y los flujos se subdividen en varios tipos, en función del material que afectan: flujos de escombros, flujos de suelos y flujos de rocas. Los movimientos tienen lugar sobre un gran número de pequeñas superficies de cizalla o porque el contenido de agua en la masa es tan alto, que llega a comportarse como un fluido (Bromhead, 1986).



Figura 9. Toma de muestras de suelo en un flujo de escombros en el área de estudio. Fuente: *Captura propia.*

Caída de rocas (*fall rocks*) (Figura 10): consiste en una masa, generalmente de rocas, que se desprende de un talud abrupto, mediante una superficie de corte normalmente pequeña. Los materiales descienden por caída libre si la ladera es subvertical y, cuando el ángulo es menor, las partículas saltan. En las laderas con inclinaciones de 45° las partículas se movilizan rodando. Al impactarse con la ladera, los bloques desprendidos se rompen en fragmentos más pequeños. Los desprendimientos se subdividen en caídas de rocas, detritos y suelos, y la mecánica de todos es muy similar.

Las causas de caída son variadas, pero una de las más importantes es la formación de hielo en las fracturas de las rocas, ya que ensanchan el material y el ciclo de hielo y deshielo fractura las rocas. De acuerdo con Ayala et al. (1987) otra causa de la caída de rocas es que la roca masiva se encuentra encima de una brecha volcánica muy debilitada, la cual no resiste el peso y ocasiona la caída de grandes bloques.



Figura 10. Caída de grandes bloques sobre el cauce del Río El Estado.
Fuente: Captura propia.

Inventario de deslizamientos

Los procesos gravitacionales de un área se pueden expresar a partir de un mapa inventario de deslizamientos que muestra la localización y las áreas de dichos procesos. Un inventario de deslizamientos es un conjunto de datos que son recolectados en trabajo de campo e interpretados en gabinete, el cual representa un solo evento o múltiples eventos. Los mapas inventarios a escala pequeña solo pueden mostrar la localización de dichos procesos, mientras que en los mapas a escala grande se pueden distinguir la fuente de los procesos, el depósito, diferenciar el tipo de proceso y otros datos pertinentes (Cardona y Giraldo, 2016).

Los inventarios de deslizamientos se usan para diferentes cosas, aunque la mayoría de estos se usan para la evaluación de riesgos y generalmente no existe

una guía clara para la elaboración de estos, aunque si existen diferentes trabajos que utilizan diversas metodologías para la elaboración de éstos.

La calidad de los inventarios depende de la precisión y la confiabilidad de la información que se muestra. La precisión depende de la integridad del mapa, la precisión geográfica y verosimilitud temática que se muestra en el inventario (Guzzetti et al., 2012).

La integridad hace referencia al tamaño del proceso más pequeño reportado en un inventario y a la proporción de los procesos que se muestran en el inventario con respecto al número de movimientos reales en el área. La precisión geográfica se refiere a la posición, medidas y forma real del proceso gravitacional. Por último, la verosimilitud temática tiene en cuenta la información secundaria asociada a cada movimiento del inventario, por ejemplo, el tipo de movimiento. (Guzzetti et al., 2012; Tiga, 2013)

Los inventarios se realizan generalmente con fotografías aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales del terreno y trabajo de campo. Con este material a gran escala o con buena resolución se distinguen los deslizamientos y se pueden cartografiar para posteriormente calcular su volumen e incluso elaborar mapas de susceptibilidad.

Los inventarios de deslizamientos deben de contener al menos las siguientes características: fecha, localización, forma, dimensión, factores que intervinieron en su ocurrencia, los factores detonantes, la dinámica del movimiento, la magnitud e intensidad, aunque, no siempre es posible obtener toda esta información (Rodríguez et al., 2007).

Existen diferentes tipos de mapas de inventarios de procesos gravitacionales de acuerdo con su escala y en cómo se representan cartográficamente (Fell et al., 2008; Cardinali et al., 2000; Tiga, 2013).

De acuerdo con el tipo de representación cartográfica, pueden ser clasificados así:

Inventario histórico: Es aquel que muestra los efectos acumulados de varios eventos detonantes a lo largo de un periodo, que puede ser meses, años, centenas o millares de años. (Chacón et al., 2006).

Inventario de un evento detonante: Es aquel que muestra los deslizamientos ocurridos a causa de un único evento detonante, el cual puede ser un terremoto, un evento de lluvia, un deshielo rápido. (Harp & Jibson, 1996; Cardinali et al., 2000).

Inventario de archivo: Aquel que muestra inventarios de movimientos obtenidos a partir de fuentes secundarias, por ejemplo, el periódico, notas periodísticas en internet y la misma comunidad (Cardona, 2016).

Inventario estacional: Aquel que muestra movimientos causados por un único evento o eventos históricos, durante una única estación climática de año. (Tiga, 2013).

Según la escala los inventarios pueden ser clasificados en:

Pequeña escala (>1:200,000): Estos son obtenidos principalmente de fuentes secundarias como entrevistas, organizaciones públicas, consultorías privadas, y relatos técnicos y científicos (Cardona, 2016).

Mediana escala (1:25,000 a 1:200,000): Son elaborados mediante la interpretación sistemáticas de fotografías aéreas y con diferentes escalas de impresión de 1:60000 a 1:10000, integrando verificación de campo e inventarios históricos. Esta escala es útil para zonificación regional. (Fell et al., 2008).

Gran escala (<1:25,000): Son generados para zonificación local y de detalle. (Fell et al., 2008), su elaboración es a partir de interpretación visual de fotografías aéreas en escalas mayores que 1:20,000, imágenes de satélite de alta resolución e investigaciones de campo. (Cardinali et al., 2000).

De acuerdo con la tipología mencionada anteriormente, el inventario que se realizó en este trabajo es un inventario histórico a mediana escala, ya que en él se observan procesos gravitacionales ocurridos en diferentes años y la escala a la que se elaboró fue de 1:35,000.

Metodologías para el cálculo de volúmenes

En los últimos años algunos autores se han dedicado al cálculo de volúmenes con diferentes metodologías. Entre ellas está la ley de potencias, que se encarga de enlazar las medidas de área de las zonas afectadas con los deslizamientos y el volumen desplazado (Legorreta et al., 2014). Guzzetti et al. (2009) mencionan que, para calcular el volumen aproximado de material que aportan los deslizamientos, la metodología usada aplica sólo para algunos de estos procesos. Para estimar el volumen de deslizamientos en la cuenca, la zona de deslizamiento tiene una relación empírica entre el área y el volumen. Éstos se obtienen a través del trabajo de campo y se elabora un inventario de deslizamientos, donde los pequeños se excluyen del análisis basado en una ecuación de ley de potencias.

Anteriormente se mencionó que Jaboyedoff et al. (2020), realizaron una investigación sobre la revisión de métodos utilizados para estimar y caracterizar las superficies de falla por deslizamientos y calcular los volúmenes en función de la información. Mencionan los modelos más sencillos, como la medición de volúmenes basada en elipsoides, la información que se puede obtener del desplazamiento y morfología de la superficie; también se describe un método simple para estimar el volumen de un deslizamiento de rocas utilizando discontinuidades identificadas, entre otros. Dichos métodos se ilustran con ejemplos y se aplican a estudios de caso y se comparan cuando los datos disponibles lo hacen posible.

Otra metodología que se utiliza para el cálculo de volúmenes (Figura 11) es la propuesta por Obando (2009), donde para calcular el volumen aportado por deslizamientos utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen de material (m}^3\text{)} = \text{Ancho (11 m)} \times \text{Largo (137 m)} \times \text{Espesor (7 m)}$$

Y la superficie ocupada por el deslizamiento o flujo se calcula mediante el producto de Ancho (137) x Largo(11) en m².

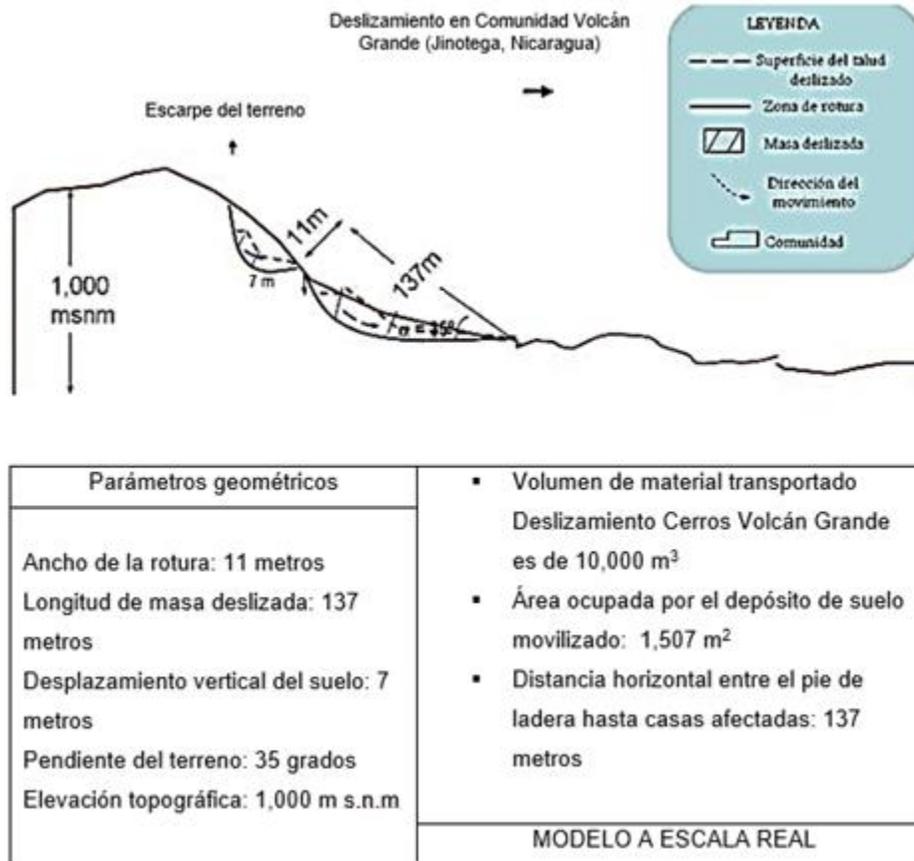


Figura 11. Modelo de deslizamiento, geometría y dimensiones. Fuente: Mora y Varhson, 1991.

Para inventariar los deslizamientos que el huracán Mitch causó en Honduras, Harp et al. (2002) calcularon el área de cada uno de los polígonos de deslizamientos de tierra cartografiados en el mapa topográfico. Dividieron el área entre dos y multiplicaron el resultado por el valor de la profundidad promedio del flujo de escombros del área correspondiente. El método que utilizaron para el cálculo de sedimentos producidos por los deslizamientos sólo permitió calcular a grandes rasgos la magnitud del volumen total de la descarga. Cada uno de los polígonos tuvo un área fuente y un área de depósito. La proporción que existe entre el área fuente y el área de depósito varió de un deslizamiento a otro. Por ejemplo, si el área fuente era muy inclinada, resultaba pequeña comparada con el área de depósito, sobre todo si el material se depositaba sobre un terreno muy plano.

Legorreta et al., (2017), utilizaron una metodología para el cálculo de volúmenes por forma de relieve a partir de un inventario de deslizamientos y posteriormente, calcularon los volúmenes de materiales partiendo del trabajo de gabinete conjugado con trabajo de campo. En el trabajo de gabinete se calculó el área planimétrica de los deslizamientos y en el trabajo de campo con GPS diferencial se calculó el área de los deslizamientos y posteriormente se hizo la aplicación de la relación empírica de leyes de exponentes sobre el inventario de deslizamientos y por forma de relieve para obtener el volumen en kilómetros cúbicos (Figura 12).

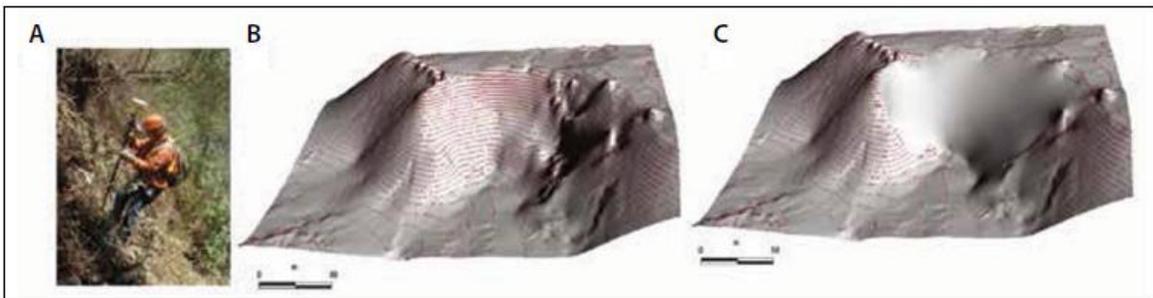


Figura 12. Procedimiento general para el cálculo de los volúmenes de materiales, donde en un principio se procedió a realizar un levantamiento con GPS diferencial y posteriormente se realizaron los modelos digitales de elevación. Fuente: Legorreta et al. (2017).

CAPÍTULO 1. ÁREA DE ESTUDIO

1.1. Localización del área de estudio

El área de estudio es el Río El Estado, localizado en el sistema fluvial de la ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba, dentro de la cuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (Figura 13). Sus coordenadas extremas son 18° 59' 38.34" Latitud Norte-97° 16' 04.38" Longitud Oeste y 18° 55' 27.52" Latitud Norte-97° 15' 05.45" Longitud Oeste. El área marca el límite entre los estados de Puebla y Veracruz y cuenta con una superficie aproximada de 5 km². El área es de forma alargada y estrecha, es una cuenca muy pequeña con un drenaje dendrítico y corrientes de 1 y 2 orden.

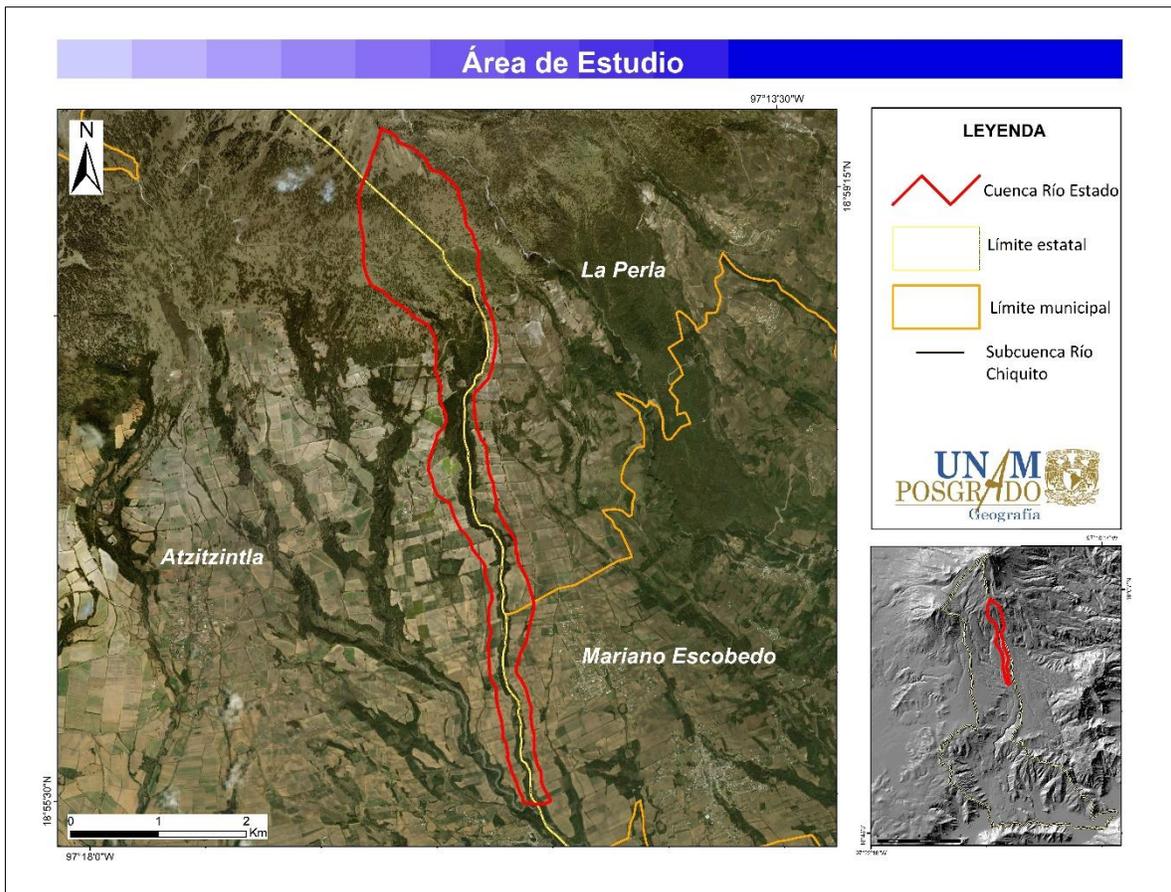


Figura 13. Localización del área de estudio. Fuente: *Elaboración propia con información de INEGI.*

La cuenca se encuentra entre los límites altitudinales de 2,710 a 4,250 m s.n.m., el río mide aproximadamente 10 km de largo, 1.245 km de ancho en la parte alta de la cuenca, 600 metros en la parte media y 300 metros en la parte baja. El Río El Estado se caracteriza por ser afluente del río principal, el Río Chiquito-Barranca del Muerto. Generalmente, el río no presenta flujo hídrico, excepto en épocas de lluvias, por lo que en él se encuentran depósitos acumulados generados por deslizamientos que ocurren frecuentemente. En la Figura 14 (parte baja de la cuenca) se pueden observar al menos tres deslizamientos superficiales, dos en el margen derecho y uno en el margen izquierdo, incluso en un deslizamiento del margen derecho se alcanza a ver parte del depósito, el cual no ha sido arrastrado por la corriente del río.

El área presenta una morfología montañosa con pendientes $>35^\circ$, lo que contrasta con el declive de $<5^\circ$ característico del fondo de los valles fluviales intermontanos, donde existen llanuras aluviales muy pequeñas y dinámicas (Legorreta et al., 2016).

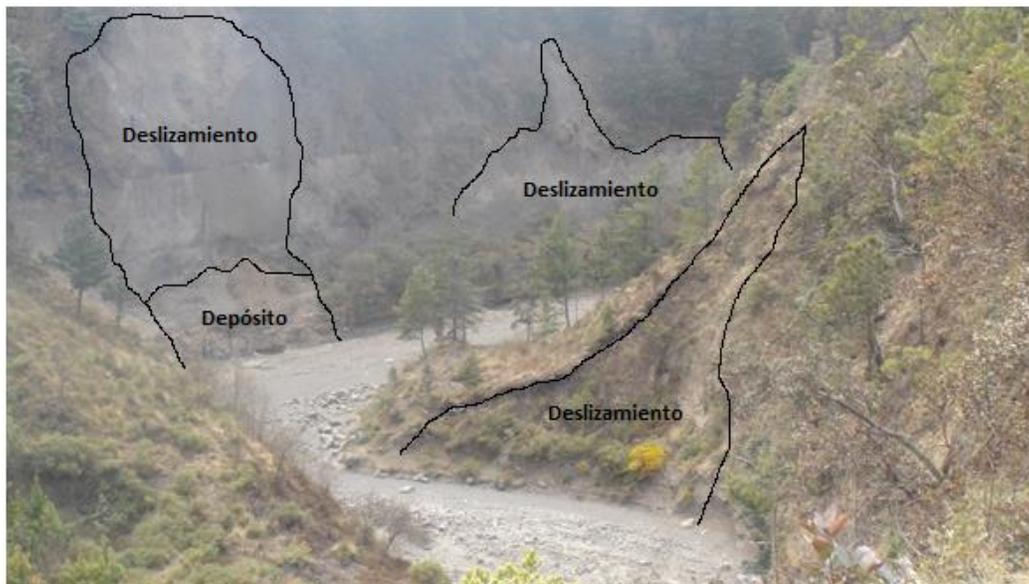


Figura 14. Parte baja del Río El Estado. Fuente: *Captura propia.*

El área es un valle profundo y estrecho (Figura 15), con pendientes fuertes, producto de la erosión fluvial. El cauce es sinuoso debido a la erosión de los

meandros en los materiales volcánicos; dichos meandros y la socavación de los materiales, permiten la formación de fuertes pendientes en los taludes del valle.

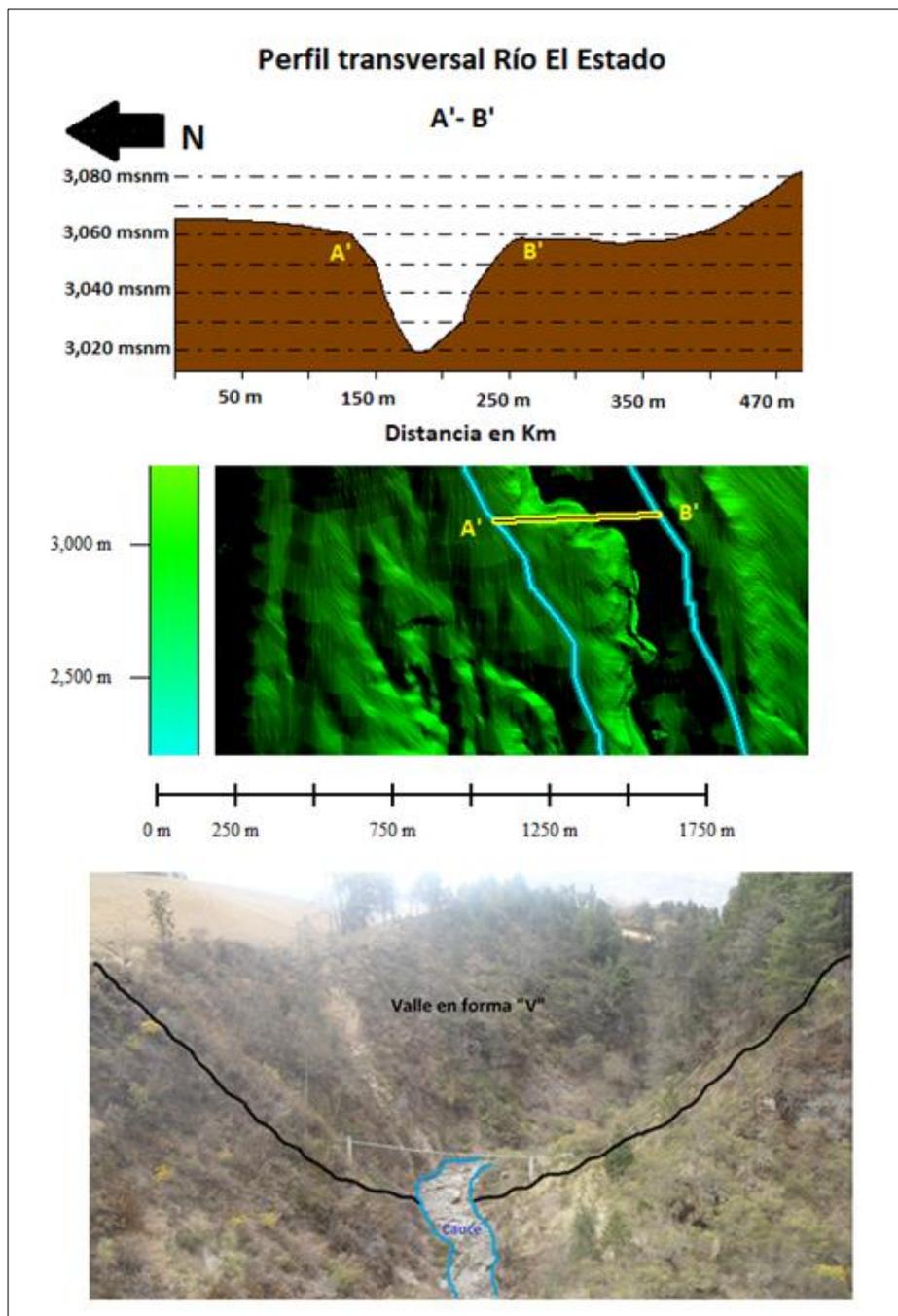


Figura 15. Perfil transversal de la parte baja del Río El Estado. Fuente: *Elaboración y captura propia.*

El perfil topográfico muestra el límite superior (4,250 m.s.n.m) e inferior (2,710 m.s.n.m) de la cuenca. En la Figura 16 se observa un perfil longitudinal de la parte

más alta del área de estudio a la parte media (A-B), en donde se puede observar el aumento de pendiente de forma constante y sin accidentes topográficos en los 3.21 km en línea recta.

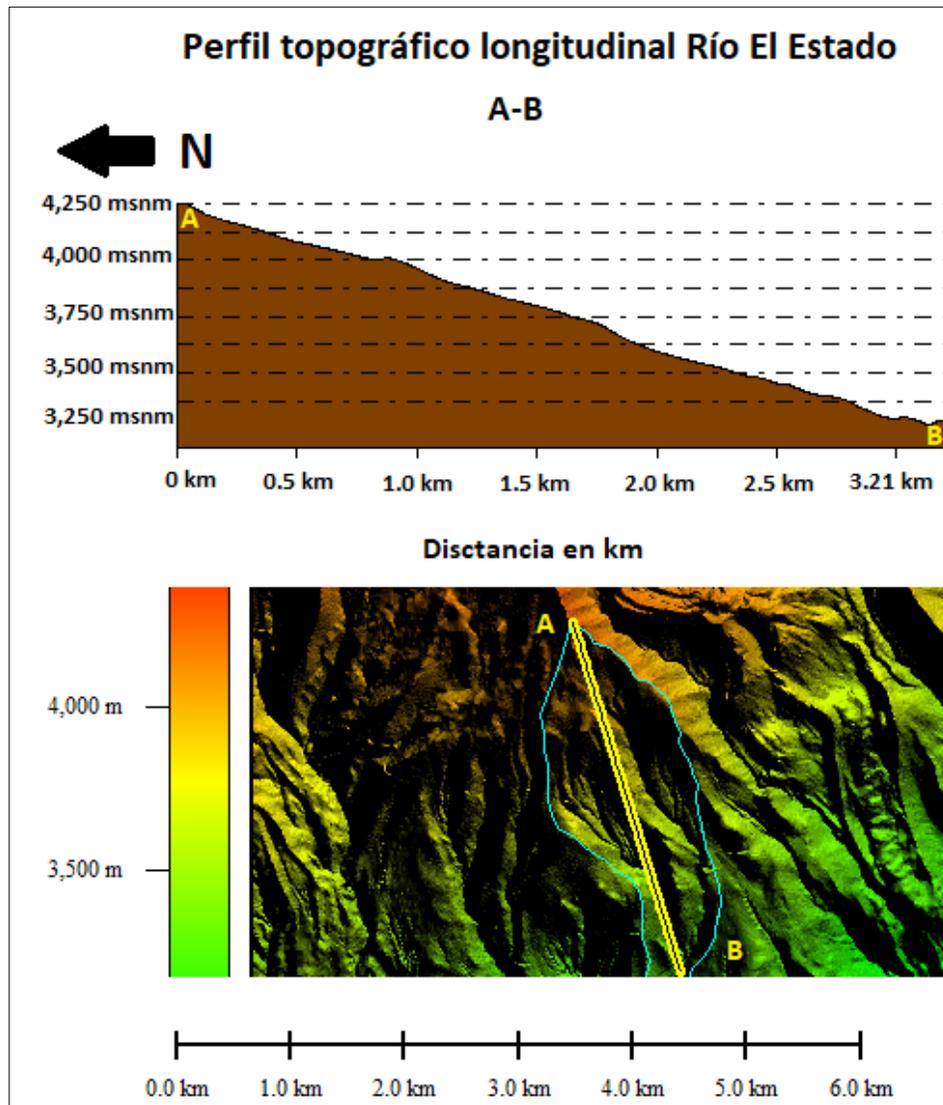


Figura 16. Perfil longitudinal de la parte alta del Río El Estado. Fuente: *Elaboración propia.*

La Figura 17 corresponde al perfil longitudinal de la parte media a la parte más baja del área de estudio (B-C), en donde se observa el cambio de pendiente, las diferencias altimétricas y algunos accidentes topográficos (como caídas de rocas en esos saltos) en los 4.87 km aproximadamente.

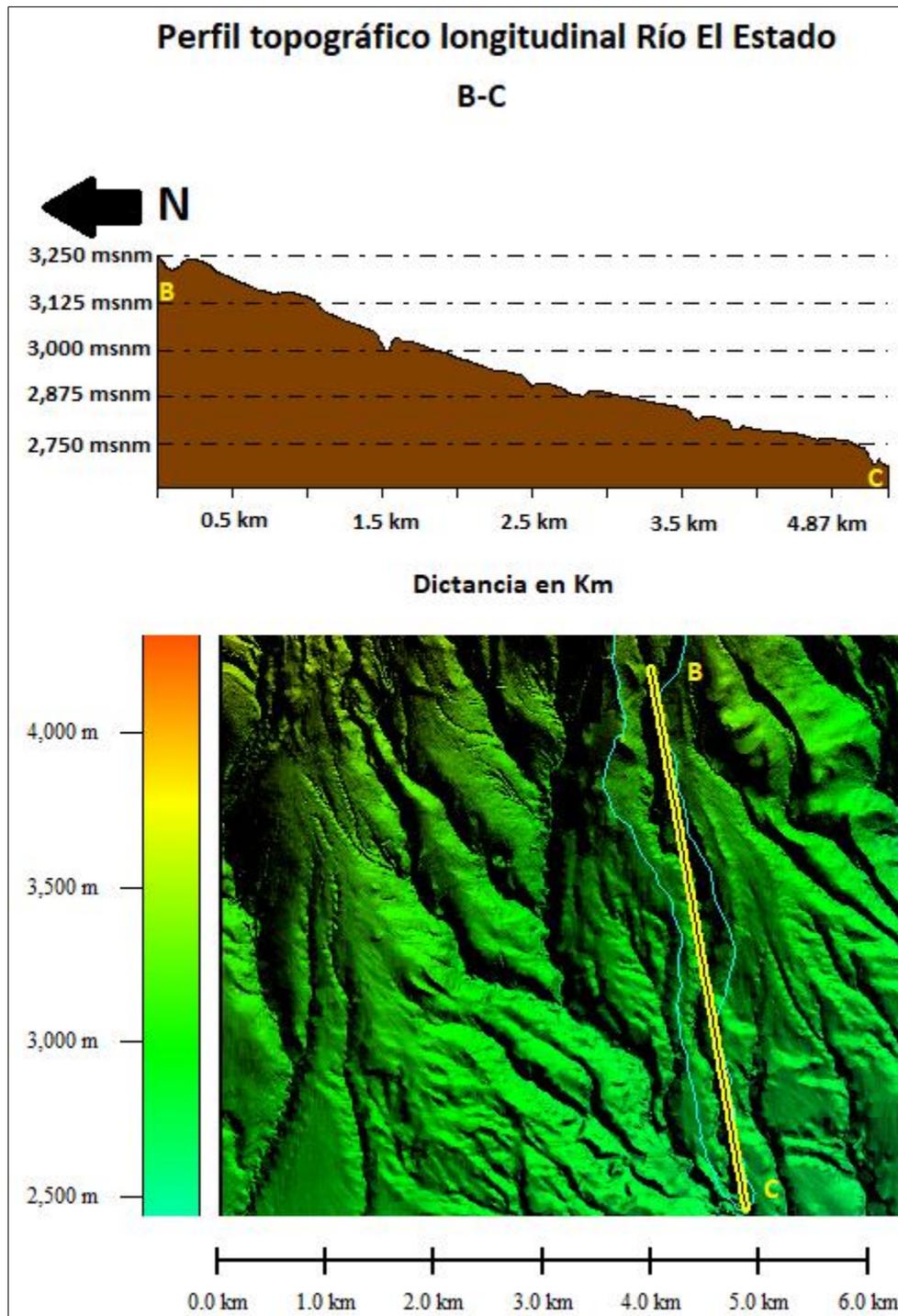


Figura 17. Perfil longitudinal de la parte media y baja del Río El Estado. Fuente:
Elaboración propia.

La cuenca está comprendida en la carta topográfica E14B56A elaborada por el INEGI (1993). La escala es 1:20,000, con equidistancia de 10 metros entre cada curva de nivel donde está representado parcialmente el volcán Pico de Orizaba, la

Sierra Negra y los principales elementos físicos del área. El área de estudio se encuentra entre los municipios de Atzitzintla (Puebla), Mariano Escobedo (Veracruz) y La Perla (Veracruz).

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 realizado por el INEGI, las principales localidades más cercanas al área de estudio son San Juanero (92 habitantes) y Paso de Carretas (1,074 habitantes) las cuales pertenecen al municipio de Atzitzintla. También se encuentra cercana al área la localidad de Texmola (1,581 habitantes) dicha localidad está dentro del municipio Mariano Escobedo.

1.2. Geología y geomorfología

Geología regional

El origen del volcán está en la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico (Figura 18), la cual cuenta con una extensión aproximada de 1,000 km, una anchura de 80 y 230 km, y que presenta una orientación Este-Oeste a lo largo del paralelo 20° Norte. La provincia está formada por más de 8,000 estructuras volcánicas, de las cuales las más grandes y representativas, a parte del Pico de Orizaba, son los estratovolcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, La Malinche, Nevado de Toluca y Cofre de Perote (Demant, 1978).

El Pico de Orizaba es un volcán poligenético Cuaternario, que ha sido formado sobre rocas calizas y lutitas de edad Cretácica (Yáñez García y García-Durán, 1982). De los reportes de actividad histórica, la última importante fue en el año de 1687 (Mooser et al., 1958), aunque existen reportes de erupciones menores en tiempos más recientes (De la Cruz y Carrasco-Núñez, 2002). Actualmente existen escasas señales de actividad moderna, como exhalaciones débiles y poco notables de dióxido de azufre (SO₂) y escasos depósitos de azufre y yeso en las paredes del cráter (Waitz, 1910-1911), por lo que lo consideran un volcán activo en estado latente (Macías, 2005).

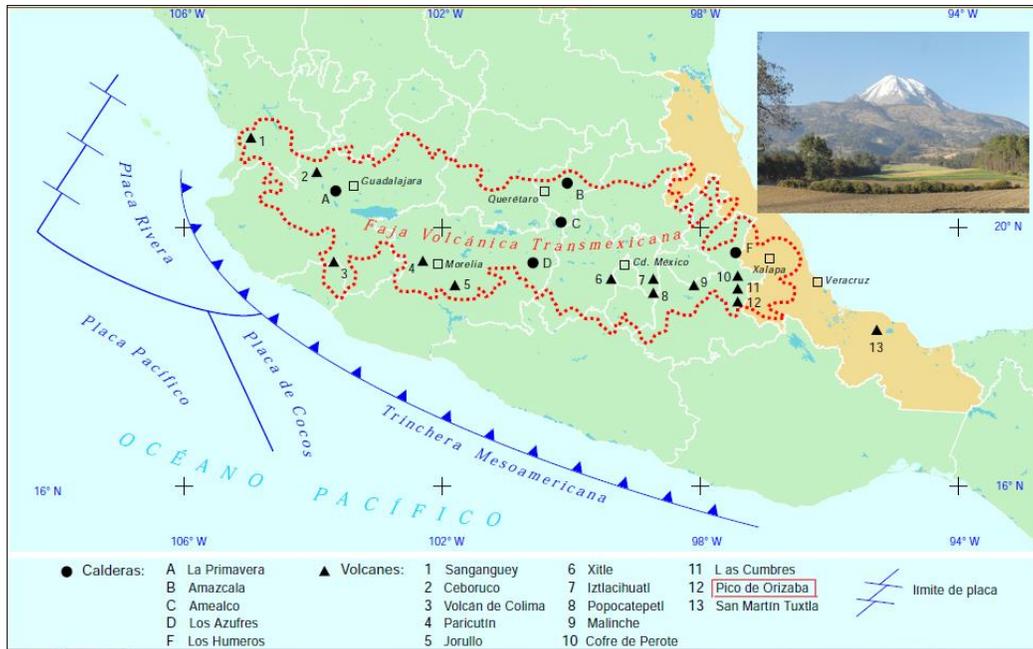


Figura 18. Localización y marco tectónico del Pico de Orizaba. Fuente: Rodríguez Elizarrarás et al., 2010. Tomado del Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz.

Morfológicamente, el edificio actual tiene un cráter central de forma ovalada con un diámetro de 500 m x 400 m y paredes verticales de 300 m de profundidad. Como menciona Heine (citado en Macías, 2005) la parte norte está cubierta por un glaciar. La forma del cono es simétrica con pendientes pronunciadas que alcanzan los 40° (Macías, 2005). La historia eruptiva del volcán ha sido compleja dado que se han reportado indicios de eventos de construcción y destrucción del edificio volcánico.

Macías (2005), recupera los estudios estratigráficos realizados por Carrasco Núñez y Ban (1994) y Carrasco Núñez (2000), en los que concluyeron que la construcción del volcán había ocurrido en cuatro fases eruptivas y no en tres como habían propuesto otros autores. Estas etapas de evolución se denominaron, de la más antigua a la más reciente, (1) cono Torrecillas, (2) cono Espolón de Oro, (3) domos silícicos periféricos y (4) cono Citlatépetl (Figura 19).



Figura 19. Vista del volcán desde la parte sur del área de estudio, en la imagen se pueden observar los restos del cono torrecillas y espolón de oro, así como el cono actual. Fuente: *Captura propia*.

Geología local

El área de estudio se localiza dentro de la subcuenca Río Chiquito-Barranca del Muerto, la cual se formó debido a diferentes etapas geológicas que van desde el Cretácico Inferior con la Formación Orizaba, hasta a principios del Holoceno con los depósitos Cuaternarios de lahares, arenas, tobas, dacitas y andesitas. Dicha cuenca se divide en siete unidades litológicas: en la parte baja de la cuenca se encuentran las unidades más antiguas compuestas por calizas y dolomías del Cretácico Inferior (Kace Cz-Do), por calizas y lutitas del Cretácico Superior (Ktss Cz-Lu) y por depósitos de lahares y arenas del Pleistoceno (Qpt Lh-ar) que han ido sepultando depósitos más antiguos. En la parte media de la cuenca se encuentran derrames basálticos de edad Plioceno-Pleistoceno (TplQptB), tobas andesíticas y andesitas (QptTA-A) y depósitos de lahares y arenas (Qpt Lh-ar) de edad Pleistoceno. En la parte más alta se encuentran andesitas del Plioceno (TplA), depósitos de lahares y arenas del Pleistoceno (Qpt Lh-ar) y dacitas-andesitas (Qptho Da-A) de finales del Pleistoceno e inicios del Holoceno (Figura 20).

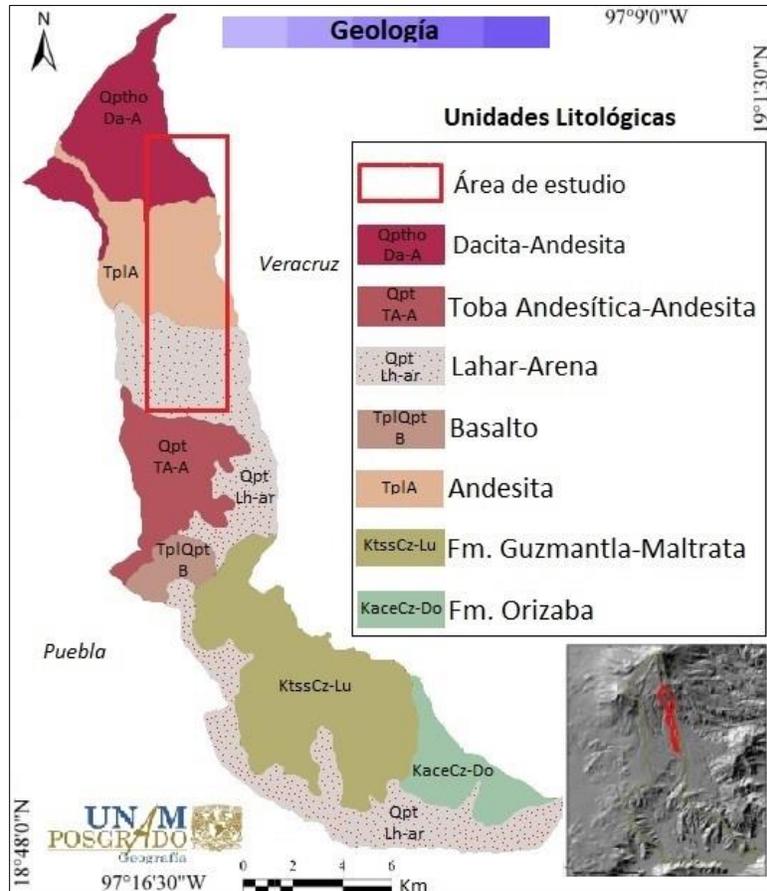


Figura 20. Mapa geológico de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, así como de la subcuenca del Río El Estado. Fuente: SGM, 2001. Elaboración propia.

El área de estudio se encuentra en tres unidades litológicas, mismas que se expresan en la carta Geológico-Minera E14-6 Orizaba a escala 1:250,000 del Servicio Geológico Mexicano, 2001 (Figura 21).

UNIDAD ANDESITA (TpIA)

Este depósito corresponde al Plioceno y es sobre el cual se edifica el Citlaltéptl y evidentemente sobre otras unidades litológicas. Sobre esta unidad se depositan dacitas y andesitas del Pleistoceno y Holoceno, así como lahares y arenas del Pleistoceno (SGM, 2001). Son andesitas de anfíbola con augita y con escasa hiperstena o sin ella, con pasta fundamental más o menos vidriosa (Waitz, 1910). Este depósito también se encuentra en los volcanes La Malinche, Cofre de Perote y Sierra Negra.

UNIDAD LAHAR-ARENA (Qpt Lh-ar)

Dichos depósitos son abundantes y están asociados a diferentes erupciones volcánicas y lluvias discordantes durante el Pleistoceno. En algunos sitios cubren discordantemente a las rocas cretácicas y se encuentran principalmente a lo largo de las barrancas. Se clasifican como depósitos piroclásticos de andesitas, areniscas y conglomerados de diferentes granulometrías (SGM, 2001).

UNIDAD DACITA-ANDESITA (Qptho-Da-A)

Esta unidad se depositó a finales del Pleistoceno y durante el Holoceno provenientes de actividad volcánica efusiva con presencia de dacitas y andesitas con alto contenido de hierro.

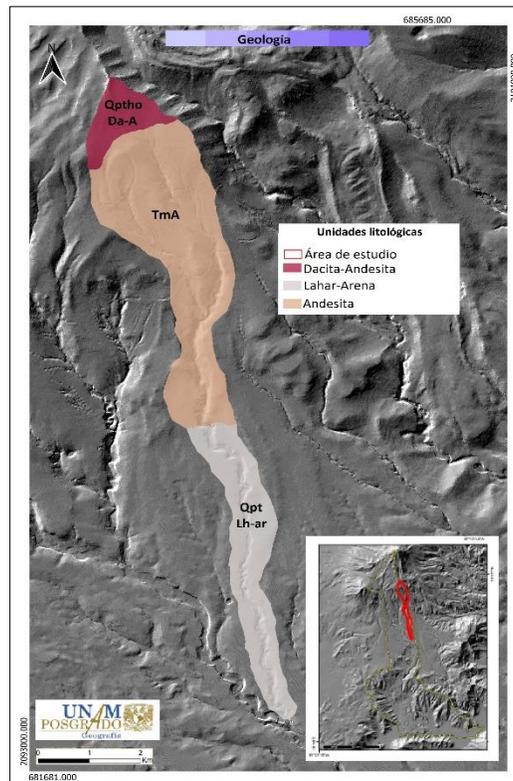


Figura 21. Mapa geológico de la subcuenca del Río El Estado. Fuente: SGM, 2001. Elaboración propia.

Al ser muy pequeña, la cuenca del Río El Estado se puede describir geológicamente como un área montañosa y escarpada, con pendientes de 3° a más de 45°. El cauce del río erosiona el basamento, de origen Cretácico, de calizas y

lutitas que han sido cubiertas por lavas, cenizas, depósitos piroclásticos del Pleistoceno-Holoceno del Cuaternario, así como por aluviones. Es un área afectada por diversos procesos gravitacionales, los cuales se generan por la combinación de diferentes elementos y factores, tales como las condiciones litológicas, las precipitaciones intensas, las temperaturas, el cambio de uso de suelo (como la deforestación y la agricultura principalmente), las pendientes altas y el alto grado de erosión de los materiales (Figura 22).



Figura 22. Características del área de estudio. Fuente: Captura propia.

Geomorfología

La geomorfología es la ciencia que estudia el relieve terrestre y parte de esta investigación es la elaboración de la cartografía geomorfológica que tiene por objetivo representar la morfogenésis del área de estudio y la distribución de los procesos gravitacionales, así como los volúmenes de materiales aportados en las diferentes unidades geomorfológicas.

El área de estudio se clasificó en cuatro unidades del grupo genético endógeno volcánico modelado, una del exógeno erosivo fluvial, una del exógeno erosivo gravitacional y una del exógeno acumulativo gravitacional.

I. RELIEVE ENDÓGENO VOLCÁNICO MODELADO

I.1 Laderas de montaña de dacita y andesita de pendientes medias (12°-25°) del Pleistoceno-Holoceno.

I.2 Laderas de montaña de andesitas de pendientes altas (25°-35° y >35°) del Plioceno.

I.3 Laderas de montaña de andesitas de pendientes medias (12°-25°) del Plesitoceno.

I.4 Laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medias y suaves (12°25° y 9°-12°).

II. RELIEVE EXÓGENO EROSIVO FLUVIAL

II.1 Valles fluviales

III. RELIEVE EXÓGENO EROSIVO GRAVITACIONAL

III.1 Procesos gravitacionales

IV. RELIEVE EXÓGENO ACUMULATIVO GRAVITACIONAL

IV.1 Depósitos gravitacionales

I. RELIEVE ENDÓGENO VOLCÁNICO MODELADO

Este tipo de relieve de origen volcánico esta constituido principalmete por rocas dacitas y andesitas, así como por depósitos de arenas, lahares y materiales de origen piroclástico del Terciario y Cuaternario. Tiene como característica principal la perdida de su morfología original debido a la acción de los procesos exógenos como son la erosión por la escorrentía fluvial y los procesos gravitacionales, así como por procesos antrópicos como la deforestación.

I.1 Laderas de montaña de dacita y andesita de pendientes medias (12°-25°) del Pleistoceno-Holoceno.

Esta unidad se localiza en el extremo norte del área de estudio, su composición litológica es principalmente de dacitas y andesitas de finales del Plesitoceno e inicios del Holoceno; se localiza en el intervalo de altitud de 3,600 a 4,300 m.s.n.m y tienen pendientes de 12° a 25°. Estas laderas representan el 7% de toda el área de estudio, están modeladas por la erosión fluvial, por procesos gravitacionales y por la deforestación. El tipo de vegetación que se encuentra en esta área es de pradera de alta montaña y pinos, aunque se observa que en la mayoría del área de esta unidad no hay presencia de vegetación en las pendientes más altas debido a los procesos erosivos y antrópicos (Figura 23).



Figura 23. Vista de las laderas desde el sur del área de estudio, en la imagen de la izquierda se observa al fondo áreas grandes sin cobertura vegetal y en la imagen de la derecha se observa la misma área en la imagen de satélite. Fuente: Captura propia.

I.2 Laderas de montaña de andesitas de pendientes altas (25°-35° y >35°) del Plioceno.

Esta unidad se localiza al norte de la cucueca y está compuesta principalmente por andesitas del Plioceno. Se encuentra en el intervalo altitudinal 2,900 a 4,300 m.s.n.m y presenta pendientes de fuerte inclinación que van de los 25° a >35° aproximadamente. Estas laderas están disectadas por corrientes fluviales, donde la profundidad de disección es de más de 30 metros en algunos sectores. Esta unidad representa el 35% del área de estudio y en ella se localiza la cabecera del Río El Estado, así como las cabeceras de las corrientes fluviales afluentes. Tiene una red fluvial media de drenaje dendrítico. La mayor densidad de vegetación (bosque de pino) se localiza en las áreas donde se encuentran

las corrientes fluviales y las precipitaciones promedio en dicha área van de 800 a 1000 mm (Figura 24).



Figura 24. Laderas andesíticas de fuerte inclinación. Fuente: *Captura propia.*

I.3 Laderas de montaña de andesitas de pendientes medias (12° - 25°) del Plesitoceno.

Las laderas de esta unidad están constituidas principalmente de andesitas del Pleistoceno y están cubiertas por materiales piroclásticos, los cuales son aprovechados para la agricultura debido a sus propiedades. Esta unidad se extiende aproximadamente desde el norte hasta la parte media del área de estudio, a la altura de la localidad San Juanero. Esta unidad representa el 23% del área total, la mayor parte del área se encuentra en el intervalo de altitud de 2,900 a 3,600 m.s.n.m, mientras que el resto en el intervalo de 3,600 a 4,300 y presentan pendientes que van de 12° a 25° . Las laderas que se localizan al norte se encuentran cubiertas de vegetación original (bosque de pino) y algunas áreas sin presencia de vegetación debido a las pendientes. En lo que se refiere a las laderas que se encuentran en la parte central de la subcuenca, al tener pendientes menos abruptas, son aprovechadas para la agricultura, lo que genera que esta área tenga un alto potencial para que se produzcan procesos gravitacionales, principalmente en las áreas cercanas al río (Figura 25).



Figura 25. Laderas andesíticas de pendiente media, en la imagen se puede observar cómo estas laderas las ocupan para la agricultura. Fuente: Captura propia.

I.4 Laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medias y suaves (12° - 25° y 9° - 12°).

Estas laderas constituidas de arenas y lahares del Pleistoceno se localizan de la parte media del área de estudio; aproximadamente de la localidad San Juanero, hasta el sur de la subcuenca (antes de la localidad Paso de Carretas). Representan el 22.5% del área, se encuentran en el intervalo altitudinal de 2,200 a 3,600 m.s.n.m y presentan pendientes que van desde los 9° hasta los 25° . Estas laderas tienen un potencial moderado para que se produzcan procesos gravitacionales debido principalmente a las pendientes bajas, ya que la mayoría de estas laderas presentan pendientes suaves en donde la vegetación natural ha sido removida para desarrollar actividades agrícolas. En algunas áreas se observan evidencias y rasgos de la generación de procesos gravitacionales (Figura 26). En las laderas con pendientes medias se presentan procesos gravitacionales como deslizamientos superficiales y algunos flujos de escombros. Estas laderas están modeladas fuertemente por procesos antrópicos, así como por procesos erosivos.



Figura 26. Ladera de pendiente suave donde se puede observar la ausencia de vegetación y la línea punteada representa rasgos de inicio de un flujo de escombros Fuente: *Captura propia.*

II. RELIEVE EXÓGENO EROSIVO FLUVIAL

Este tipo de relieve es el resultado de la acción de las corrientes fluviales que al actuar en conjunto con los procesos gravitacionales, se forman los valles. Los valles son una de las formas fluviales más comunes y se dividen en varios tipos: valles estrechos en “V”, valles estrechos en “U”, valles en “V” y “U” (mixtos) y valles anchos con fondo plano.

II.1 Valles fluviales

La mayoría de estos valles son de más de 20 metros de profundidad, presentan una morfología estrecha con fondo en V y laderas abruptas. Representan el 12.5% del área de estudio y se extienden aproximadamente a partir del intervalo altitudinal de 2,200 a 3,600 m.s.n.m y las laderas presentan pendientes de $>25^\circ$. Esta unidad tiene un potencia muy alto para que se generen procesos gravitacionales, de hecho, la mayoría de los procesos gravitacionales identificados en esta investigación, se generaron en las laderas de dichos valles y son los que aportan el mayor volumen de sedimentos (Figura 27).



Figura 27. Valles con profundidad de >20 metros al norte de la localidad Paso de Carretas. Fuente: Captura propia.

III. RELIEVE EXÓGENO EROSIVO GRAVITACIONAL

Este tipo de relieve se expresa como procesos gravitacionales y se da principalmente en las laderas con inclinación de $>12^\circ$ y en donde los materiales están poco consolidados, no hay vegetación y la permeabilidad de los materiales y la infiltración del agua sobre estos.

III.1 Procesos gravitacionales

Los procesos gravitacionales (Figura 28) que se generan en el área de estudio se dan principalmente en los valles fluviales debido a las características litológicas, la ausencia de vegetación, la pendiente, permeabilidad de los materiales y la infiltración del agua. Los procesos que se identificaron en el área de estudios son: deslizamientos, flujos y caídas; y se distribuyen entre la curva de nivel de 2,680 a 3,060 m.s.n.m. Son de diferentes tamaños, desde unos cuantos metros a más de 30 metros de longitud.



Figura 28. Procesos gravitacionales presentes en el área de estudio. A) Flujo de escombros, b) Deslizamiento de suelo, c) Caída de rocas. Fuente: Captura propia.

IV. RELIEVE EXÓGENO ACUMULATIVO GRAVITACIONAL

Este tipo de relieve se refiere a los depósitos generados por los procesos gravitacionales en el área de estudio. Los depósitos no siempre permanecen intactos en la base del proceso, ya que la corriente fluvial en la mayoría de los casos arrastra los sedimentos y pocas veces permanece completo el depósito.

IV.1 Depósitos gravitacionales

Este tipo de depósitos (Figura 29) se encontraron principalmente en la base de la laderas de los valles fluviales y en la mayoría de los casos, el depósito de sedimentos estaba alterado ya que parte de este había sido arrastrado por la corriente fluvial, en otros, sobre dicho depósito empezaba a crecer vegetación. También se encontraron fragmentos de bloques que se habían desprendido por el proceso de caída de rocas. Estos bloques son de diferentes tamaños, desde unos cuantos centímetros hasta varios metros cúbicos.



Figura 29. Depósitos gravitacionales. Fuente: Captura propia.

Tabla 2. Superficie en km² de las unidades geomorfológicas. Fuente: Elaboración propia.

Unidad	Superficie en km ²
Laderas de montaña de andesitas de pendientes altas del Plioceno	1.76837179
Laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medias y suaves	1.12067452
Laderas de montaña de andesitas de pendientes medias del Plesitoceno	1.12685733
Valles fluviales	0.6211691
Laderas de montaña de dacita y andesita de pendientes medias del Pleistoceno-Holoceno	0.36292726

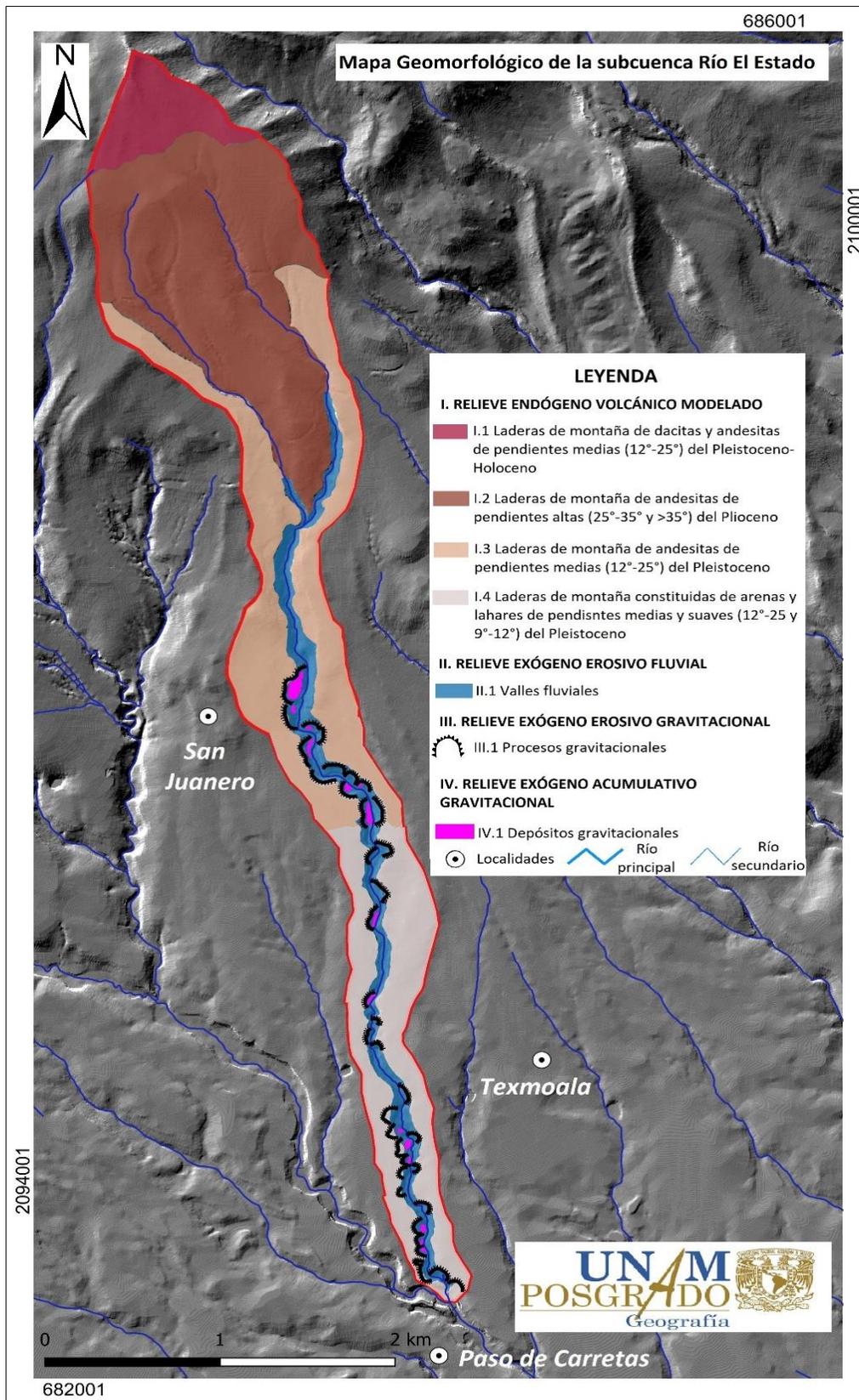


Figura 30. Mapa geomorfológico del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

1.3. Clima

Las características climáticas del área de estudio se basan en el sistema de clasificación mundial de tipos de clima de Vladimir Köppen, modificado por Enriqueta García (2004). Esta modificación representa mejor las características climáticas de México, cuyas pequeñas diferencias en distancias cortas tienen su origen en la altitud, el relieve y la latitud contrastantes en el territorio nacional. En el área existen dos tipos de clima: el templado subhúmedo C(w2) y el semifrío subhúmedo Cb'(w2) (Figura 31).

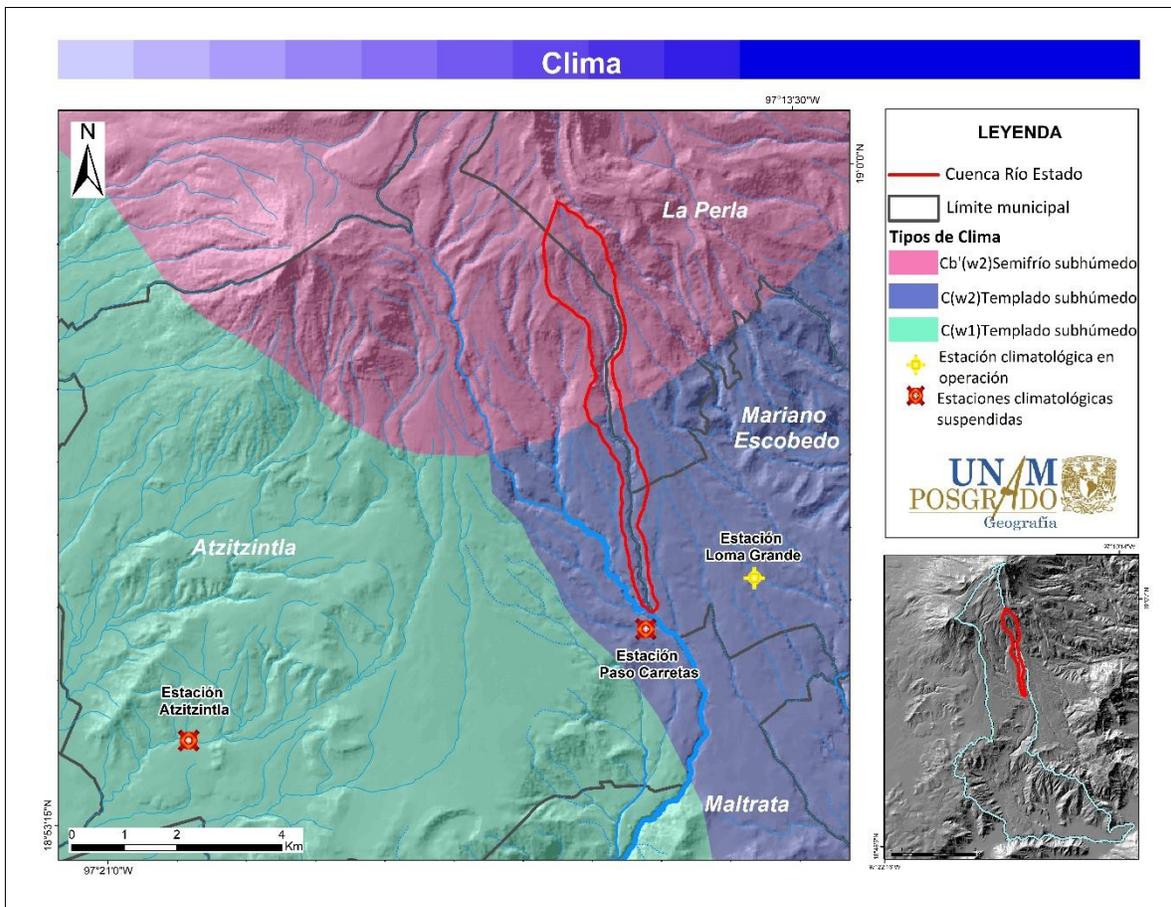


Figura 31. Unidades climáticas del área de estudio y estaciones climatológicas.
Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO (1998).

En la parte sur del área de estudio el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano C'(w2), caracterizado por abarcar grandes áreas de zonas montañosas. En ellas la temperatura y la precipitación, los dos elementos más importantes del clima, cambian en distancias relativamente cortas y producen importantes variantes climáticas en lo referente al grado de humedad. Este clima usualmente presenta temperaturas entre 12°C y 18°C. En el mes más frío registra temperaturas de entre 3°C y -18°C, mientras que la temperatura en el mes más caliente es menor a 22°C. En el mes más seco, la precipitación es menor de 40 mm, con lluvias de verano y un índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (García, 2004).

El clima Cb'(w2) semifrío subhúmedo es representativo de las altitudes superiores a 2,500 m s.n.m. y se localiza, aproximadamente, de la localidad San Juanero hacia el norte del área. Presenta un verano fresco y largo, con una temperatura media anual que oscila entre 5°C y 12°C. La temperatura del mes más frío varía entre -3°C y 18°C, mientras que la temperatura del mes más caliente está por debajo de los 22°C y se registran menos de 4 meses con temperaturas mayores a 10°C. La precipitación anual es de entre 200 y 1,800 mm, mientras que en el mes más seco es menor a 40 mm y la presencia de lluvias en verano es de 5% a 10.2% anual (García, 2004).

De acuerdo con la Información Estadística Climatológica de Comisión Nacional del Agua (2020), las estaciones climatológicas más cercanas al área de estudio son: 21158-Paso Carretas, 30486-Loma Grande y 21161-Atzitzintla. Los registros en las tres estaciones son muy escasos e intermitentes, con menos de 25 años de datos efectivos, por lo que hacer un análisis completo de la precipitación y la temperatura no es del todo posible; a pesar de eso, se muestran algunos datos disponibles con registros mayores de 10 años para representar las condiciones climatológicas del área de estudio.

Sobre la estación 21158-Paso de Carretas (Tabla 3) se sabe que operó desde el 1 de noviembre de 1978 hasta el 31 de mayo de 1980 y del 1 de enero de 2011 hasta el 31 de agosto de 2019. Dicha estación se ubica a 0.12 km de distancia del

área de estudio, está dentro del municipio de Atzitzintla, Puebla y se encuentra a una altitud de 2,887 m.s.n.m.

De los años que estuvo en operación no se tienen registros de todos los meses, por lo que es imposible hacer un análisis detallado de la información, pero existe un inventario de registros por década año elaborado por la Comisión Nacional del Agua (2020).

Tabla 3. Estación climatológica Paso de Carretas. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Estación 21158	
Nombre	Paso Carretas
Estado	Puebla
Municipio	Atzitzintla
Cuenca	Río Papaloapan
Latitud °	18.9203
Longitud °	-97.2525
Altura (msnm)	2,887
Situación	Suspendida
Datos desde	1 de noviembre de 1978
Hasta	31 de agosto de 2019

De dicha estación se cuenta con registros mayores a 10 años, lo que permitió el cálculo valores promedio de elementos meteorológicos como precipitación y temperatura. En la Tabla 4, se encuentran los registros de precipitación y temperatura de 12 años interrumpidos. Se puede observar que dichos registros son casi iguales en los diferentes años tanto en precipitación como en temperatura.

Tabla 4. Inventario de Registros por Década de Año. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Estación 21158-Paso Carretas					
Década	Año	Lluvia	mínima	máxima	Temperatura ambiente
1970	1978	54	54	54	54
	1979	273	273	273	273
	1980	121	121	121	121
	Total 1970	448	448	448	448

2010	2011	363	365	364	365
	2012	366	366	365	366
	2013	365	365	365	365
	2014	365	365	365	365
	2015	365	364	365	364
	2016	366	366	366	366
	2017	361	361	361	361
	2018	348	349	348	349
	2019	224	225	224	225
	Total 2010	3,123	3,126	3,123	3,126
Total general	3,571	3,574	3,571	3,574	

En la Figura 32 se observan los valores (mínimo, máximo y promedio) de precipitación en mm y se observa que el mes que registró mayor precipitación es agosto (177 mm), seguido de julio (91 mm), septiembre (81 mm), junio (76 mm) y octubre (62 mm).

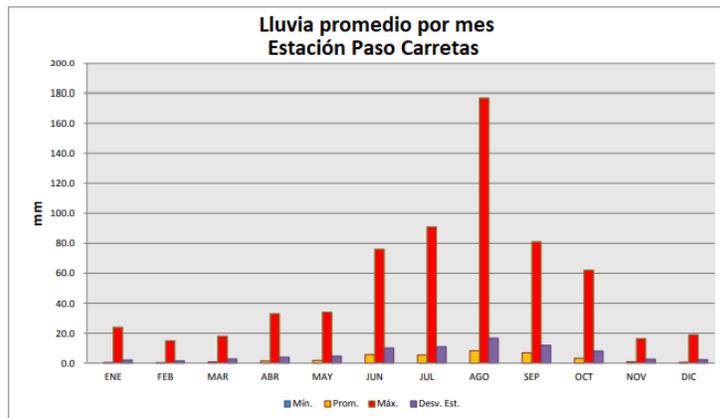


Figura 32. Precipitación mensual de la estación climatológica Paso Carretas. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

En lo que se refiere a la temperatura, la mínima registrada es en el mes de marzo con -5°C , mientras que la máxima se registró en el mes de diciembre y marzo con 40°C y 36°C respectivamente (Figura 33).

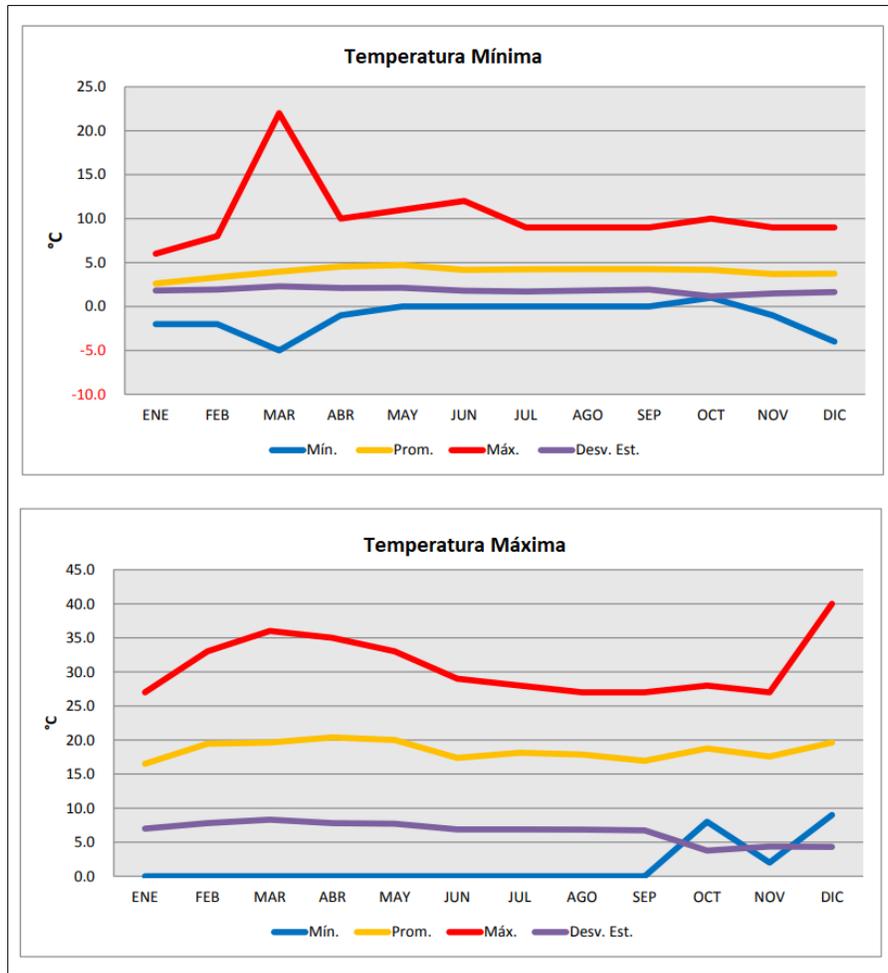


Figura 33. Temperatura mínima y máxima mensual de la estación climatológica Paso Carretas. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

De la estación 30486-Loma Grande (Tabla 5), existen únicamente registros interrumpidos del 1 enero de 2009 al 31 de diciembre de 2015 y del 01 de enero de 2018 al 31 de diciembre de 2018, dicha estación se encuentra actualmente operando. Se ubica a 1.61 km de distancia del área de estudio, está dentro del municipio Mariano Escobedo, Veracruz y se encuentra a una altitud de 2,040 m.s.n.m.

Tabla 5. Estación climatológica Loma Grande. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Estación 30486	
Nombre	Loma Grande
Estado	Veracruz
Municipio	Mariano Escobedo
Cuenca	Río Papaloapan
Latitud °	18.9289
Longitud °	-97.2328
Altura (msnm)	2,040
Situación	Operando
Datos desde	1 de enero de 2009
Hasta	31 de diciembre de 2015 y 31 de diciembre de 2018

En la Figura 34 se muestran los registros de precipitación en mm por mes de la estación Loma Grande, en dicha gráfica se observa que el mes que registró más lluvia es septiembre (200 mm), seguido de mayo (127 mm), julio (109 mm), junio (84 mm), agosto (81 mm) y octubre (29 mm).

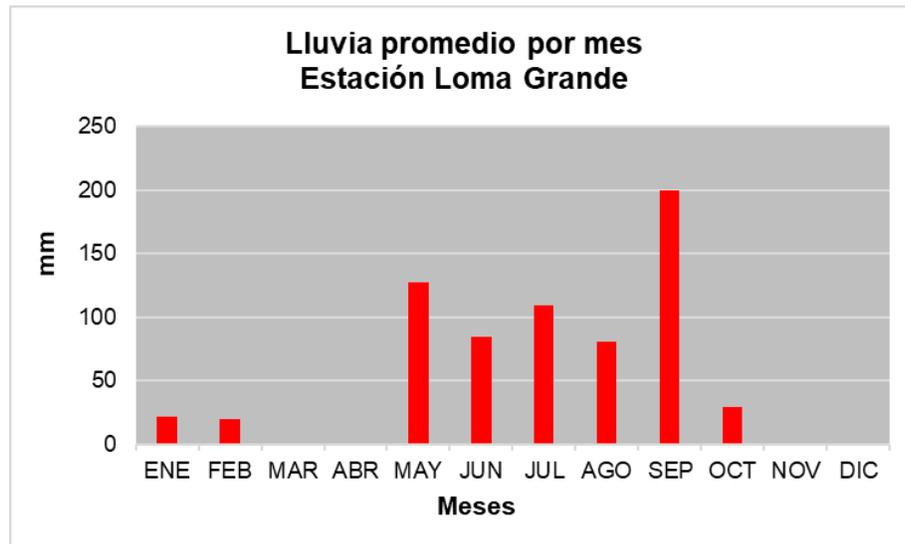


Figura 34. Precipitación mensual de la estación climatológica Loma Grande. Fuente: *Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional del Agua, 2020.*

La temperatura mínima y máxima registrada en la estación Loma Grande es de 4.3°C en el mes de febrero y 26.7°C en el mes de abril (Figura 35).

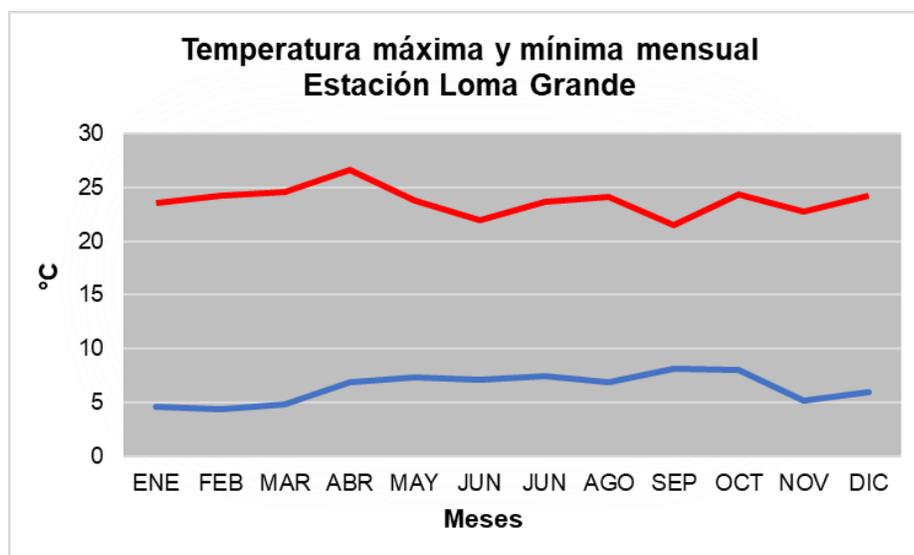


Figura 35. Temperatura mínima y máxima mensual de la estación climatológica Paso Carretas. Fuente: *Elaboración propia con datos de la Comisión Nacional del Agua, 2020.*

En lo que se refiere a la estación 21161-Atzitzintla (Tabla 6), según los registros se sabe que operó del 1 de enero de 1978 al 31 de diciembre de 1990, únicamente se cuenta con los registros por década año. Esta estación se ubica a 8.90 km de distancia del área de estudio, se encuentra dentro del municipio Atzitzintla, Puebla y está a una altitud de 2,645 m.s.n.m.

Tabla 6. Estación climatológica Atzitzintla. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Estación 21161	
Nombre	Atzitzintla
Estado	Puebla
Municipio	Atzitzintla
Cuenca	Río Papaloapan
Latitud °	18.9019
Longitud °	-97.3353

Altura (msnm)	2,645
Situación	Suspendida
Datos desde	1 de noviembre de 1978
Hasta	31 de diciembre de 1990

De dicha estación se cuenta con registros mayores a 10 años, lo que permitió el cálculo de valores medios de elementos meteorológicos como precipitación, humedad, temperatura, evaporación etc. En la Tabla 7, se encuentran los registros de precipitación y temperatura de 10 años, 7 años consecutivos de 1978 a 1984 y posteriormente, de 1988 a 1990. Se puede observar que dichos registros son similares en los diferentes años tanto en precipitación como en temperatura.

Tabla 7. Inventario de Registros por Década de Año. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Estación 21161-Atzitzintla					
Década	Año	Lluvia	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Temperatura ambiente
1970	1978	54	54	54	54
	1979	365	365	365	365
	1980	366	366	366	366
	Total 1970	785	785	785	785
1980	1981	315	314	314	314
	1982	334	334	334	334
	1983	365	365	365	365
	1984	335	335	335	335
	1988	92	92	92	92
	1989	212	212	212	212
	1990	334	334	334	334
Total 1980	1,987	1,986	1,986	1,986	
Total general		2,772	2,771	2,771	2,771

En la siguiente gráfica (Figura 36) se observan los valores (mínimo, máximo y promedio) de precipitación en mm y se observa que el mes que registró mayor

precipitación es septiembre (45.6 mm), seguido de junio (40.6 mm), julio (40.5 mm), mayo (34 mm), enero (34 mm), abril (31 mm) y febrero (39 mm).

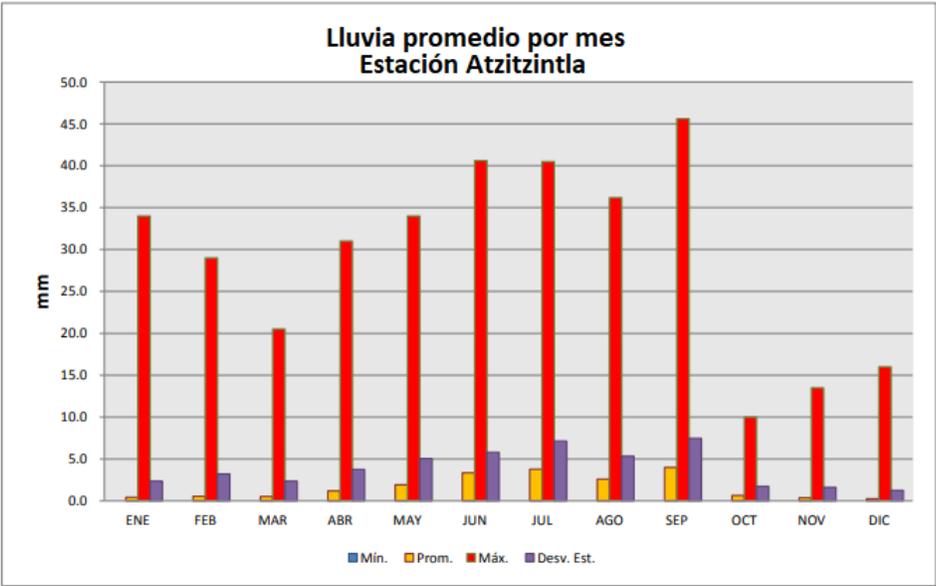


Figura 36. Precipitación anual de la estación climatológica Atzitzintla. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

Los registros de temperatura en la estación Atzitzintla son de -6.5°C en diciembre, seguido de -6.0°C en noviembre, -2.5°C en enero y -1.5°C en febrero. Mientras que la temperatura máxima se registró en el mes de mayo (31°C), seguido enero y febrero (30°C), marzo (29.5°C), Abril (29°C), junio (28°C) y diciembre (27°C) (Figura 37).

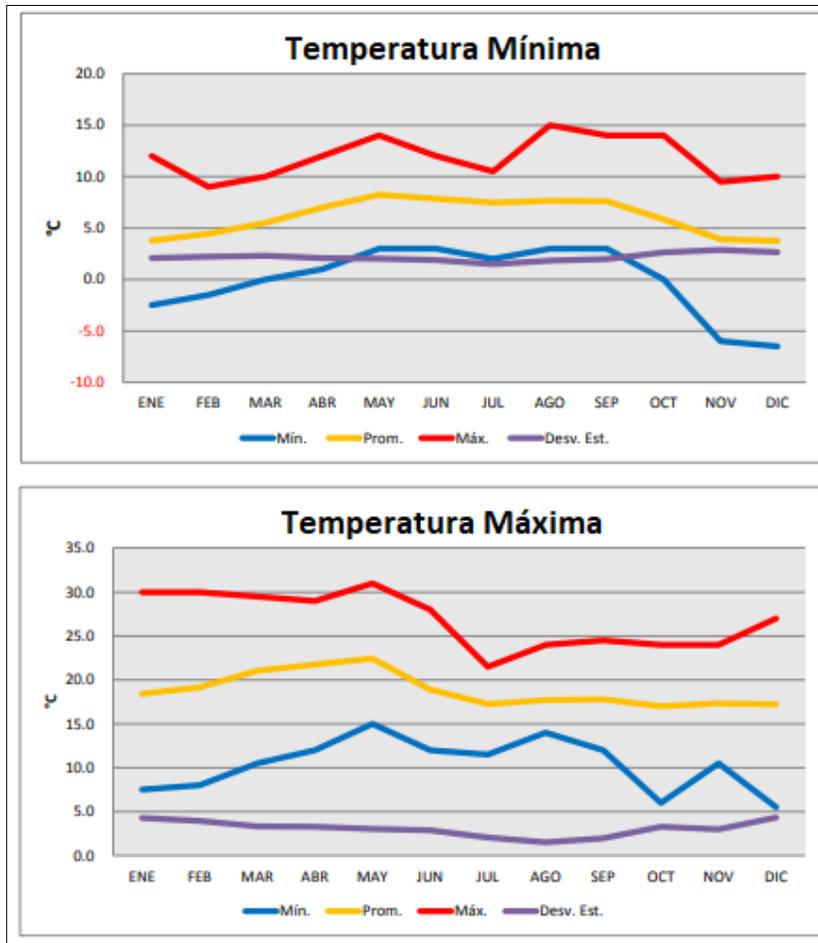


Figura 37. Temperatura mínima y máxima mensual de la estación climatológica Atzitzintla. Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2020.

De acuerdo con la información anterior, se infiere que las lluvias importantes se presentaron en sitios próximos a las estaciones climatológicas, lo cual permitió que se registraran los valores en dichas estaciones y con estos datos, se conocieran las características climáticas generales del área de estudio.

De acuerdo con García. E (1998) y los datos de CONABIO (2008), en la Figura 38 se representa la precipitación total del área de estudio, que va de 800 a 1,000 mm anuales.

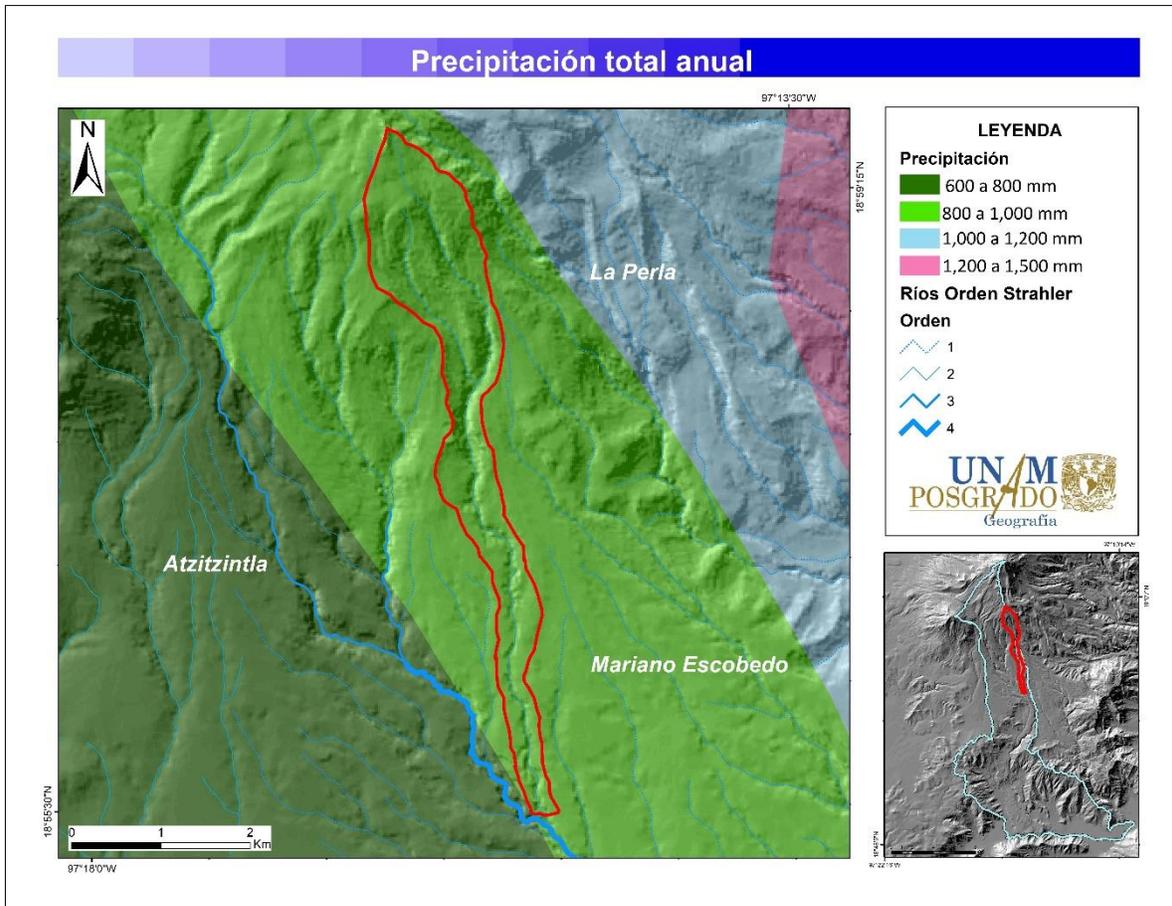


Figura 38. Precipitación total anual del área de estudio. Fuente: *Elaboración propia con datos CONABIO (2008).*

1.4. Edafología

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, en la cual la vegetación y las actividades humanas encuentran soporte. Asimismo, está relacionado con los procesos gravitacionales, por lo que es necesario conocer las unidades edafológicas del área de estudio. Ésta presenta dos tipos de suelo: andosol ócrico y regosol éútrico (Figura 39).

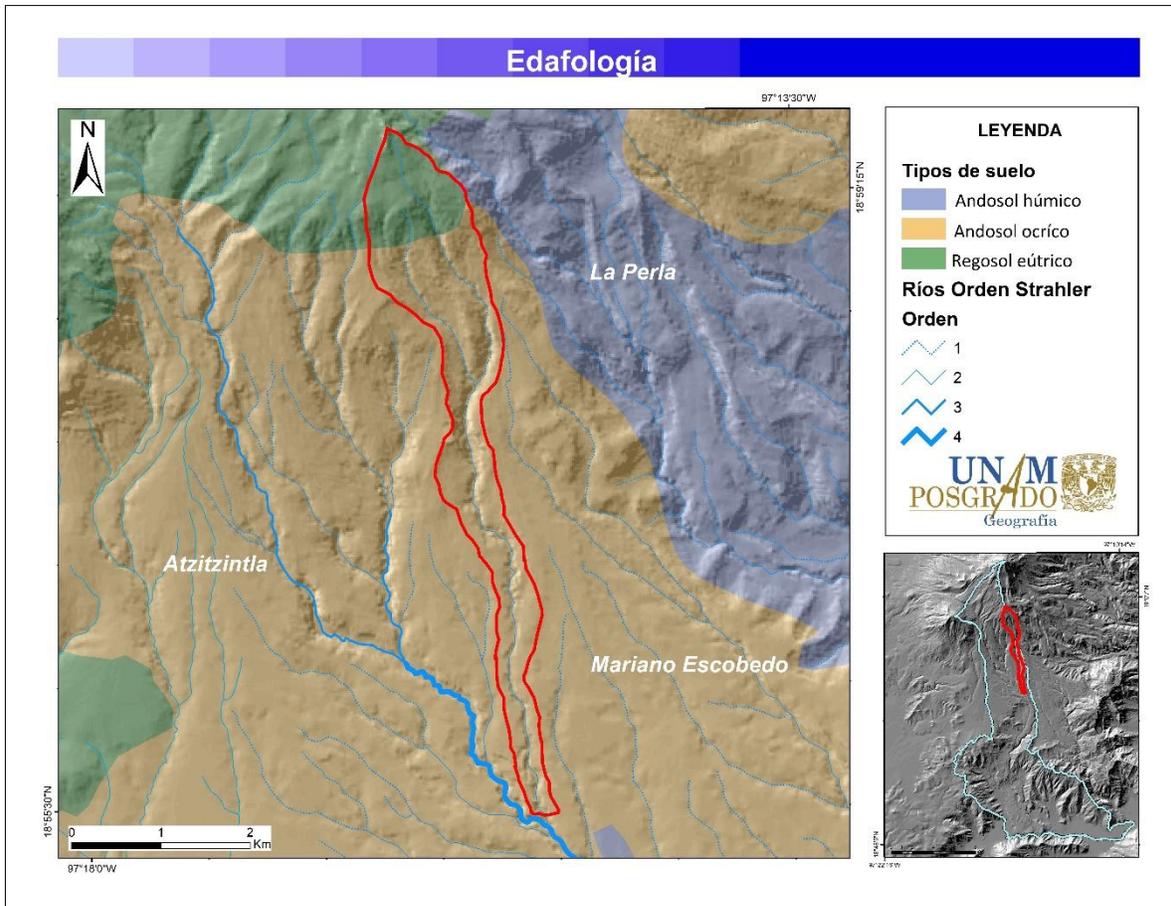


Figura 39. Principales suelos en el área de estudio. Fuente: *Elaboración propia con datos de CONABIO (2008), INIFAP (1995) e INEGI (2004).*

Andosol ócrico: el andosol es una unidad de suelo de origen volcánico, se constituye de ceniza con alto contenido de alófono, que le da ligereza y untuosidad. Este tipo de suelo es de color oscuro, tiene una alta capacidad de retención de humedad y el tipo de vegetación que se desarrolla es boscosa. La vegetación presenta bajos rendimientos agrícolas porque el suelo retiene considerablemente el fósforo, que no puede ser absorbido por las plantas. Tiene un uso pecuario, pero el uso más favorable para su conservación es el forestal (INEGI, 2004). En el área de estudio se presenta con una subunidad de suelo ócrico, que es exclusiva de los andosoles, indicada por la presencia de una capa de color claro y pobre en materia orgánica. Esta subunidad de suelo es muy susceptible a la erosión eólica (Figura 40) (INEGI, 2004).



Figura 40. Andosol ócrico presente en la porción sur de la cuenca, se puede observar el color café y la textura arenosa del suelo. Fuente: Captura propia.

Regosol eútrico: el regosol es una unidad de suelo muy poco desarrollada, por lo que no presenta capas tan diferenciadas entre sí. Este tipo de suelo es claro y pobre en materia orgánica, ya que se parece a la roca que le da origen. Se asocia con los litosoles y afloramientos de roca o tepetate. Es un suelo somero, de fertilidad variable, y productividad condicionada por la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2004). En el área de estudio se presenta con una subunidad de suelo eútrico, que es un subtipo de suelo ácido a alcalino (INEGI, 2004). Se encuentra al norte del área de estudio en una proporción menor a la del andosol.

1.5. Hidrografía

De acuerdo con la CONAGUA (2019), el área de estudio (subcuenca del Río El Estado) se localiza dentro de la Región Hidrológica 28 Papaloapan, la cual tiene una extensión territorial continental de 57, 355 km²; específicamente está dentro de la subcuenca del Río Chiquito Barranca del Muerto (Figura 41a).

La subcuenca del Río Chiquito Barranca del Muerto se localiza en el interior de la cuenca hidrológica del Río Blanco, la cual forma parte de la Región Papaloapan. La cuenca del Río Blanco tiene un área de 2,922 km² desde su nacimiento hasta su desembocadura con la Laguna de Alvarado y tiene un volumen disponible de 2,055.052 hm³. CONAGUA, (2018).

El Río El Estado, llamado así por ser el límite entre los estados de Puebla y Veracruz, se origina aproximadamente a 4,250 m s.n.m., en la ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba. Es una subcuenca de aproximadamente 5 km², desciende en un trayecto aproximado de 10 km hasta unirse con el Río Chiquito a una altitud de 2,710 m s.n.m. Presenta una red hidrológica con cauces intermitentes alimentada principalmente en época de lluvias y desemboca en el Golfo de México.

Su drenaje es de tipo dendrítico subparalelo, conformado por corrientes intermitentes y un orden de corrientes de 1 y 2, y el orden final de la cuenca es del segundo orden. Las pendientes en el cauce van de 12° a 45°, con paredes de 10 a más de 20 metros de altura y con un ancho que varía a lo largo del cauce de entre 6 a 15 metros aproximadamente (Figura 41b).

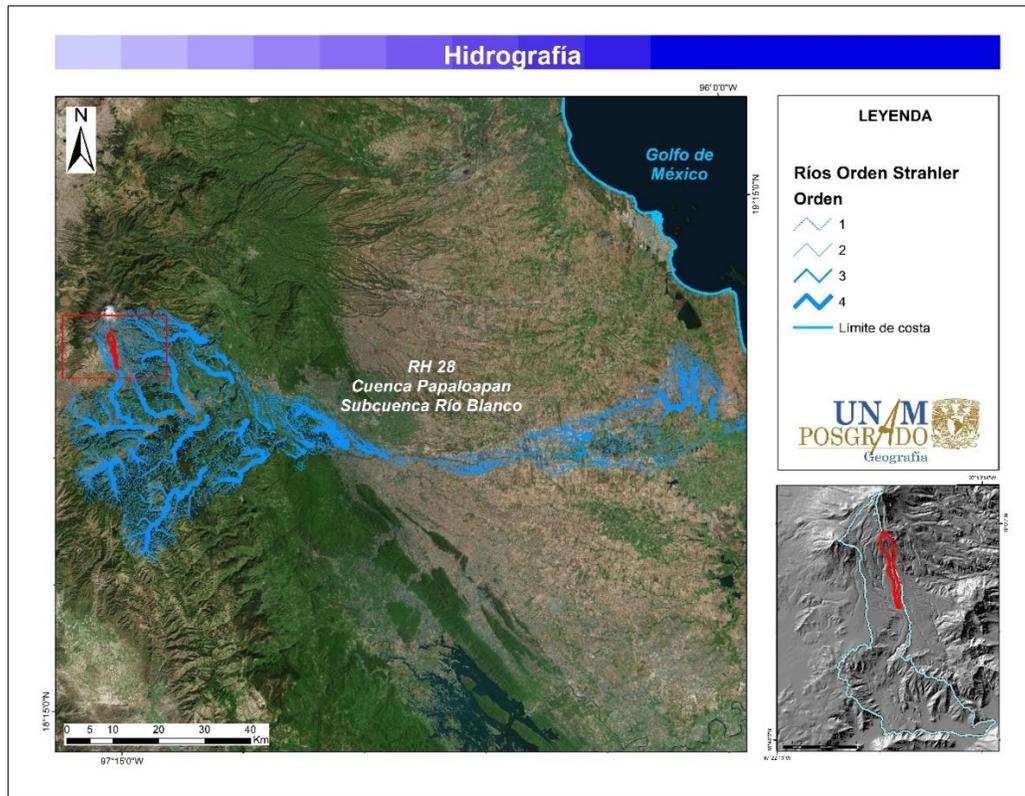


Figura 41a. Mapa hidrológico de la cuenca del Río El Estado y subcuenca del Río Blanco perteneciente a la Región Hidrológica 28. Fuente: *Elaboración propia con datos de CONAGUA (1998) e INEGI (2010).*



Figura 41b. Parte baja del área de estudio, específicamente en la intersección del Río El Estado con el Río Chiquito. Fuente: Captura propia.

1.6. Vegetación y uso de suelo

Para la identificación de estos elementos se utilizó la carta E1406 Uso del Suelo y Vegetación serie VI a escala 1:250,000 del INEGI (2017). Ésta presenta la información de áreas agrícolas clasificadas de acuerdo con la forma en la que los cultivos reciben agua, por su ciclo agrícola, la distribución de la cubierta vegetal en su estado original y en sus fases sucesionales. La carta presenta información de la vegetación inducida de acuerdo con el sistema de clasificación de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI.

En el área de estudio se localizan tres tipos de uso de suelo: bosque de pino, el cual ocupa la mayor superficie; agricultura de temporal anual la cual se localiza al sur del área; y la pradera de alta montaña, que ocupa una menor proporción en superficie y se localiza al norte de la cuenca (Figura 42).

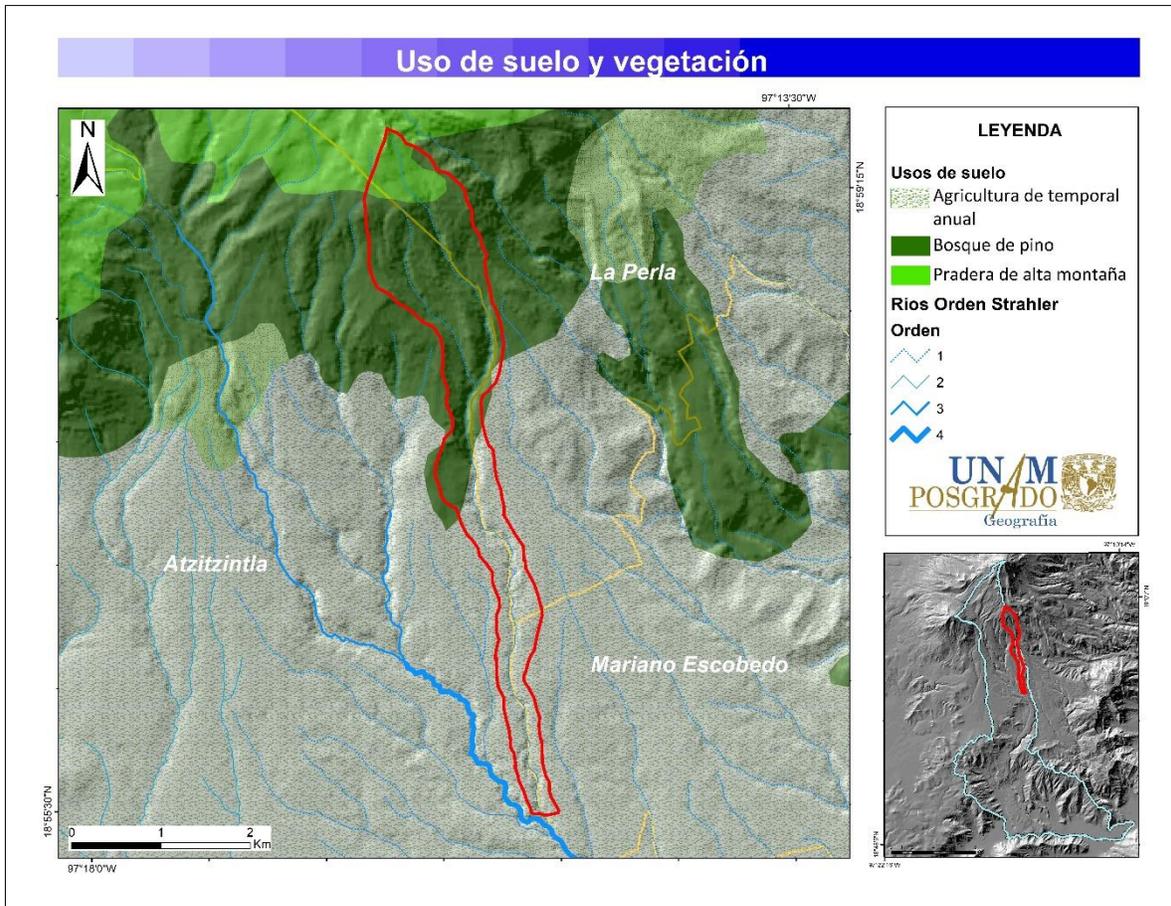


Figura 42. Distribución de los tipos de vegetación y uso de suelo en la cuenca Río El Estado. Fuente: Elaboración propia con datos de CONABIO e INEGI.

Bosque de pino: la especie de pino *Pinus hartweggi lindl*, mejor conocida como pino de las alturas, es la única en México que se encuentra en el límite de la vegetación arbórea, a una altitud de alrededor 2,800 a 4,200 m s.n.m. Los pinos (Figura 43a) son arboles monoicos que alcanzan alturas de 20m a 30 m y más de 100 cm de diámetro, tienen copa redondeada con ramas horizontales o ligeramente ascendentes. La corteza en árboles maduros es de color café rojizo, gruesa y dividida por fisuras horizontales y verticales en placas grandes y escamosas (Palma, 2010). Ocupa una superficie de 2.7 km².



Figura 43a. Bosque de pinos en la parte media del área de estudio. *Fuente: Captura propia.*

Agricultura de temporal: la agricultura de temporal es aquella en la que el ser humano no contribuye con agua. Únicamente se utiliza el agua proveniente de la precipitación y así los cultivos dependen de las lluvias. Generalmente estos cultivos se desarrollan en áreas donde la pendiente no es muy abrupta y también se pueden observar en laderas pronunciadas. La población habitualmente deforesta áreas donde se encuentra vegetación original, como los pinos, para cultivar diferentes especies como maíz, zanahoria, papa, frijol y lechuga, entre otras (Figura 43b). En el área de estudio existen las condiciones para que se desarrolle este tipo de agricultura, ya que es un área húmeda y con temperaturas adecuadas para el desarrollo de los cultivos. Ocupa una superficie de 2 km² en el área de estudio.



Figura 43b. Cultivos de maíz en la parte baja del área de estudio. *Fuente: Captura propia*

Pradera de alta montaña: este tipo de ecosistema se encuentra a más de los 3,500 m s.n.m., en las montañas y volcanes más altos de México, como el Pico de Orizaba y, en particular, el área de estudio. Lo constituyen principalmente especies de gramíneas caracterizadas por hojas alternas y largas, con flores en espiga y granos secos. Algunos ejemplos son *Calamagrostis tolucensis*, *Stipa ichu*, *Festuca amplissima*, *Festuca livida*, *Festuca tolucensis*, *Muhlenbergia macroura* y *Muhlenbergia quadridentata*. Ocupa una superficie aproximada de 0.3 km².

1.7. Cambio de uso de suelo

En los últimos años, algunas áreas de la cuenca del Río El Estado han sufrido cambios de uso de suelo, esto debido principalmente a la nula actividad eruptiva del volcán Pico de Orizaba que ha permitido la confianza de la población para el establecimiento de áreas urbanas y agrícolas (Alanís, 2018).

En los diferentes recorridos que se realizaron en el área de estudio, se identificaron de la parte media de la cuenca hacia la parte baja, áreas donde la cobertura vegetal original se removió para realizar actividades agrícolas y de pastoreo. Varias de estas áreas se localizan en las laderas de ambos márgenes del Río El Estado, lo cual representa un factor de inestabilidad para que se generen procesos gravitacionales. Particularmente, son varios factores los que intervienen: pendientes fuertes, infiltración del agua en las laderas, tipo de materiales y la ausencia de vegetación (Figura 44).



Figura 44. Remoción de la cobertura vegetal para realizar actividades de agricultura. Fuente: Captura propia.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

El propósito de este proyecto es cuantificar los volúmenes de materiales aportados por procesos gravitacionales. Para ello se siguió un método de investigación de campo empírico-analítico, el cual contempló las etapas de investigación y análisis contenidas en la Figura 45, mismas que se desglosan a continuación.

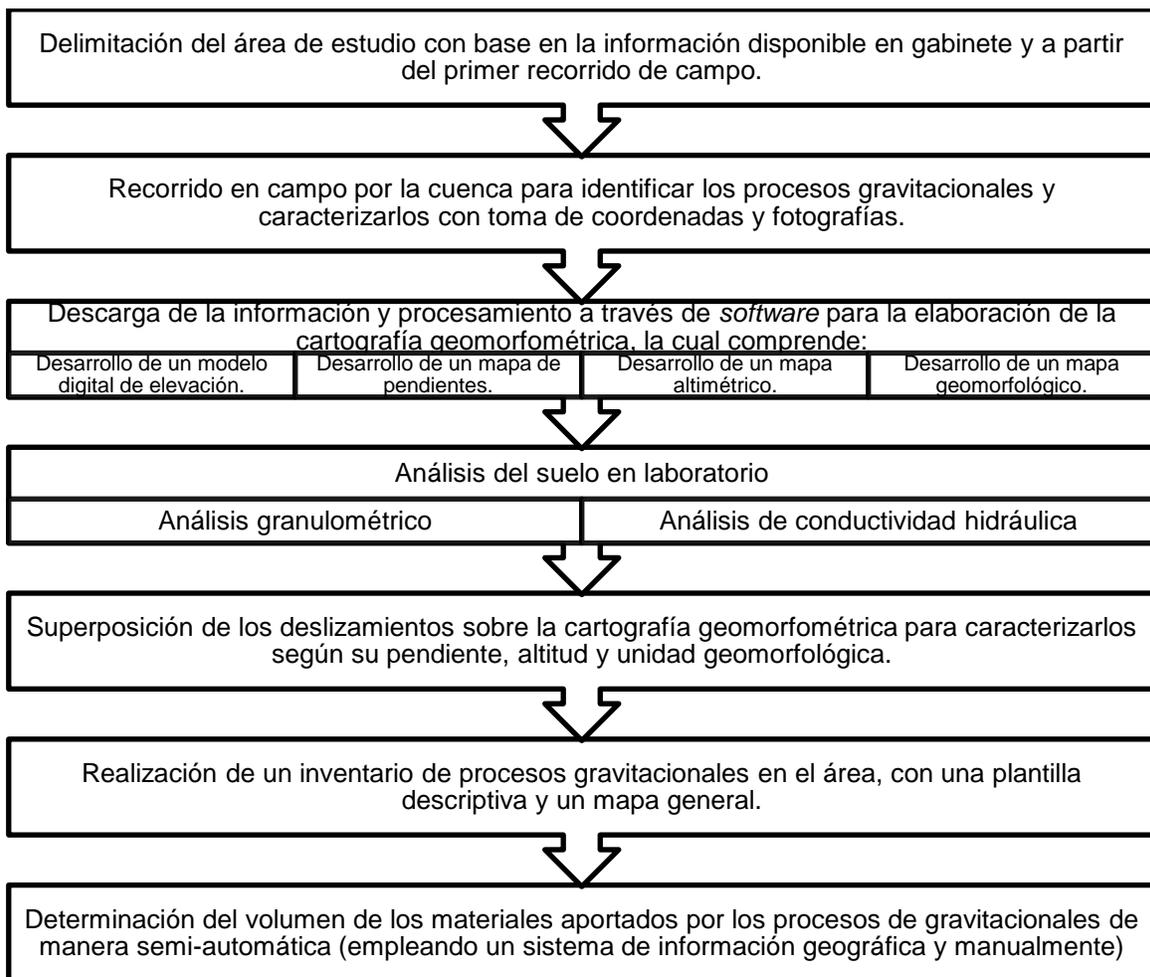


Figura 45. Diagrama de flujo metodológico.

2.1. Etapas del proceso metodológico

Primera etapa. Delimitación del área de estudio con base en la información disponible en gabinete y a partir del primer recorrido de campo

La primera etapa de este proyecto consistió en consultar, recolectar y documentar la mayor información posible para depurarla y/o clasificarla. El propósito fue obtener toda la información posible sobre el área de estudio y áreas adyacentes para conocer todos los aspectos y características del área y de esta manera, empezar a desarrollar la investigación enfocada en los objetivos y también evitar la duplicidad con trabajos ya existentes.

La información básica recopilada para el marco de estudio fue extraída a partir de fuentes documentales, como libros, artículos, publicaciones, cartas topográficas y temáticas del área, así como datos vectoriales y ortofotografías aéreas. Por ejemplo, se consultaron libros acerca de procesos gravitacionales con miras a la posterior identificación y clasificación de los procesos existentes en el área de estudio. Asimismo, para hacerse de ideas y antecedentes base que permitieran construir la metodología, se buscaron artículos relacionados con la cuantificación de materiales aportados por deslizamientos. También se consultaron publicaciones referentes al área de estudio y zonas adyacentes, las cuales sirvieron como referencia general para la elaboración del proyecto.

Posteriormente, mediante el uso de la cartografía topográfica y temática; ortofotografías aéreas, e información recabada durante un primer recorrido en campo, se delimitó el área de estudio considerando al Río El Estado como el principal objeto de estudio, a lo largo de cuyos márgenes se generan procesos gravitacionales que aportan sedimentos al cauce. Dicha delimitación fue posible mediante el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis®, tomando como base las ortofotografías (E14B56A, escala 1:75,000 de 1995 y E14B56A1, E14B55A2, E14B56A3 y E14B56A4, escala 1:40,000 de 2008), las curvas de nivel y la carta topográfica.

Segunda etapa. Recorrido en campo por la cuenca para identificar los procesos gravitacionales y caracterizarlos con toma de coordenadas y fotografías

Se realizó un recorrido de observaciones en campo con el propósito de identificar los procesos gravitacionales a lo largo de los márgenes del Río El Estado. Se recorrió el cauce del río en cuatro ocasiones. El primer recorrido se realizó en agosto de 2012, la segunda fue en marzo de 2013, la tercera en noviembre de 2013 y la cuarta fue en abril de 2014. En los dos primeros recorridos, se partió de la parte baja de la cuenca hacia la media identificando en ambos márgenes del río los procesos gravitacionales: deslizamientos superficiales, deslizamientos de asentamiento profundo, flujos de escombros y caída de rocas principalmente. Para cada proceso identificado, se elaboró su clasificación con base en lo dispuesto por Hutchinson (1988) (véase Tabla 1), se marcaron las coordenadas, se tomaron fotografías y se trazó el proceso en la carta topográfica. Se empleó un dispositivo electrónico con Sistema de Posicionamiento Geoespacial (GPS),¹ el cual permitió marcar las coordenadas de los deslizamientos. El mismo procedimiento se continuó en los dos recorridos restantes, abarcando otras áreas del río: de la parte alta a la parte media (recorrido 3), y de la parte media a la parte baja (recorrido 4) (Figura). Con estos recorridos en campo, se identificaron 94 procesos gravitacionales.



Figura 46a. Recorridos en campo por la cuenca e identificación de procesos.
Fuente: Captura propia.

¹ Marca GARMIN, modelo GPSMap76CSX.

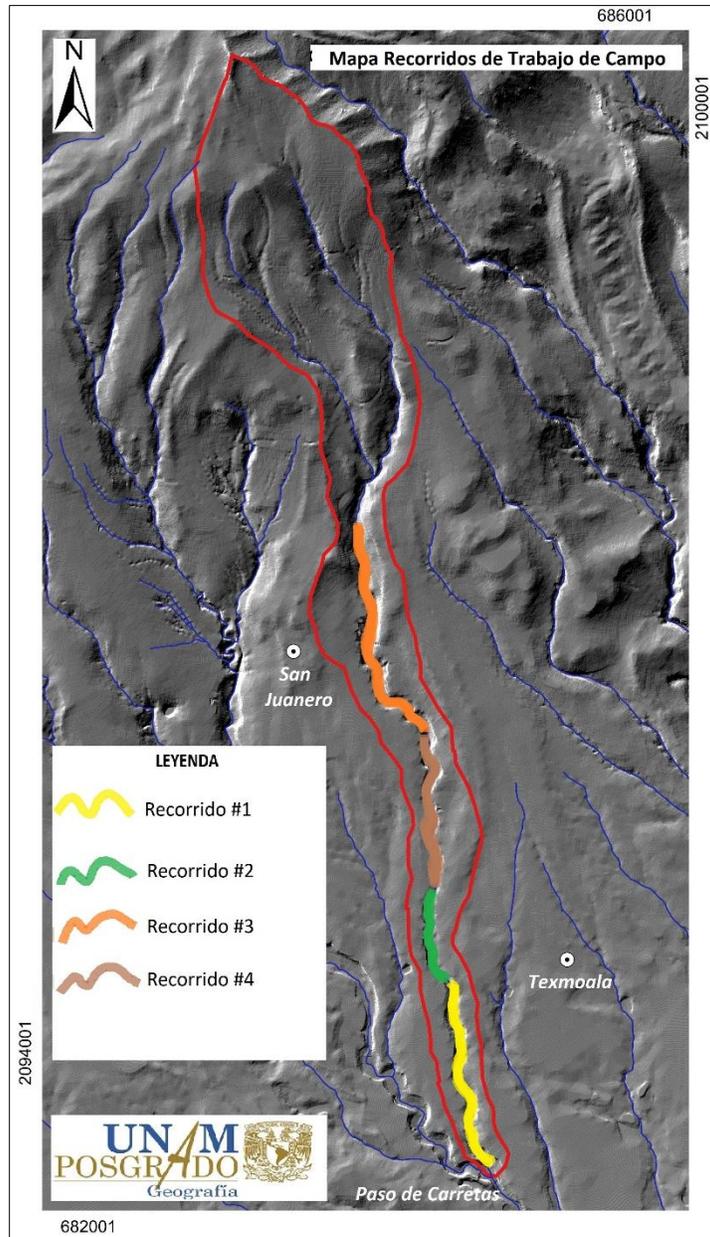


Figura 46b. Mapa de los recorridos en el trabajo de campo. Fuente: Captura propia.

Asimismo, durante los recorridos en campo se recopilaron muestras de suelo de las cabeceras de algunos deslizamientos. Esto, ya que se trata de las partes menos alteradas de los mismos, lo cual permite obtener sus propiedades lo más próximas a como debieron haber sido originalmente. Se emplearon tubos de PVC de 20 cm de largo y 15 cm de diámetro para la obtención de la muestra procurando

que ésta quedara lo más intacta posible para conservar la estructura del terreno, dichas muestras una vez obtenidas se sellaron y etiquetaron (Figura 47).



Figura 47. Recolección de muestras de suelo en las cabeceras de los procesos.
Fuente: Captura propia.

Tercera etapa. Descarga de la información y procesamiento a través de software y elaboración de la cartografía morfométrica

Tras los recorridos en campo, se descargó al SIG la información capturada con el sistema GPS, con el propósito de identificar en las ortofotografías y en la carta topográfica la distribución de los procesos. Para esto, se realizó la sobreposición de capas temáticas y de los procesos gravitacionales a las ortofotografías del área de estudio. Esto permitió identificar su distribución a lo largo del río. Los registros en el GPS se exportaron como puntos GPX al software Global Mapper (versión 10.01), donde se generó un archivo de puntos que se exportaron al software ArcMap versión (10.2.1) en formato *shapefile*.

En un segundo paso de esta etapa, valiéndose de las curvas de nivel se elaboró un Modelo Digital de Elevación (MDE) con ayuda del mismo SIG, el cual sirvió para generar la cartografía morfométrica:

- **Modelo Digital de Elevación:** Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie terrestre. Consiste en una serie de puntos con coordenadas bidimensionales, a las que se les asocia un valor de elevación. Los puntos se definen por las coordenadas X y Y , a las que se les agrega la Z que corresponde a la elevación (Lugo, 2011). Se realizó a partir de la información vectorial de las curvas de nivel con equidistancia de 10 metros de la carta topográfica a escala 1:20,000, perteneciente a la zona UTM 14.
- **Mapa de Relieve Sombreado:** Se realizó a partir de la aplicación de dos filtros de convulsión lineal al MDE, para simular iluminaciones desde diferentes orientaciones. Este es un proceso en el cual cada valor de píxel en un mapa de formato *raster* es sustituido por un valor nuevo obtenido a partir de la aplicación aritmética de un determinante de 3x3 píxeles y donde se observa una distribución de tonos grises que ayudan a tener una mejor percepción del terreno.
- **Mapa Altimétrico:** Mapa topográfico con una serie de colores en una secuencia de fríos cálidos, distribuidos en intervalos determinados de curvas de nivel. Normalmente se usan dos tonos de verdes para los relieves más bajos, pasando gradualmente al amarillo que sube en intensidad para culminar con tonos rojos y cafés (Lugo, 2011). Este mapa como su nombre lo dice, representa de manera clara y fácil las diferentes altitudes, así como las variaciones del relieve. Dicho mapa permite distinguir las áreas planas de las altas y escarpadas, siendo las últimas las más susceptibles para que se generen procesos gravitacionales. Se realizó a partir de las curvas de nivel correspondientes al conjunto topográfico E14B56a a escala 1:20,000 (INEGI, 2008). Con base en las curvas de nivel se determinaron las alturas mínima y máxima del área de estudio y se obtuvieron 3 intervalos de altitud utilizando cotas cada 10 metros que representan las alturas del terreno. Los intervalos se clasificaron cada 700 metros: 2,200 a 2,900, 2,900 a 3,600 y 3,600 a 4,300 m.s.n.m. (Figura 48).

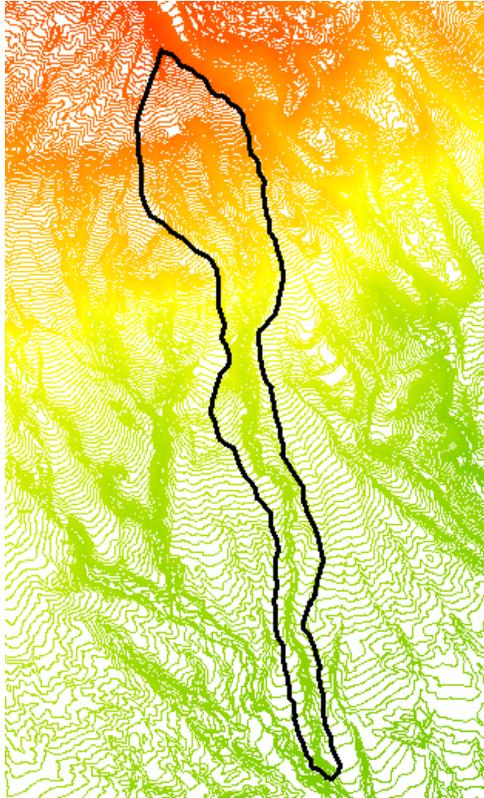


Figura 48. Representación de las curvas de nivel del área de estudio.

- Mapa de Pendientes: Es uno de los mapas más importantes para la representación del relieve. Reúne dos características: la facilidad para su elaboración, resultado de dividir la altura entre la distancia horizontal e infinidad de líneas trazadas transversalmente a dos o más curvas de nivel. El mapa de pendientes refleja las formas del relieve, lo cual es comprensible porque por lo general, los límites de las formas de relieve coinciden con los cambios bruscos de pendiente, de tal forma que se puede ver en él, en dónde se encuentran las laderas con mayor ángulo de inclinación, la configuración de ciertos elementos del relieve, con lo que se facilita un análisis rápido y general del área de estudio. Los rasgos más característicos que se logran identificar con este mapa son: las planicies, los escarpes, las laderas inclinadas, entre otras (Lugo, 2011). Este mapa también se realizó a partir de las curvas de nivel en el SIG. Las curvas indican que entre más juntas estén hay mayor pendiente pues hay en una menor distancia mayor cantidad de

curvas, lo que equivale a una mayor altura. En caso contrario cuando es mayor el espaciamiento entre curvas de nivel, menor será la pendiente en esa área del terreno.

- Mapa Geomorfológico: Es el que representa el relieve terrestre con base en la morfología y génesis, a parte de otros parámetros como geomorfometría, litología y edad (Lugo, 2011). No existe un método de aceptación universal para la elaboración del mapa geomorfológico, pero si existen diversos métodos utilizados. El método empleado para la elaboración del mapa geomorfológico está basado en el levantamiento geomorfológico propuesto por el *International Institute for Aerospace Survey and Earth Science* (ITC, 2000). Dicho método consiste en proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, los procesos geomorfológicos y los procesos naturales; dicha información puede ser presentada en forma de mapas o como bases de datos con el apoyo de un SIG (Verstappen y Van Zuidam, 1991). Dentro del sistema desarrollado por el ITC, existen tres tipos de levantamientos geomorfológicos y cada uno de ellos da origen a diferentes tipos de mapas: analíticos, sintéticos y pragmáticos. En este trabajo se aplicó el método analítico.

El levantamiento analítico proporciona información de las formas del relieve y los procesos que existen en un área determinada donde el mapeo morfogenético es fundamental, junto con la información litológica, cronológica y morfoestructuras. Dentro del mapeo morfogenético se encuentra la morfogénesis (donde las unidades de relieve se delimitan por su origen y tipo de relieve).

Para la realización del mapa geomorfológico, se realizó fofointerpretación geomorfológica con base en las ortofotografías aéreas a escala 1:75,000 y 1:40,000 del 2008 proporcionadas por el INEGI. En dichas ortofotografías se identificaron las unidades utilizando diferentes criterios como las pendientes, las formas, algunos rasgos fluviales, tonalidades y altura. También fue de gran utilidad el mapa de

relieve sombreado ya que al ser una representación del terreno en 3D, permite distinguir algunas formas del relieve.

Estos mapas fueron utilizados posteriormente para la elaboración del inventario de procesos gravitacionales del área de estudio, a través de la superposición de todos los procesos identificados sobre los mapas, para poder clasificarlos de acuerdo con su pendiente, altitud y unidad geomorfológica. La elaboración del inventario con el apoyo de dichos mapas se explica más adelante.

Cuarta etapa. Análisis granulométrico y de conductividad hidráulica del suelo

En las diferentes salidas a trabajo de campo, se realizó la recolección de 19 muestras de suelo en diferentes sitios donde se identificaron deslizamientos. Las muestras que se obtuvieron fueron tomadas del escarpe principal, ya que ahí está el material menos alterado, a diferencia del que está removido y depositado en el área de acumulación, el cual se encuentra alterado y no tiene las propiedades originales. De los 19 procesos a los que se les tomó muestra de suelo, 8 fueron flujos de escombros; 6 deslizamientos de escombros; 3 deslizamientos de asentamiento profundo y 2 deslizamientos de suelos. En los procesos de caída de rocas no fue posible obtener muestra de suelo debido a la complejidad e inaccesibilidad del terreno, ya que estaban en un área donde no se pudo subir.

Las muestras se tomaron por medio de cilindros de tubo de PVC de aproximadamente 20 cm de alto por 15 cm de diámetro. En dichos tubos, se extrajo aproximadamente entre 1 kilo y 1 kilo y medio de suelo de cada cabecera de los 19 deslizamientos; se tomaron 3 muestra de cada punto con una distancia entre cada uno de aproximadamente 50 cm.

En cada muestra obtenida se tomó la precaución necesaria para evitar alterarla, ya que era muy importante que al momento de realizar los análisis de laboratorio las muestras estuvieran inalteradas para poder obtener datos representativos y fidedignos. Se sellaron las muestras con cinta adhesiva y se etiquetó cada una a fin de evitar confusiones con las muestras.

En la Tabla 8, se muestran los puntos de las muestras de suelo que se tomaron en campo (Identificador de muestra y coordenadas geográficas):

Tabla 8. Muestras de suelo tomadas en el área de estudio. Fuente: *Elaboración con equipo de trabajo.*

No.	Punto	Latitud	Longitud
1	DRL-P1	18.924346	-97.252403
2	WP44-VMS	18.925073	-97.252842
3	DRL-P2	18.925152	-97.252594
4	GHY-1	18.92573	-97.252626
5	GHY-2	18.932831	-97.253587
6	WP46-VMS	18.929813	-97.253505
7	DRL-P3	18.93425	-97.253601
8	PUNTO 5	18.93425	-97.253601
9	GHY-3	18.936875	-97.25515
10	WP48-VMS	18.934555	-97.254348
11	JSD-01	18.945245	-97.255585
12	WP50-RMS	18.946261	-97.255081
13	GHY-01	18.947006	-97.255472
14	JSD-02	18.94661	-97.254726
15	WP52-RMS	18.94838	-97.255543
16	JSD-03	18.950719	-97.255452
17	GHY-02	18.949507	-97.25536
18	PUNTO 4	18.949507	-97.25536
19	WP53-RMS	18.94951	-97.255683

Dichas muestras de suelo obtenidas en campo fueron sometidas a análisis geotécnicos en laboratorios especializados del Instituto de Geología y la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Se realizaron los análisis de granulometría y conductividad hidráulica con base en fundamentos teóricos y prácticos, los cuales se describen a continuación:

Por granulometría o análisis granulométrico se entiende todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se separan las partículas constitutivas del suelo por tamaños, de tal manera que se puede conocer la cantidad de peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar se utilizan mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se

calculan tanto parciales como acumulados en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar los valores de material (Legorreta-Cuevas, 2012).

En el laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería, se realizó el análisis granulométrico de las 19 muestras de suelo recabadas, con el propósito de conocer la composición del suelo a partir de los distintos materiales que lo conforman. Se utilizó el equipo de tamizado, empleando diez mallas de distintos diámetros, a través de las cuales se tamizó la muestra de suelo para separarla en sus diferentes componentes. Se pesaron los materiales contenidos al final en cada malla y se obtuvieron los porcentajes de composición del suelo con el empleo de una base de datos predeterminada propia del laboratorio.

El análisis del tamaño de partículas (granulometría) se realizó en dos partes; primero se puso a secar en charolas de aluminio el suelo de los 19 puntos de muestreo que se hicieron en campo. Después se cuarteo, y como la mayor parte de las muestras tenían alto contenido de finos se procedió a lavar el suelo para determinar el porcentaje de finos. Posteriormente se tamizó, con la finalidad de que al momento del tamizado no quedaran finos en las mallas y fuera más fácil el procedimiento.

En el inicio del tamizado se pesó en la báscula el suelo seco ya lavado y se vació a las mallas, una vez listo, se colocó la tapa para que no se saliera y después se puso en el agitador aproximadamente veinte minutos para que con el movimiento el suelo fuera pasando en las diferentes aberturas.

Cuando pasaron los veinte minutos, se quitó la tapa y las mallas una por una, pesando el material que quedó en cada una de ellas. La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva, donde el porcentaje que pasa es graficado en las ordenadas y el diámetro de las partículas en las abscisas (Figura 49).



Figura 49. Tamizado de las muestras de suelo en diferentes mallas. *Fuente: Captura propia.*

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados del análisis de granulometría, se representa en un papel denominado “*log-normal*” por tener en la horizontal una escala logarítmica y en la vertical una escala natural (Figura 50).

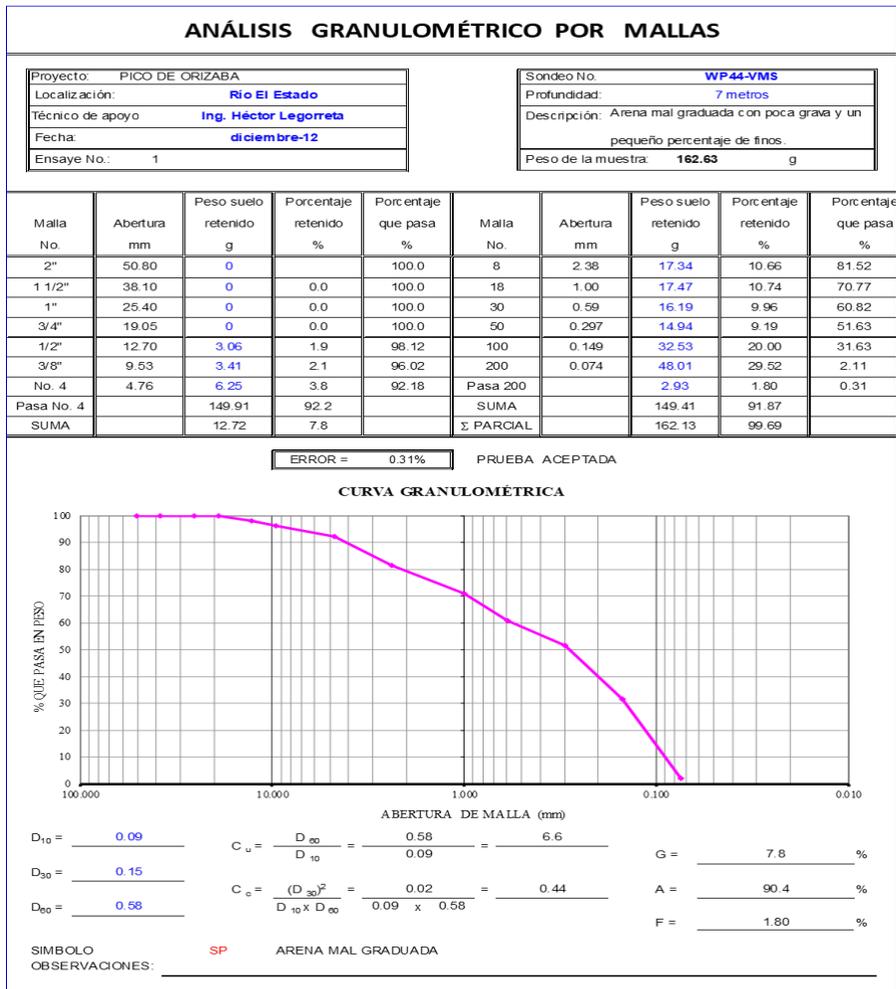


Figura 50. Ejemplo de la base de datos donde se vacían los datos de la granulometría. Fuente: Legorreta-Cuevas, 2012.

De dicha curva se obtuvo el diámetro (D_{10} , D_{30} y D_{60}) de las partículas para un 10%, 30% y un 60% que pasa. Dichos valores se obtuvieron para calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura (C_u y C_c). Estos coeficientes se utilizaron para determinar si el suelo grueso (grava y/o arena) está bien o mal graduado. Si el coeficiente de uniformidad es menor de 5 la granulometría es discontinua, si está comprendido entre 5 y 20 el suelo mal graduado y si es mayor de 20 se trata de un suelo bien graduado. El coeficiente de curvatura mide el grado de curvatura de la granulometría.

Para hablar de un suelo bien graduado, se deben cumplir ambas condiciones simultáneamente. Para señalar que un suelo está bien graduado (*well grade*) se utiliza la W y en caso contrario (*poorly grade*) una P.

La apariencia de la curva granulométrica depende del rango y la cantidad de los tamaños de partículas en una muestra de suelo. Es decir, que es afectada por el origen del suelo o el método de depositación. Un suelo bien graduado (con una distribución de partículas a lo largo de un rango de tamaños relativamente largo) produce una curva algo larga y derecha (Figura 51a). Un suelo uniforme, donde la mayoría de las partículas poseen aproximadamente el mismo tamaño se ve en la Figura 51b y un suelo mal graduado o con falta de tamaños intermedios se ve en la Figura 51c.

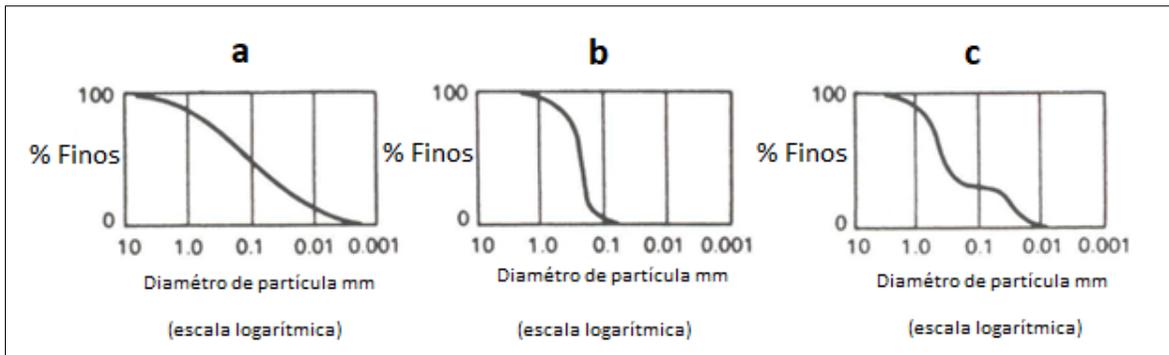


Figura 51. Curvas granulométricas de diferentes suelos. Fuente: tomado de Legorreta-Cuevas, 2012.

La conductividad hidráulica se realizó en el laboratorio del Instituto de Geología de la UNAM, con el fin de determinar la velocidad de infiltración del agua en el suelo. La conductividad hidráulica (K), se refiere a la velocidad con la que el agua pasa a través de la masa del suelo, por unidad de gradiente de carga hidráulica. Este parámetro depende de la porosidad del suelo, particularmente, de la proporción de poros con radio equivalente mayor a 15 μm que se mantienen abiertos en condiciones de saturación (Flores y Alcalá, 2010). El método para laboratorio que aquí se describe se basa en la aplicación directa de la Ley de Darcy a una columna de suelo saturado con área uniforme conocida; la ley se refiere a la conductividad hidráulica saturada (Ks) con carga constante de agua, y a la medición

del volumen de ésta que pasa por la columna en un tiempo determinado. Para la obtención de K se utiliza la siguiente formula: $K_s = (Q/At) (L/AH)$ (Flores y Alcalá, 2010). Donde K_s es la conductividad hidráulica (cm/h), Q es el volumen de agua captada en la probeta (cm³), A es la superficie del cilindro (cm²), t es el tiempo que tarda en acumularse y filtrarse el agua, L es la altura del cilindro de suelo y AH es la carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm).

Para el análisis de la conductividad hidráulica, se tomaron dos muestras inalteradas de suelo, utilizando cilindros de acero inoxidable, después, se colocó un cilindro de plástico en la parte superior del cilindro de acero y, la parte inferior de éste se colocó dentro de la parte superior un embudo *Buchner*. Fue necesario, colocar una hoja de papel filtro en la parte inferior del cilindro de acero, sujeta con una liga, para detener el suelo. Se aseguró de que la conductancia del embudo de plástico como la del papel filtro, fueran altas para que la pérdida de flujo al atravesarlas fuera insignificante en comparación con la de la columna de suelo.

Se calculó el tiempo que tardaba el agua en infiltrarse dentro de cada muestra de suelo y la cantidad de agua. Esta información se vació en una base de datos, la cual se utilizó para obtener un conjunto de medidas descriptivas de la prueba (Figura 52).

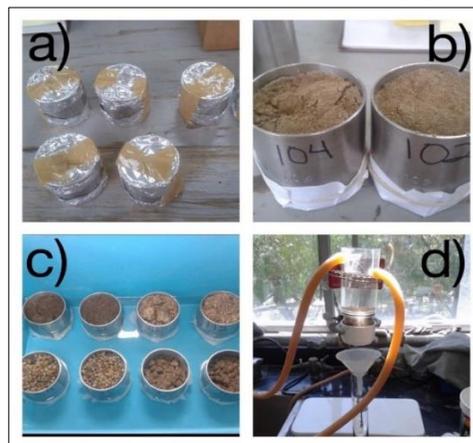


Figura 52. Procedimiento para calcular la conductividad hidráulica. a) muestras de suelo en cilindros de acero. b) Etiquetado y preparación de las muestras. c) Muestras en bandeja para saturar por capilaridad. d) Colocación del embudo para calcular la conductividad. Fuente: Captura propia.

Ahora bien, de acuerdo con el Manual Procedimientos Analíticos del Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología (Flores y Alcalá, 2010), a continuación, se muestra el cuadro de los rangos de conductividad hidráulica en muestras de suelo (Tabla 9), así como la conductividad en suelos de diferentes texturas; los cuales sirvieron como orientativos para las muestras de suelo analizadas del área de estudio (Tabla 10).

Tabla 9. Rangos de conductividad hidráulica y su interpretación.

Conductividad hidráulica K_s (cm/h)	Interpretación
<1	Muy Baja
1-2	Baja
2.1-3.0	Moderadamente baja
3.1-5.0	Media
5.1-10.0	Moderadamente alta
10.1-20.0	Alta
>20.0	Muy alta

Tabla 10. Rangos de conductividad hidráulica en diferentes texturas.

Clase textural	K_s (cm/h)
Arena	21.0
Arena migajosa	6.11
Franco arenoso	2.59
Franco arcillo arenoso	0.43
Franco	1.32
Franco limoso	0.68
Franco arcilloso	0.23
Arcilla arenosa	0.12
Franco arcillo limoso	0.15
Arcillo limoso	0.09
Arcilla	0.06

Quinta etapa. Sobreposición de los procesos sobre la cartografía geomorfométrica para caracterizarlos según su pendiente, altitud y unidad geomorfológica

Una vez identificados los procesos en los recorridos durante el trabajo de campo, se procedió a superponerlos sobre la cartografía geomorfométrica para caracterizar cada proceso en función de su pendiente, altitud y unidad geomorfológica, ya que dicha información se utilizó para elaborar el inventario de procesos. Este procedimiento se hizo colocándolos en una misma capa en el SIG e intercambiando las capas de pendiente, altitud y geoformas que se superponen para realizar el análisis correspondiente.

En primer lugar, se realizó la sobreposición en el SIG de los procesos sobre el mapa altimétrico para identificar altitudinalmente la distribución de estos. Es decir, con el mapa altimétrico se simplificó la información topográfica del área de estudio ya que este mapa hace evidente los principales contrastes y pisos altitudinales. Al sobreponer los procesos gravitacionales que se obtuvieron en el trabajo de campo, se pudo identificar en qué intervalos de altitud se encontraban dichos procesos. En la Figura 53 se puede observar que los procesos se distribuyen en dos intervalos altitudinales: 2,200 a 2,900 y 2,900 a 3,600 m.s.n.m.

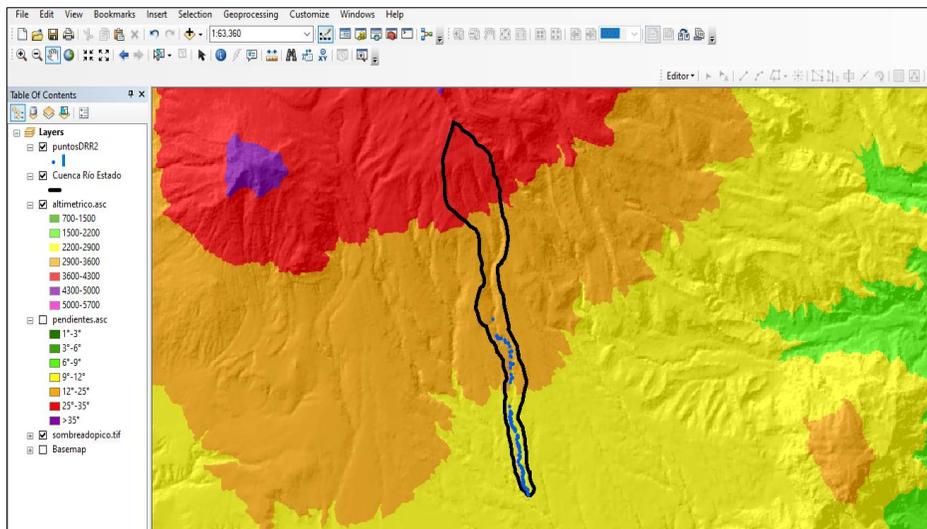


Figura 53. Sobreposición de los procesos gravitacionales en puntos azules sobre la capa de altimetría en el SIG ArcGis®. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se realizó la sobreposición de los procesos sobre el mapa de pendientes para identificar la pendiente en grados de cada proceso gravitacional, ya que dicho mapa representa y clasifica el relieve en grados de inclinación con el objetivo de establecer la relación entre el relieve y la dinámica de éste. Todo esto, con el objetivo de reconocer áreas que son susceptibles a que se generen procesos gravitacionales (Figura 54).

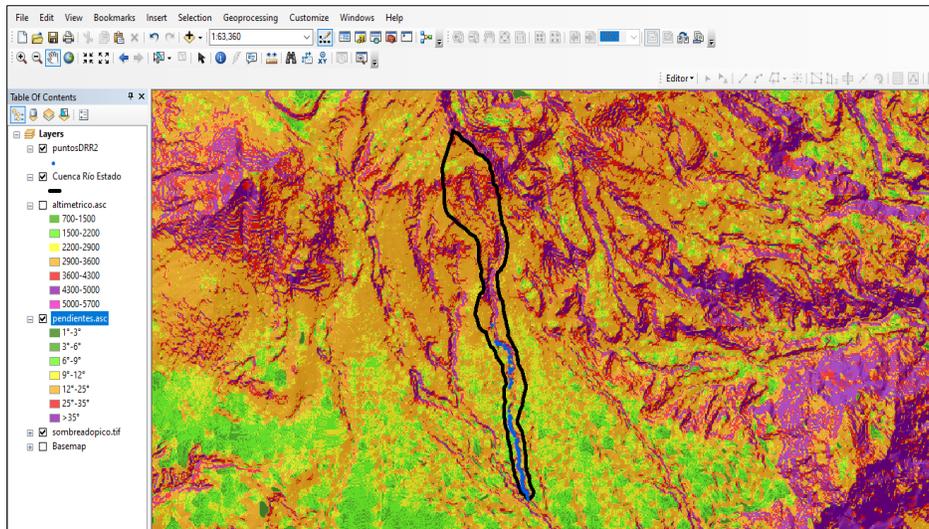


Figura 54. Sobreposición de los procesos gravitacionales en puntos azules sobre la capa de pendientes en el SIG ArcGis®. Fuente: Elaboración propia

Como último paso, se realizó la sobreposición de los procesos sobre el mapa geomorfológico para conocer qué tipos de procesos se distribuyen en las diferentes unidades geomorfológicas y hacer un análisis de la relación que existe entre las formas del relieve, los procesos gravitacionales y a su vez los volúmenes de materiales de dichos procesos aportados (Figura 55).

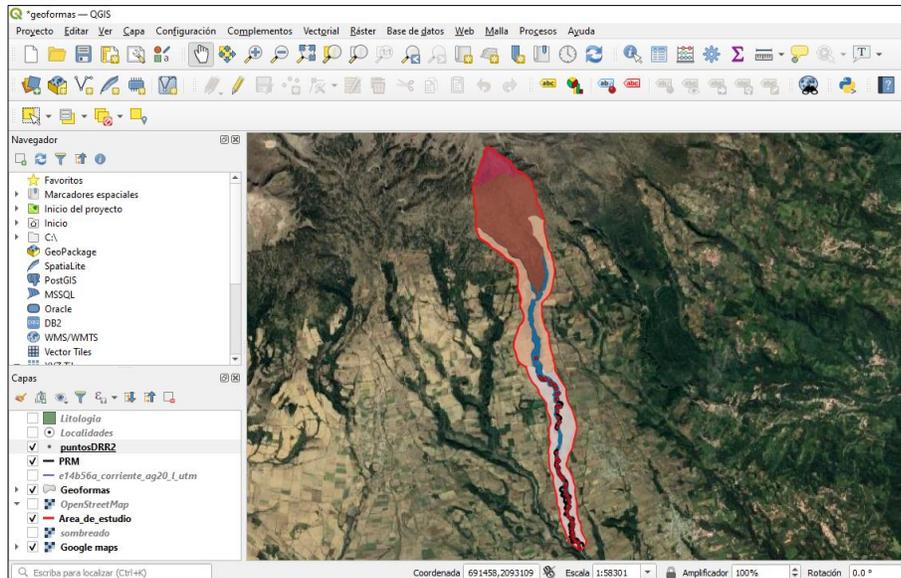


Figura 55. Sobreposición de los procesos gravitacionales en puntos rojos sobre la capa de geformas en el SIG QGis®. Fuente: Elaboración propia

Sexta etapa. Realización de un inventario de procesos gravitacionales en el área, con una plantilla descriptiva y un mapa general

Para la realización del inventario de procesos gravitacionales, se tomaron como insumos la información de los 94 procesos identificados sobre la cuenca en el trabajo de campo, las fotografías de cada proceso, las características principales determinadas para cada uno y la información geomorfométrica. En la mayoría de los procesos se identificó la cabecera, la cicatriz de la corona, las grietas de tensión, los flancos, y en algunos casos se pudo ver parte del depósito, no obstante, en la mayoría este no se encontraba debido a que fue erosionado por la corriente. Todos los procesos se identificaron en campo y la mayoría de estos no fueron posibles identificarlos en las ortofotografías (2008) debido a su tamaño, por lo que se clasificaron de acuerdo con sus dimensiones: pequeños (menores a 800 m²), medianos (entre 800m² y 1600m²) y grandes (superiores a 1600m²).

El proceso que se realizó para la elaboración del inventario (Figura 56), así como los materiales que se utilizaron consistieron en lo siguiente:

En los recorridos que se realizaron en el trabajo de campo se llevaron las cartas topográficas del área de estudio, GPS convencional y diferencial, cámara fotográfica, un distanciómetro láser y libreta de campo. Una vez estando en la cuenca, se procedió a realizar el recorrido haciendo observaciones para identificar los procesos, una vez identificado cada proceso, se marcó con el GPS convencional la ubicación, se tomó fotografía y dependiendo del tamaño del proceso se midió con el distanciómetro la altura y distancia de los escarpes, ya que este aparato toma medidas superiores a los 10 metros, se midió el largo, ancho y profundidad de los procesos.

Se realizó una descripción de cada proceso; por ejemplo, se clasificó el tipo de proceso, se verificó si estaba activo, si presentaba las partes de un deslizamiento, en qué margen del río se encontraba, qué tipo de materiales había, dimensiones (largo, alto y profundidad), tipo de vegetación que lo rodeaba y en su caso, si aún había parte del depósito.

Una vez que se identificaron los procesos en el trabajo de campo con todas sus características, dicha información se sobrepuso en las ortofotografías para trazar los procesos en el SIG y poder construir la base de datos de atributos de los procesos, también se usó la información del análisis que se hizo con el mapa altimétrico, el de pendientes y el geomorfológico. El inventario que se construyó fue en forma de mapa donde se pueden visualizar los procesos distribuidos a lo largo de río dentro del área de estudio y también en una plantilla descriptiva la cual contiene las coordenadas, la altitud, el tipo de proceso, el margen del río donde se encuentran, las medidas y la fotografía tomada durante el trabajo de campo.



Figura 56. Inventario de procesos elaborado a partir del trabajo de campo y gabinete. Fuente: Elaboración propia.

Séptima etapa. Determinación del volumen de los materiales aportados por procesos de gravitacionales de manera semi-automática (empleando un Sistema de Información Geográfica y manualmente)

La metodología que se utiliza para el cálculo de volúmenes es similar a la propuesta por Obando (2009), donde para calcular el volumen aportado por deslizamientos utilizan la siguiente fórmula:

$$\text{Formula volumen de material (m}^3\text{)} = \text{Ancho (A en m)} \times \text{Largo (L en m)} \times \text{Espesor (E en m)}$$

Las medidas de los procesos se realizaron de diferentes maneras; se utilizó GPS diferencial, cinta, distanciómetro y se realizaron transectos (Figura 57).



Figura 57. Toma de medidas en campo de los procesos gravitacionales. Fuente: *Captura propia.*

En los diversos recorridos del trabajo de campo a cada proceso gravitacional que se identificó, se le tomaron las medidas correspondientes para estimar su volumen de manera manual, es decir, se tomaron las medidas de ancho, largo y profundidad de los deslizamientos, con las cuales se estimó el volumen en metros cúbicos de manera manual utilizando la fórmula antes mencionada (Figura 58).



Figura 58. Cálculo del volumen en campo de un flujo de escombros. Ancho (4 metros), largo (26 metros) y espesor (3 metros): Volumen= 312 m³. Fuente: *Captura propia*

Posteriormente, en gabinete los procesos identificados en campo se superpusieron sobre el modelo digital de elevación y el mapa de relieve sombreado para traducirlos en áreas y para poder calcular el volumen de materiales de manera automática en ArcMap. Para esto, se realizó de la siguiente manera: se trazaron manualmente 19 procesos (esto debido a que no todos los 94 procesos son cartografiables en el modelo digital de elevación por su tamaño, por esto, se

utilizaron 19 ya que son una muestra representativa), se sobrepusieron al MDE y al mapa de relieve sombreado con resolución de 3 metros y se generó un nuevo archivo vectorial de polígonos para que por medio del SIG se calcularan los volúmenes de dichos procesos. Las muestras que se obtuvieron fueron con la intención de inferir propiedades o características de la totalidad de los procesos, para lo cual deben ser representativas. Para cumplir esta característica, se utilizó el muestreo estratificado ya que este tipo de muestreo es aquel en el que el marco muestral divide a sujetos o unidades de observación por categorías o subgrupos, con base en ciertas características de interés la cual constituirá un estrato. La selección se efectúa entonces cada uno de los estratos por separado siguiendo una técnica aleatoria simple (Salinas, 2004).

Es decir, del total de los 94 procesos, estos se dividieron en 4 estratos (deslizamientos de asentamiento profundo, deslizamientos de suelo, deslizamientos de escombros y flujos de escombros) y la selección posterior a partir de cada uno de ellos, aseguró la inclusión y representatividad de cada uno. Las características de interés fueron principalmente el tamaño del proceso y la accesibilidad para tomar las medidas correspondientes. Del proceso de caída de rocas no se tomaron muestras debido a que la cabecera de dichos procesos estaba inaccesible y no se consideró tomar muestras de roca sólida.

A continuación, se describe el procedimiento técnico que se llevó a cabo para calcular los volúmenes de materiales mediante el uso del SIG:

Para calcular el volumen en este trabajo, a partir de las curvas de nivel (Figura 59) se creó un modelo digital de elevación del área de estudio, así como de las áreas adyacentes con la extensión ArcGIS 3D *Analyst*. Esta extensión proporciona herramientas para crear, visualizar y analizar los datos de un SIG en un contexto tridimensional. Las capas vectoriales en este tipo de vista tienen roles distintos y se utilizan para describir la superficie. Dichas curvas se obtuvieron del conjunto topográfico E14B56A escala 1:20,000 del INEGI, 2008.

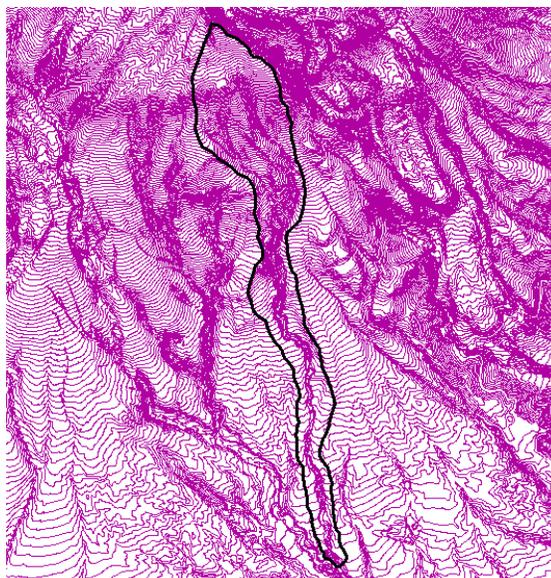


Figura 59. Curvas de nivel del área de estudio y áreas adyacentes a escala 1:20,000 con equidistancia de 10 metros. Fuente: INEGI, 2008.

El modelo digital de elevación que se generó con resolución de 3 metros (Figura 60), representa de manera visual y matemática los valores de la altitud con respecto al nivel medio del mar, dicho modelo permitirá caracterizar las formas del relieve. Los valores están contenidos en un archivo de tipo *raster*, el cual se generó con un software especializado.



Figura 60. Modelo Digital de Elevación. Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se realizó el MDE, la superficie de los deslizamientos se interpoló con dicho modelo con el apoyo de la herramienta *Functional Surface* en la sección *Interpolate Shape*, en donde se seleccionó el MDE y la superficie de los deslizamientos.

Una vez que estuvo listo el proceso, al *shape* que se generó se le restó las curvas de nivel con la herramienta *Analysis Tools* en la sección *Erase de Overlay*, en la cual se creó una nueva superficie para crear un nuevo MDE, en donde se utilizaron las curvas de nivel con el *shape* de los deslizamientos interpolados, de esta forma se crearon nuevas curvas de nivel, pero sin la superficie de los deslizamientos (Figura 61). En resumen, al MDE que se creó, se le sobrepusieron los polígonos para borrar las curvas de nivel existentes dentro de esos polígonos y después se volvió a interpolar a fin de obtener la superficie previa al deslizamiento.

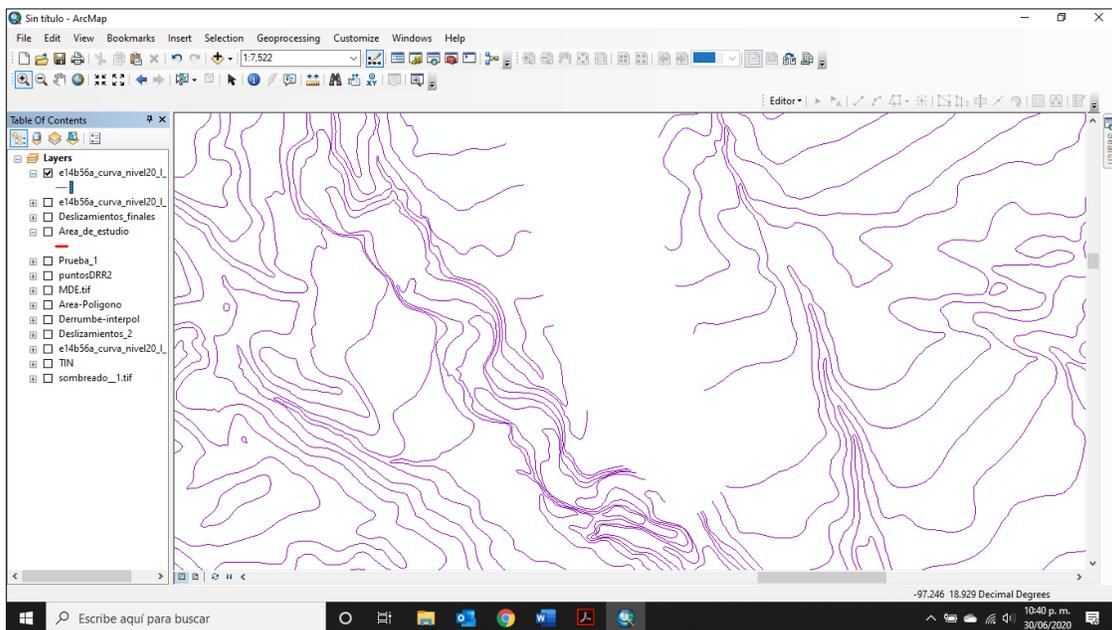


Figura 61. Curvas de nivel generadas sin la superficie de los deslizamientos. Fuente: *Elaboración propia.*

Posteriormente, se realizó otro modelo con dichas curvas y se generó el modelo con la superficie de los deslizamientos (Figura 62). Los MDE se convirtieron a TIN para hacer la diferencia de mapas y así poder obtener el volumen. Una vez realizado el proceso, se procedió a calcular el volumen restando ambos modelos digitales con la herramienta *3D Analyst* en *Terrain and TIN Surface: Surface Difference*.

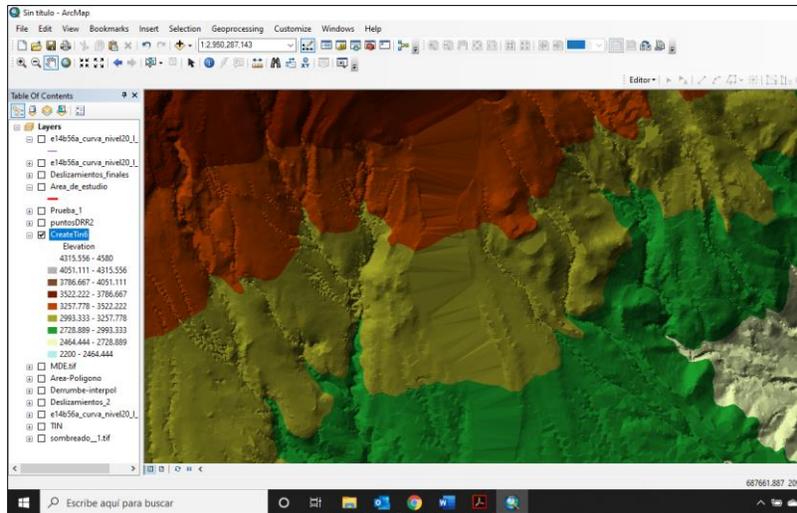


Figura 62. Modelo digital de elevación con la superficie de los procesos. Fuente: *Elaboración propia.*

Una vez realizado la resta de ambos modelos digitales, el software generó un *shapefile* en forma de polígonos de las áreas de los deslizamientos y calculó el volumen de dichas superficies. Al abrir la tabla de atributos, se puede observar el volumen calculado de las superficies de los deslizamientos (Figura 63).

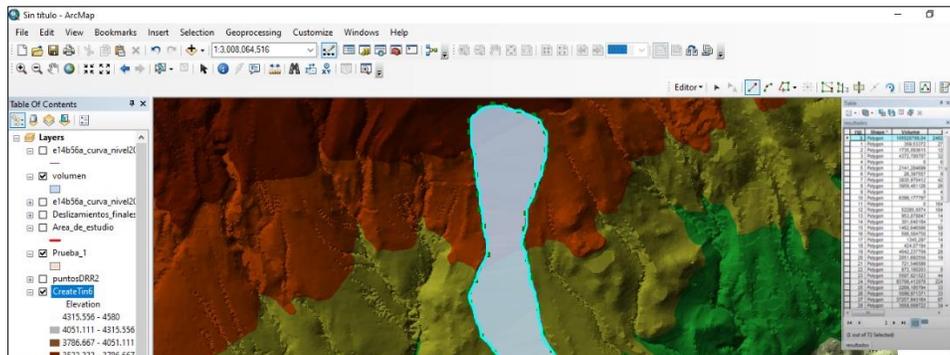


Figura 63. Cálculo de volúmenes de las superficies de los procesos gravitacionales en el área de estudio. Fuente: *Elaboración propia.*

CAPÍTULO 3. INVENTARIO Y ANÁLISIS DE VOLÚMENES DE LA CUENCA EL ESTADO

Los resultados obtenidos en esta investigación a través de la elaboración de diversos trabajos como el inventario de deslizamientos, el análisis geomorfométrico, los análisis de conductividad hidráulica y granulométrico, así como el cálculo de volúmenes de materiales, permitieron verificar el grado de certeza y viabilidad de la metodología propuesta aplicada. Cada uno de los resultados desarrollados en este trabajo, se describen a continuación:

3.1 Inventario de procesos gravitacionales

El inventario de procesos gravitacionales (Anexo 1) se realizó a partir de los diferentes recorridos en el trabajo de campo, en los cuales se observó la distribución y el tipo de proceso a lo largo del área de estudio. El inventario está compuesto por 94 procesos gravitacionales, de los cuales se cartografiaron 19 en forma de polígono y los 75 restantes están representados en forma de puntos.

La distribución a lo largo de la cuenca está relacionada con el tipo de material que compone el área de estudio. Es decir, del porcentaje total de los procesos identificados, el 14.90% se distribuyen en la parte media del área donde la composición litológica es principalmente de andesitas, mientras que el 85.10% en la parte baja la cual está constituida de arenas y lahares. Es evidente que los procesos se concentran más en la parte baja; siendo los deslizamientos de escombros el proceso que más abunda en la cuenca, mientras que los de asentamiento profundo son los menos abundantes.

Del total de los 94 procesos, 73 se localizan el margen derecho del río y de estos 73, 32 son deslizamientos de escombros; 18 son caídas de rocas; 9 son deslizamientos de suelos; 9 son flujos de escombros y 5 son deslizamientos de asentamiento profundo. Mientras que en el margen izquierdo se localizan 21 procesos, de los cuales, 8 son deslizamientos de suelos; 7 son deslizamientos de escombros; 3 son flujos de escombros; 2 son deslizamientos de asentamiento profundo y 1 es de caída de rocas. A continuación, se muestra la gráfica (Figura 64)

con el número de procesos, así como el inventario de deslizamientos y su representación en mapa (Figura 65).

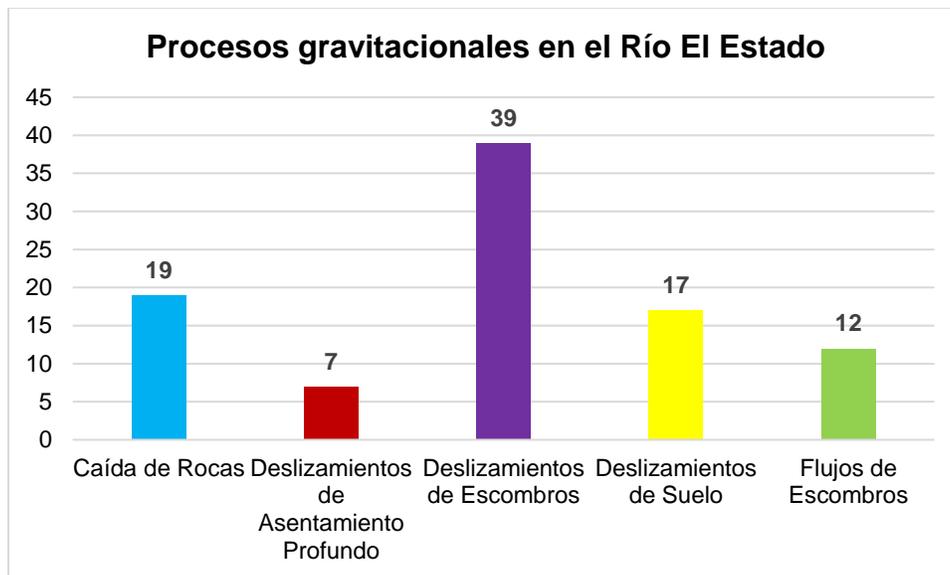


Figura 64. Gráfica de los procesos gravitacionales presentes en el área de estudio.
Elaboración propia.

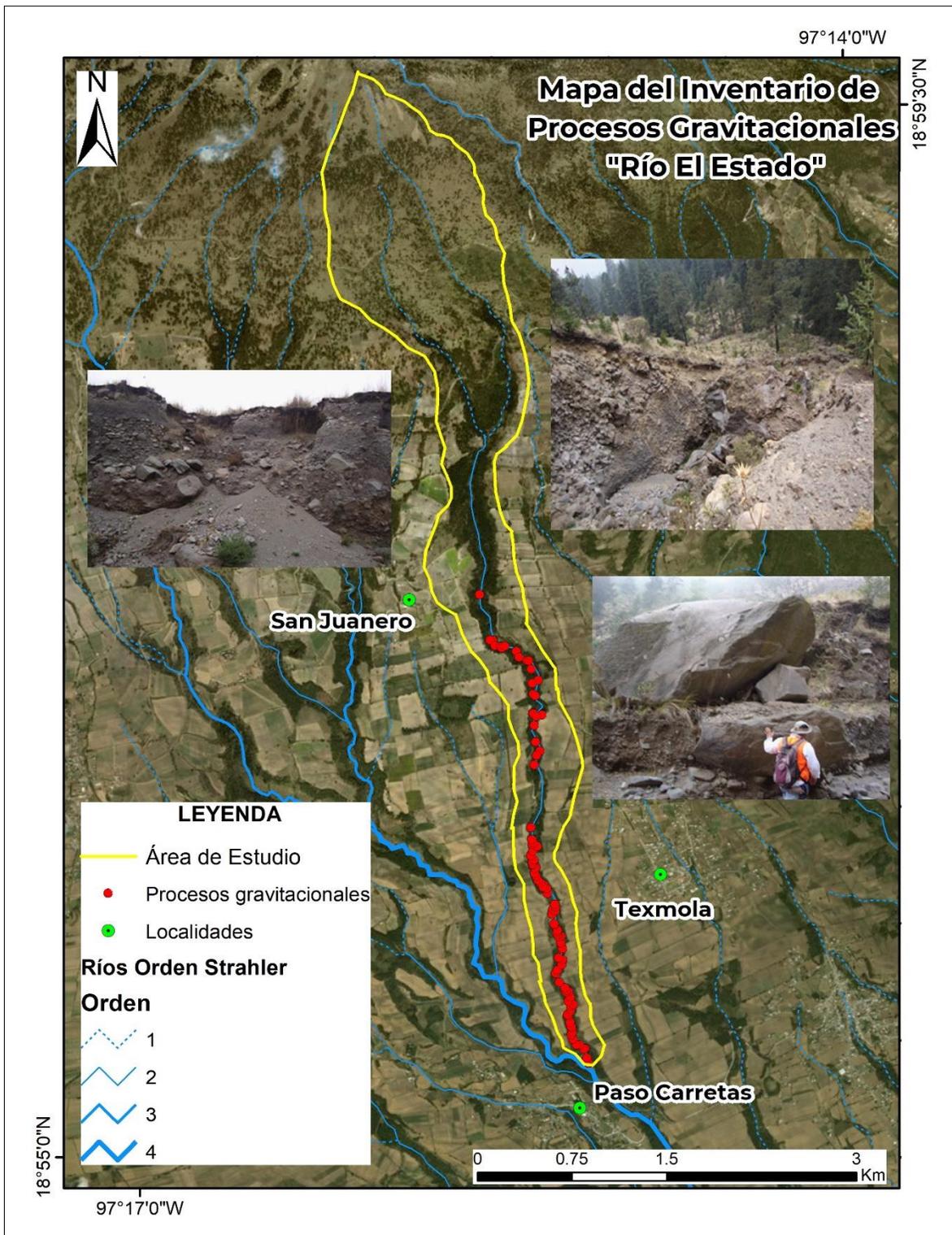


Figura 65. Inventario de los procesos gravitacionales de la cuenca El Estado.
Fuente: Elaboración propia.

3.2 Análisis de los Procesos Gravitacionales

Los procesos gravitacionales en el área de estudio que modelan las laderas del cauce de río por el desplazamiento del material no consolidado o por bloques de roca del sustrato sobre la ladera, o la acumulación de materiales al pie de estas laderas o a mayor distancia por el acarreo del agua; en su mayoría están compuestos por andosoles y regosoles correspondientes a secuencias indiferenciadas de materiales piroclásticos (ceniza, arenas, pómez y escoria), lahares y flujos de lava.

Otro material presente en el área de estudio, son clastos de diferentes tamaños que van desde unos cuantos centímetros hasta bloques de 4 metros, así como fragmentos de rocas de dimensiones mayores que se encuentran en áreas donde hay contactos litológicos de grandes coladas de lava encima de materiales piroclásticos de poca resistencia (Figura 66).



Figura 66. Contacto litológico de coladas de lava sobre material piroclástico de poca resistencia. Fuente: Captura propia.

A continuación, se describen cada uno de los procesos gravitacionales presentes en el área de estudio y sus características principales, iniciando con el evento más recurrente hasta el de menor frecuencia:

Deslizamientos de Escombros

Del total de los procesos identificados, 39 (41.5% del total) fueron deslizamientos de escombros, de los cuales 32 se localizan en el margen derecho, mientras que en el margen izquierdo 7. Dicha distribución ocurre principalmente por las características morfológicas y litológicas del área, es decir, la forma de las laderas, la pendiente y los materiales. En dichos procesos se identificó la cicatriz de desprendimiento, así como la superficie de desplazamiento y en algunos casos el depósito al pie de este. Los materiales están compuestos principalmente por materiales finos como arenas, cenizas y también por clastos de diferentes tamaños, con alta permeabilidad y poca cohesión. Estos procesos se encuentran activos debido a diversos factores como el material no consolidado, pendientes fuertes, infiltración del agua y la ausencia de vegetación que no se establece ni se arraiga debido a las constantes remociones de los materiales.

En algunos procesos gravitacionales, se encontraron árboles caídos que aún tenían hojas verdes y frescas, lo cual indicó que habían sido removidos por deslizamientos recientes (Figura 67).



Figura 67. Deslizamiento de escombros, el cual forma parte del inventario. En él se pueden observar arboles removidos y parte del depósito. Fuente: Captura propia.

Caídas de Rocas

Del total de los procesos, 19 (20% del total) fueron de caídas de rocas, de los cuales 18 se localizaron en el margen derecho, mientras que 1 en el izquierdo. Estos procesos se identificaron principalmente por dos aspectos: por las áreas de roca expuesta, es decir, había paredes expuestas con evidencias de caída de rocas (corredores de escombros y bloques), y por las rocas o fragmentos de rocas cercanas al área de desprendimiento. El tamaño de las rocas y los fragmentos corresponden aproximadamente a 4 metros de largo por 2.5 metros de ancho, pero también se encontraron rocas y fragmentos de mayor y menor tamaño.

En el área de desprendimiento se observaron las grietas de diferentes tamaños de unos cuantos centímetros hasta 8 metros aproximadamente, así como la intercalación de diferentes materiales como andesitas, dacitas, cenizas volcánicas y arenas principalmente, por lo general, el acomodo de los materiales eran los más pesados encima de los menos resistentes, lo que permitió el desprendimiento de dichas rocas, aunado a la gravedad.

En campo se identificó la presencia de paredes en donde las intercalaciones de materiales eran muy evidentes, es decir, en la base de la pared había materiales compuestos por flujos piroclásticos como cenizas y arenas principalmente, mientras que encima de estos materiales había grandes coladas de lavas de andesitas y dacitas, lo que favoreció el desprendimiento de rocas por la poca resistencia del material que se encontraba debajo.

En la Figura 68 se puede observar claramente la intercalación de dichos materiales; en la base se observan materiales como cenizas y arenas de diferentes tamaños poco consolidados, mientras que encima de estos materiales se observa una colada de lava consolidada y más resistente. Los materiales más débiles están sometidos al intemperismo, lo que ocasionó que dicho material se erosionara con facilidad y, por ende, las rocas que se encontraban encima se desprendieron y cayeron. Se observan muy bien los bloques desprendidos de gran tamaño en la base de la ladera.

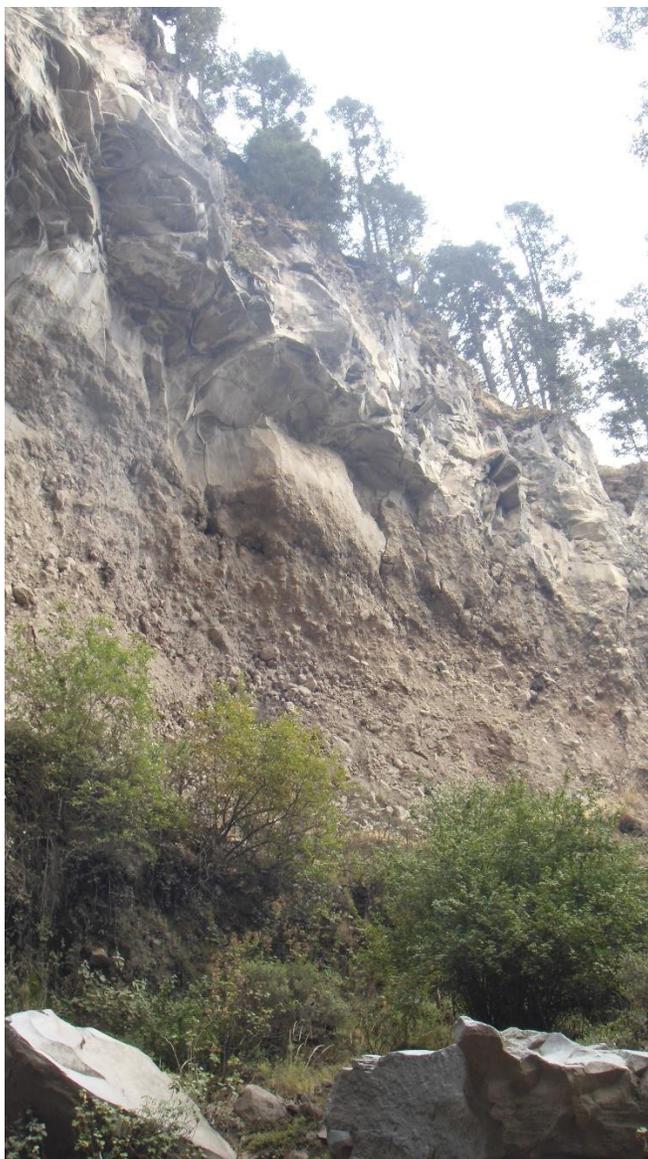


Figura 68. Caída de bloques en el área de estudio. *Fuente: Captura propia.*

Deslizamientos de Suelo

Del total de los procesos, 17 (18% del total) fueron deslizamientos de suelos, de los cuales 9 se localizaron en el margen derecho y 8 en el izquierdo. Estos procesos, se caracterizan por ser superficiales principalmente, ya que el tamaño de la superficie donde se desliza es más grande que el material depositado. Las características del suelo son diferentes, siendo de textura arcillosa, media

permeabilidad, color oscuro y los materiales deslizados generalmente fueron arrastrados por la corriente del río, ya que en su mayoría no se encontró el depósito. Las dimensiones de estos procesos no son muy grandes, aproximadamente de 22 a 400 metros cuadrados.

En la mayoría de los procesos se identificaron algunos elementos como la corona, la superficie de deslizamiento, algunas grietas, vegetación removida, parte del depósito y en algunos la superficie ya estaba intemperizada (Figura 69).



Figura 69. Deslizamiento de suelo donde se puede observar la corona, vegetación removida y parte de depósito. Fuente: Captura propia.

Flujos de escombros

Del total de los procesos identificados, 12 (13% del total) fueron flujos de escombros (Figura 70), de los cuales 9 se localizan en el margen derecho, mientras que en el margen izquierdo 3. En dichos procesos se pudo observar su forma alargada que recorría desde la parte alta de la ladera, hasta la base del cauce en la mayoría de ellos. En dicho proceso el agua es un factor importante ya que el flujo de agua va erosionando los materiales y van formando el flujo sobre la ladera de manera alargada y estrecha. Los materiales que se observaron fueron una mezcla de sedimentos (clastos, cenizas y arenas) de diferentes tamaños, de unos cuantos milímetros para las arenas y las cenizas, las cuales eran de color claro en la mayoría de los casos, poco arcillosas y con una permeabilidad media. Para los clastos se identificaron medidas aproximadamente de unos 4 centímetros y hasta más de 3 metros, dichos materiales fueron arrastrados hacia la parte baja del cauce, bajo efectos de la gravedad y el agua.



Figura 70. Flujos de escombros en ambos márgenes del río. La imagen de lado izquierdo representa dicho margen del río y en él se observan clastos de unos cuantos centímetros, hasta un bloque de varios metros. En el flujo del lado derecho de observan sedimentos más finos y restos de vegetación, así como una menor densidad de disección. Fuente: Captura propia.

Deslizamientos de Asentamiento Profundo

De todos los procesos, 7 (7.5% del total) fueron deslizamientos de asentamiento profundo, de los cuales 5 se localizaron en el margen derecho y 2 en el izquierdo. Este tipo de proceso varía de tamaño, desde 1,000 a 2,500 metros cuadrados. En dichos procesos se pudieron observar las grietas de tensión en la parte alta del proceso, lo cual indican que están activos y que van avanzando, además, en la mayoría era evidente la ausencia de vegetación, las pendientes fuertes y la corona estaba muy bien definida.

Este tipo de proceso en el área de estudio fue fácil de identificar a pesar de que su ocurrencia fue menor, debido a sus características tan bien definidas como el tamaño, el asentamiento que se generó al momento del deslizamiento, las grietas de tensión en la parte de la corona que van marcando el terreno y evidenciando que parte se está asentando, la ausencia de vegetación y en general la morfología (Figura 71).

Los materiales que se identificaron en este tipo de procesos fueron principalmente suelo arcilloso, con intercalación de clastos y arenas con media permeabilidad y de color oscuro de tamaño de unos cuantos milímetros hasta varios centímetros e incluso metros aproximadamente.



Figura 71. Deslizamiento de asentamiento profundo en el margen derecho del río, en la imagen se observa la morfología bien definida del proceso, así como la diversidad de materiales y la ausencia de vegetación. Fuente: Captura propia.

Tabla 11. Distribución de porcentaje de los procesos gravitacionales en el área de estudio.

Tipo de Proceso	% de Procesos Gravitacionales
Caída de Rocas	20
Deslizamientos de Asentamiento Profundo	7.5
Deslizamientos de Escombros	41.5
Deslizamientos de Suelo	18
Flujos de Escombros	13

3.3 Factores preconditionantes y desencadenantes predominantes en el área de estudio

Para que se generen los procesos gravitacionales, es necesario la presencia de un conjunto de factores que den por resultado dichos procesos. Entre los factores que se identificaron en el área, se realizó un análisis de sobreposición de capas temáticas (litología, clima, precipitaciones y vegetación) con el objetivo de explicar la ocurrencia y distribución de los procesos en la cuenca.

Como factores preconditionantes se identificaron materiales intemperizados con falta de cohesión, alternancia de diferentes litologías (areniscas, lahares, arenas, coladas de lava y cenizas), fracturas, permeabilidad constante, aporte de agua al suelo, alternancia de épocas de sequía y lluvia, precipitaciones intensas, eventos de lluvias extraordinarias, ausencia o escasez de vegetación que sujete el terreno.

En la Figura 72 se representan los procesos gravitacionales sobre la capa de litología y la de clima, en ella se observa que la mayoría de los procesos se distribuyen sobre materiales de areniscas, lahares y arenas principalmente; en un clima templado subhúmedo, donde los veranos son lluviosos y los inviernos secos. Este clima es característico de las montañas que reciben la humedad proveniente de los bosques en donde la lluvia es más intensa en el verano. En este sentido, la conjugación de ambos factores favorece la ocurrencia de dichos procesos y la distribución va relacionada con los mismos.

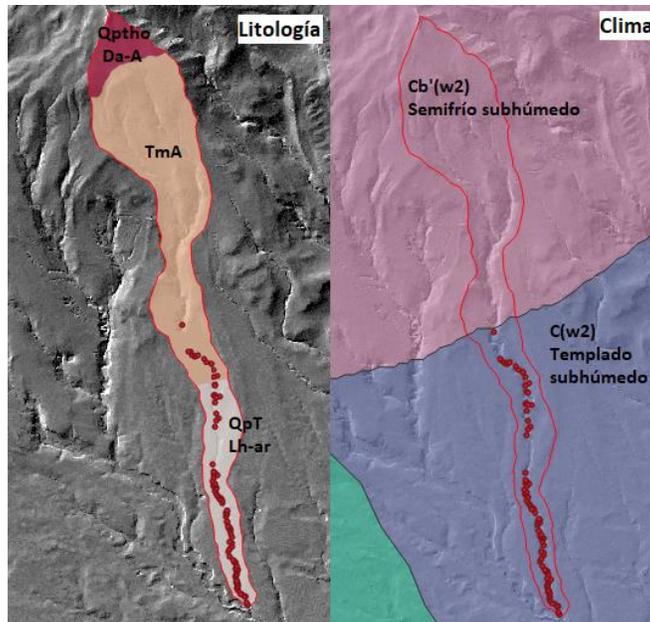


Figura 72. Sobreposición de capas: litología, clima y procesos gravitacionales del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Como factores desencadenantes naturales y antrópicos se identificaron fuertes precipitaciones, socavamiento, erosión fluvial, excavaciones con retiro de materiales al pie del talud, deforestación e incendios provocados y construcciones para realizar caminos. En la Figura 73 se realizó la sobreposición de los procesos gravitacionales sobre la capa de precipitación y vegetación; en donde se observa que los intervalos de precipitación van de 800 a 1,000 mm y hay agricultura de temporal donde la vegetación natural fue removida para dicha actividad. Al igual que los anteriores, la conjugación de dichos factores favoreció la generación de dichos procesos y su distribución.

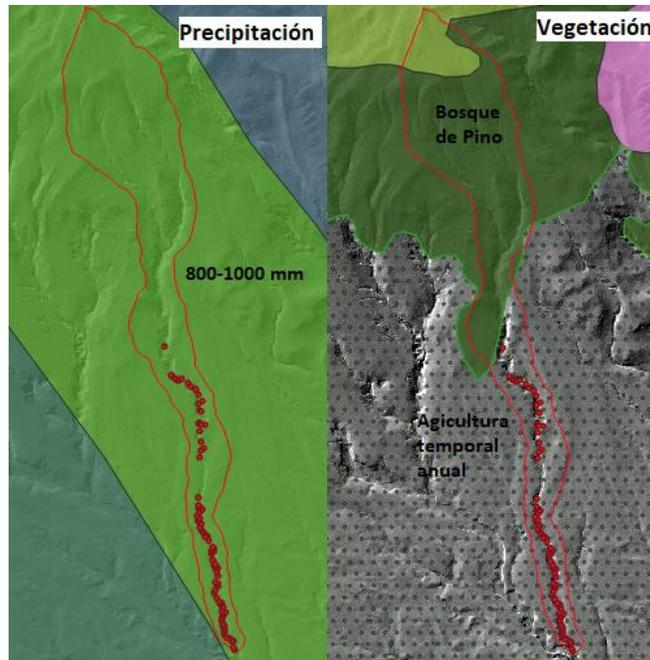


Figura 73. Sobreposición de capas: precipitación, vegetación y procesos gravitacionales del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis morfométrico

En este trabajo, se decidió realizar un análisis morfométrico del área de estudio y como resultado de dicho análisis se generaron mapas que reflejan la espacialidad de la medición realizada en las formas de relieve analizadas. Siendo así, se realizó el análisis de la altimetría y la inclinación del terreno.

Mapa Altimétrico

El mapa altimétrico es uno de los más importantes porque muestra los principales intervalos de altitud (generalmente en metros), así como los rasgos más significativos del relieve y su configuración general. Se clasificó en tres intervalos de altitud: la parte baja de la cuenca se encuentra en el intervalo 2,200 a 2,900, la parte media en 2,900 a 3,600 y la parte alta de la cuenca en el intervalo de 3,600 a 4,300 msnm. En dicho mapa se superpusieron los procesos gravitacionales identificados en campo y se observaron 68 procesos en el intervalo de altitud de 2200 a 2900 y 26 en el intervalo de 2900-3600 msnm.

Como ya se mencionó que el análisis de la altimetría permite simplificar la topografía de un área a partir de un mapa que evidencia los contrastes y pisos altitudinales, fue posible identificar y delimitar a simple vista las unidades del relieve a partir de sus características generales y también, se identificó en qué unidades estaban distribuidos los procesos gravitacionales y en qué áreas se aportan los volúmenes de materiales generados por dichos procesos.

El relieve es heterogéneo ya que en su mayoría es un relieve montañoso volcánico, en donde se distinguen las laderas, los cauces y los valles fluviales principalmente. En la Figura 74 se pueden observar los procesos gravitacionales distribuidos en dos pisos altitudinales sobre las laderas de montaña y los valles fluviales.

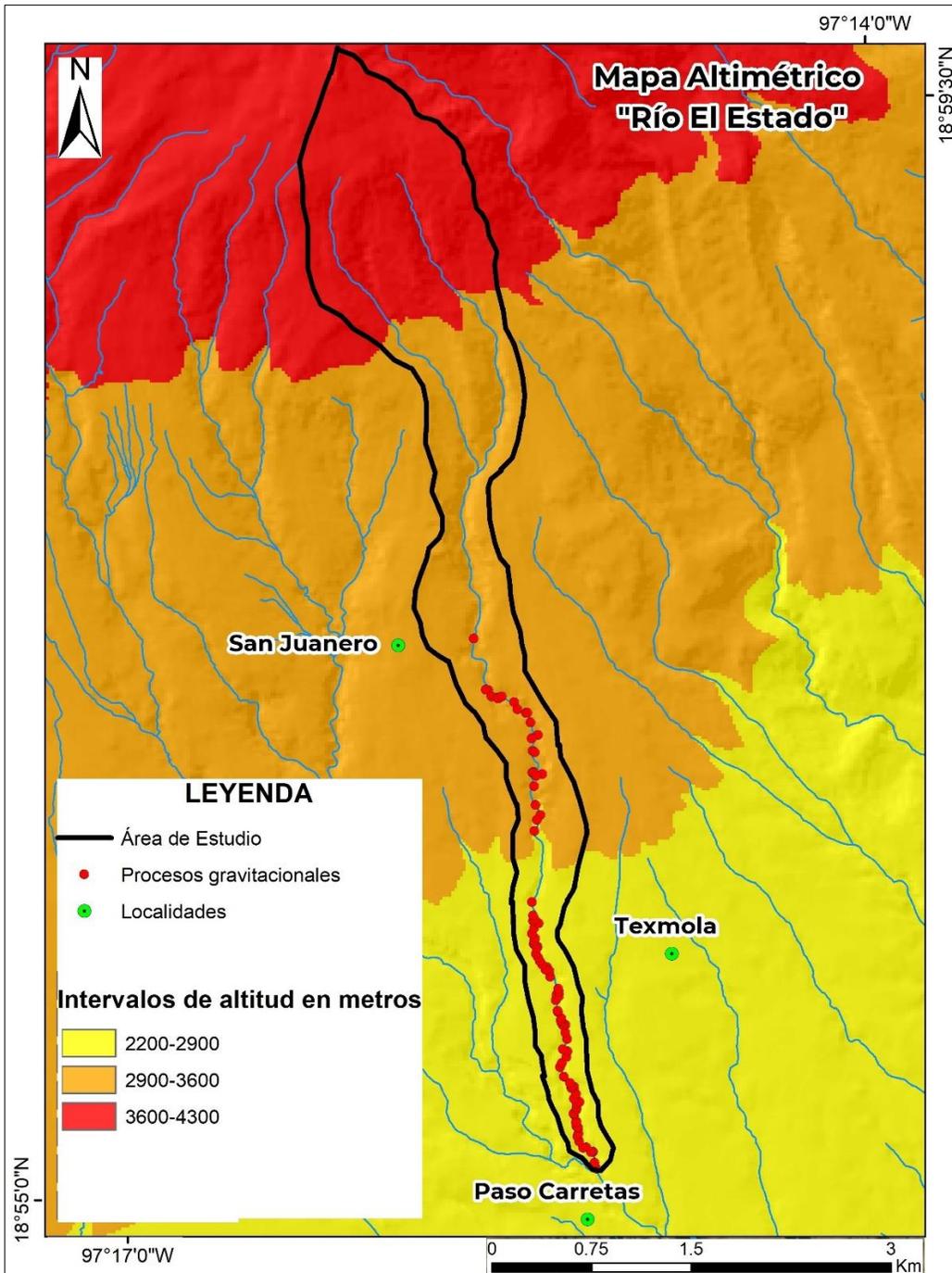


Figura 74. Altimetría del área de estudio y áreas adyacentes. Fuente: Elaboración propia.

Mapa de Pendientes

Los rasgos más característicos que se lograron identificar en el área con la ayuda de este mapa fueron los escarpes, los cuales tiene pendientes de $>35^\circ$, las laderas inclinadas cuyas pendientes van de 25° a 35° y valles fluviales cuyas pendientes van de 12° a 25° y en algunos casos, $>35^\circ$. El mapa se clasificó en siete intervalos de pendiente, aunque para una mejor interpretación y análisis, los índices se dividieron en cinco grupos: pendientes muy bajas ($>6^\circ$), pendientes bajas (6° a 12°), pendientes medias (12° a 25°), pendientes altas (25° a 35°) y pendientes muy altas ($>35^\circ$).

Pendientes muy bajas ($>6^\circ$)

Este intervalo se encuentra principalmente al sur del área de estudio y zonas adyacentes, en el mapa se pueden observar en las inmediaciones de las localidades Texmola y Paso de Carretas. Las formas de relieve que presentan estas pendientes son principalmente áreas del lecho fluvial y algunas áreas de las laderas con baja inclinación las cuales son ocupadas para la agricultura. En estas pendientes no se identificaron procesos gravitacionales, sin embargo, en las áreas del lecho fluvial que presentan estas pendientes se observó parte de los depósitos de sedimentos de algunos procesos gravitacionales, los cuales eran de 5 a 10 metros cúbicos aproximadamente.

Pendientes bajas (6° - 12°)

Este tipo de pendientes tienen presencia en la parte norte de la cuenca, donde se encuentran las laderas de montaña constituidas de dacitas y andesitas de pendientes medias, y en una pequeña porción de estas laderas al noroeste presenta pendientes de 6° a 12° . También se presentan a partir de la parte media de la cuenca hacia la parte baja en las laderas de montaña constituidas de areniscas, lahares y piroclastos. Asimismo, se presentan en algunas áreas del lecho fluvial en donde se identificaron sedimentos aportados por algunos procesos gravitacionales.

Pendientes medias (12°-25°)

Estas pendientes se encuentran de la parte media de la cuenca hacia el norte de esta. Se presentan en las laderas de montaña de andesitas, pero también en las laderas de montaña de andesitas consideradas de pendiente alta que se distribuyen en la porción norte del área de estudio y en algunas áreas del lecho fluvial. Estas pendientes son las que más abundan en el área de estudio y en ellas se identificaron procesos gravitacionales como deslizamientos de suelos, de escombros, de asentamiento profundo y flujos de escombros.

Pendientes altas (25°-35°)

Este tipo de pendientes se localizan en una pequeña proporción en las laderas altas principalmente. En dichas pendientes se identificaron algunos procesos gravitacionales como deslizamientos de suelo, de escombros, de asentamiento profundo, flujos de escombros y caída de rocas.

Pendientes muy altas (>35°)

Estas pendientes están representadas principalmente por las laderas altas del área de estudio, exactamente en ambos márgenes del río. En el mapa se puede distinguir perfectamente su distribución en color morado en el valle fluvial de toda la cuenca. En dichas pendientes se identificaron procesos gravitacionales como deslizamientos de suelo, de escombros, de asentamiento profundo, flujos de escombros y caída de rocas.

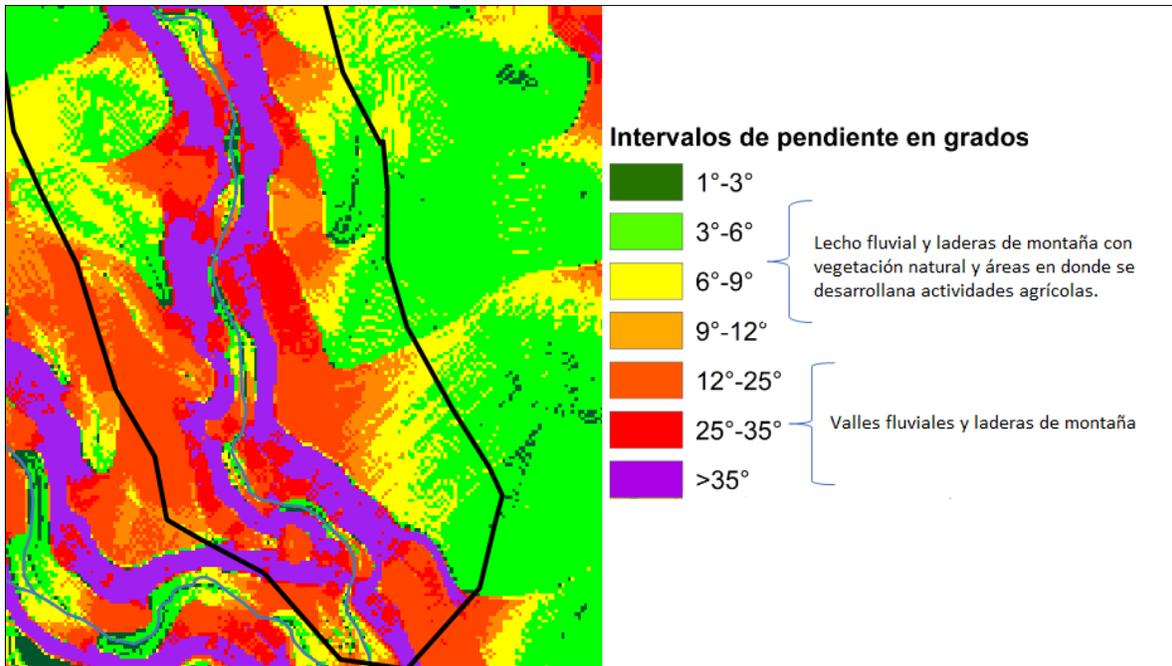


Figura 75. Área sur de la cuenca en donde la inclinación del terreno permite identificar en una primera aproximación formas del relieve que se asocian con la dinámica gravitacional. Fuente: Elaboración propia.

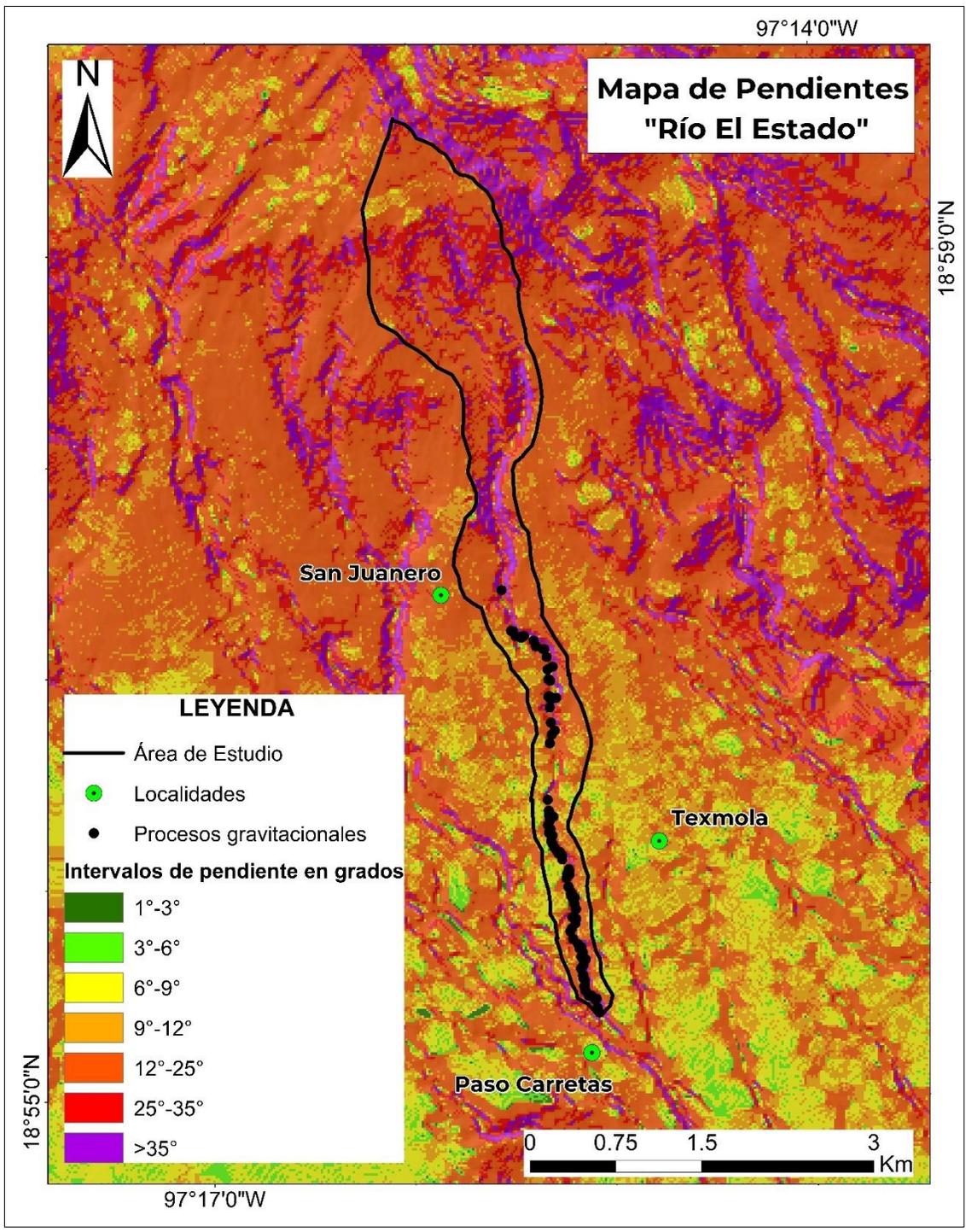


Figura 76. Intervalos de pendiente en grados. *Fuente: Elaboración propia.*

3.5 Unidades geomorfológicas

La importancia del análisis geomorfológico, así como de la confección de la cartografía, radica en su aplicación a situaciones reales, en este caso, permitió conocer la distribución de los procesos gravitacionales en diferentes formas de relieve, así como el volumen de materiales aportados a las mismas. El área de estudio se dividió en cinco unidades geomorfológicas, en las cuales se identificaron procesos gravitacionales y algunos depósitos de estos. En cada forma de relieve se calculó el número de procesos existentes y el volumen aportado por estos.

1. Las laderas de montaña de dacita y andesita de pendientes medias (12° - 25°) representan el 7% del área de estudio y en ella no se identificaron procesos gravitacionales durante los recorridos en el trabajo de campo ni en gabinete; por lo que el porcentaje de procesos y volumen de sedimentos equivale a 0%.
2. Las laderas de montaña de andesitas de pendientes altas (25° - 35° y $>35^{\circ}$) representan el 35% del área de estudio. A pesar de que cuentan con un potencial para que se generen procesos gravitacionales, no se identificaron dichos procesos en los recorridos en campo ni en gabinete; por lo que el porcentaje de procesos y volumen de sedimentos es del 0%.
3. Las laderas de montaña de andesitas de pendientes medias (12° - 25°) cubren el 23% del área de la cuenca y representan el 15% de los procesos gravitacionales, los cuales aportan 12.15% de sedimentos. Los procesos identificados en esta unidad corresponden a deslizamientos de suelo, de escombros, flujos de escombros y caída de rocas.
4. Laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medias y suaves (12° - 25° y 9° - 12°) cubren el 22.5% del área y representan el 26% de los procesos, quienes aportan 10.85% de sedimentos a la cuenca. Los procesos presentes en esta forma de relieve corresponden a deslizamientos de suelo, de escombros, de asentamientos profundo, flujos de escombros y caída de rocas.

5. Los valles fluviales cubren el 12.5% de la cuenca y en ellos, se encuentran la mayoría de los procesos gravitacionales identificados en el trabajo de campo y en gabinete. Del total de los procesos, el 59% se localiza en dicha forma de relieve y son las que aportan el 77% de sedimentos a la cuenca. Los procesos que se identificaron fueron deslizamientos de suelos, de escombros, de asentamiento profundo, flujos de escombros y caída de rocas.

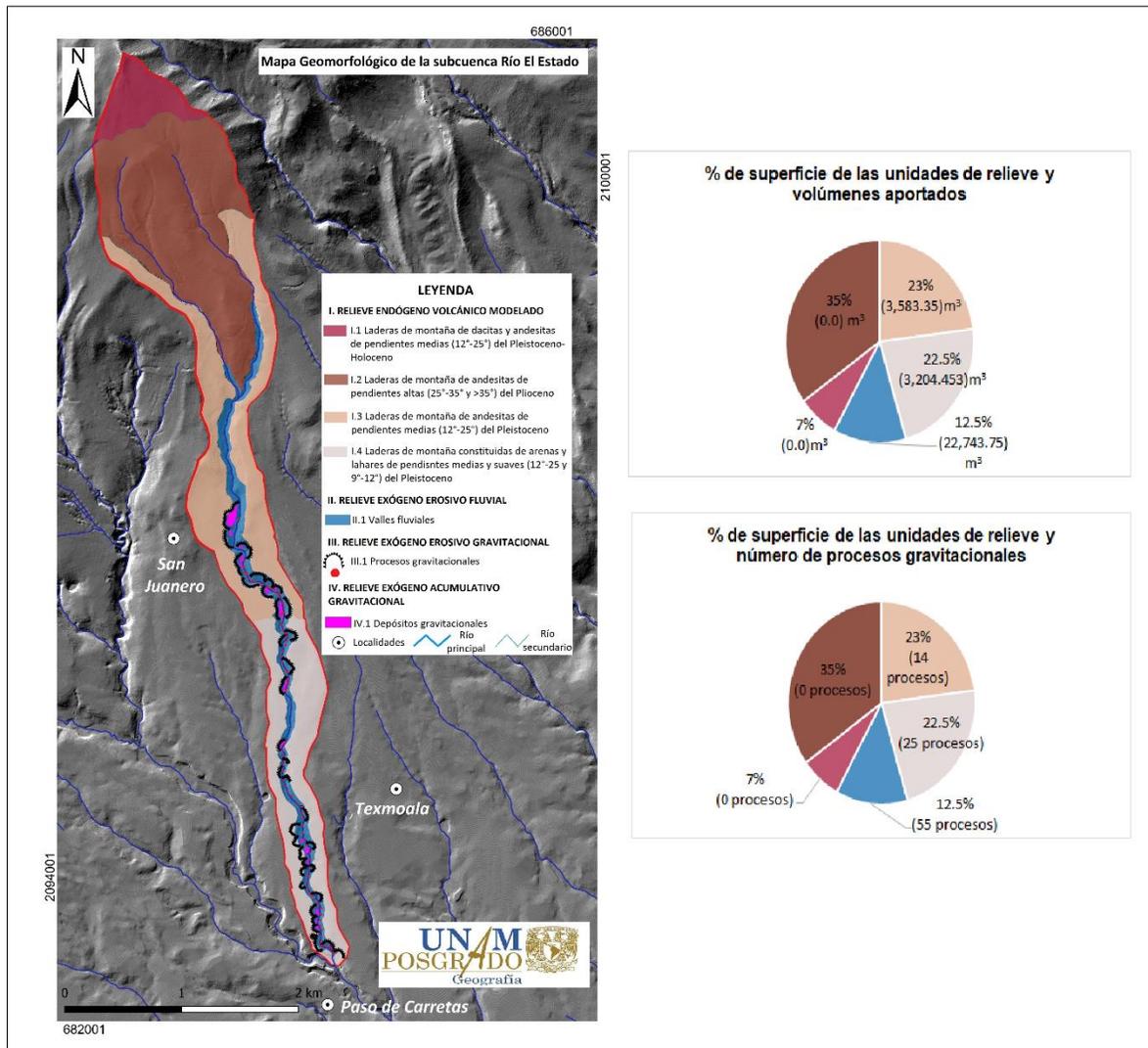


Figura 77. Unidades de relieve, número de procesos gravitacionales por unidad y volúmenes aportados por los procesos en cada unidad. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 77 se observa el porcentaje de superficie de las unidades de relieve y los volúmenes aportados, así como el número de procesos gravitacionales en cada unidad. Las gráficas muestran que en la unidad de relieve que ocupa el mayor porcentaje del área de estudio (35%) no se identificaron procesos gravitacionales y por lo tanto no se calculó el volumen de sedimentos, pero en los valles fluviales que ocupan un porcentaje de superficie del 12.5% se identificaron 55 procesos gravitacionales, los cuales aportaron 22,743.75 metros cúbicos de sedimentos.

3.6 Análisis Geotécnico: conductividad hidráulica y granulometría

Los análisis de laboratorio que se hicieron a las muestras de suelo obtenidas en campo permitieron principalmente obtener información sobre el tipo de materiales involucrados en los deslizamientos y la velocidad con que el agua pasa a través de estos.

Conductividad hidráulica

El análisis de conductividad hidráulica permitió conocer la velocidad con que el agua pasa a través de los materiales. De todos los núcleos a los que se les hizo la prueba de conductividad (42 núcleos), en 39 de ellos, el agua paso en menos de 1 hora, incluso en 8 núcleos el agua paso inmediatamente debido a que estas muestras eran materiales muy gruesos como pómez y gravas; por lo que fue imposible tomar el tiempo de lo rápido que se infiltró el agua. Solo en 3 núcleos el agua tardó más de 1 hora en infiltrarse, lo que indicó que dichos materiales eran más arcillosos a diferencia de los otros y no eran tan permeables.

A continuación, en la siguiente Tabla se muestran los resultados sobre el análisis que se realizó a cada muestra. Se pueden observar los datos de conductividad hidráulica (K_s) de las muestras de suelo que se tomaron en campo, a cada una se le realizó el procedimiento dos veces para verificar que el tiempo fuera el mismo y no existieran variaciones.

Tabla 12. Conductividad hidráulica (Ks) de las muestras de suelo del área de estudio.

Muestra No.	Volumen de agua (cm ³)	Área (cm ²)	Tiempo (hrs)	At	(Q/At)	Altura	Carga de agua (cm)	L/dH	KS
WP52 RMS (Prueba 1)	100	19.65	0.553888889	10.8839167	9.18786895	11	100	0.11	1.010665585
WP52 RMS (Prueba 2)	100	19.65	0.553888889	10.8839167	9.18786895	11	100	0.11	1.010665585
GHY-2 Capa 3 (Prueba 1)	100	19.65	0.516944444	10.1579583	9.844497951	11	100	0.11	1.082894775
GHY-2 Capa 3 (Prueba 2)	100	19.65	0.091388889	1.79579167	55.68574677	11	100	0.11	6.125432145
WP53RMS (Prueba 1)	100	19.65	0.074722222	1.46829167	68.10635943	11	100	0.11	7.491699537
WP53RMS (Prueba 2)	100	19.65	0.066666667	1.31	76.33587786	11	100	0.11	8.396946565
WP44VMS (Prueba 1)	100	19.65	0.068888889	1.35366667	73.87343019	11	100	0.11	8.126077321
WP44VMS (Prueba 2)	100	19.65	0.092777778	1.82308333	54.85212781	11	100	0.11	6.033734059
DRLP1 (Prueba 1)	100	19.65	0.220277778	4.32845833	23.10291386	11	100	0.11	2.541320524
DRLP1 (Prueba 2)	100	19.65	0.0525	1.031625	96.93444808	11	100	0.11	10.66278929
DRLP2 (Prueba 1)	100	19.65	0.044722222	0.87879167	113.792613	11	100	0.11	12.51718743
DRLP2 (Prueba 2)	100	19.65	0.231944444	4.55770833	21.94085112	11	100	0.11	2.413493623
WP46 VMS (Prueba 1)	100	19.65	0.289444444	5.68758333	17.58215997	11	100	0.11	1.934037597
WP46 VMS (Prueba 2)	100	19.65	0.104722222	2.05779167	48.59578432	11	100	0.11	5.345536275
GHY-3 (Prueba 1)	100	19.65	0.091388889	1.79579167	55.68574677	11	100	0.11	6.125432145
GHY-3 (Prueba 2)	100	19.65	0.2175	4.273875	23.39797023	11	100	0.11	2.573776725
DRLP3 (Prueba 1)	100	19.65	0.293333333	5.764	17.34906315	11	100	0.11	1.908396947
DRLP3 (Prueba 2)	100	19.65	0.118611111	2.33070833	42.90541145	11	100	0.11	4.719595259
JSD-03 (Prueba 1)	100	19.65	0.201111111	3.95183333	25.30471089	11	100	0.11	2.783518198
JSD-03 (Prueba 2)	100	19.65	0.226111111	4.44308333	22.50689274	11	100	0.11	2.475758201
PUNTO 4 (Prueba 1)	100	19.65	0.188333333	3.70075	27.02154969	11	100	0.11	2.972370465
PUNTO 4 (Prueba 2)	100	19.65	0.158611111	3.11670833	32.08513255	11	100	0.11	3.529364581
PUNTO 5 C (Prueba 1)	Materiales como pómez y gravas, por lo que el agua pasó inmediatamente y no fue posible medir el tiempo.								
PUNTO 5 C (Prueba 2)									
PUNTO 5 A (Prueba 1)	Materiales como pómez y gravas, por lo que el agua pasó inmediatamente y no fue posible medir el tiempo.								
PUNTO 5 A (Prueba 2)									
PUNTO 5 B (Prueba 1)	100	19.65	1.6475	32.373375	3.088958133	11	100	0.11	0.339785395
PUNTO 5 B (Prueba 2)	100	19.65	1.295	25.44675	3.929774922	11	100	0.11	0.432275241
GHY-1 Capa 1 (Prueba 1)	100	19.65	0.203055556	3.99004167	25.06239492	11	100	0.11	2.756863441
GHY-1 Capa 1 (Prueba 2)	100	19.65	0.185277778	3.64070833	27.46718244	11	100	0.11	3.021390068
JSD-02 (Prueba 1)	Materiales como pómez y gravas, por lo que el agua pasó inmediatamente y no fue posible medir el tiempo.								
JSD-02 (Prueba 2)									
GHY-01 (Prueba 1)	100	19.65	0.124166667	2.439875	40.98570623	11	100	0.11	4.508427686
GHY-01 (Prueba 2)	100	19.65	0.088888889	1.74666667	57.2519084	11	100	0.11	6.297709924
JSD-01 (Prueba 1)	100	19.65	1.088888889	21.3966667	4.673625175	11	100	0.11	0.514098769
JSD-01 (Prueba 2)	100	19.65	0.805277778	15.8237083	6.319631144	11	100	0.11	0.695159426
WP48 VMS (Prueba 1)	100	19.65	0.13	2.5545	39.14660403	11	100	0.11	4.306126444
WP48 VMS (Prueba 2)	100	19.65	0.101666667	1.99775	50.05631335	11	100	0.11	5.506194469
GHY-02 Capa 2-4 (Prueba 1)	Materiales como pómez y gravas, por lo que el agua pasó inmediatamente y no fue posible medir el tiempo.								
GHY-02 Capa 2-4 (Prueba 2)									
WP50 RMS (Prueba 1)	100	19.65	0.081111111	1.59383333	62.74181742	11	100	0.11	6.901599916
WP50 RMS (Prueba 2)	100	19.65	0.053611111	1.05345833	94.92544397	11	100	0.11	10.44179884

De acuerdo con los rangos de conductividad, los valores que se obtuvieron de las 21 muestras son los siguientes: 1 muestras de conductividad muy baja, 1 de moderadamente baja, 1 de baja conductividad, 3 de media conductividad, 7 de conductividad moderadamente alta, 3 de alta y 3 de conductividad muy alta.

Tabla 13. Valores de conductividad y la interpretación de las muestras de suelo de los procesos gravitacionales del área de estudio.

No.	Muestra	KS	Interpretación	Tipo de proceso
1	WP52-RMS	1.010665585	Baja	Deslizamiento de escombros
2	GHY-2	6.125432145	Moderadamente alta	Deslizamiento de asentamiento profundo
3	WP53-RMS	8.396946565	Moderadamente alta	Flujo de escombros
4	WP44-VMS	8.126077321	Moderadamente alta	Flujo de escombros
5	DRL-P1	10.66278929	Alta	Deslizamiento de escombros
6	DRL-P2	12.51718743	Alta	Flujo de escombros
7	WP46-VMS	5.345536275	Moderadamente alta	Deslizamiento de suelo
8	GHY-3	6.125432145	Moderadamente alta	Flujo de escombros
9	DRL-P3	4.719595259	Media	Flujo de escombros
10	JSD-03	2.783518198	Moderadamente baja	Deslizamiento de asentamiento profundo
11	PUNTO 4	3.529364581	Media	Deslizamiento de asentamiento profundo
12	PUNTO 5	>21	Muy alta	Deslizamiento de escombros
13	GHY-1	3.021390068	Media	Flujo de escombros
14	JSD-02	>21	Muy alta	Flujo de escombros
15	GHY-01	6.297709924	Moderadamente alta	Deslizamiento de escombros
16	JSD-01	0.695159426	Muy baja	Flujo de escombros
17	WP48-VMS	5.506194469	Moderadamente alta	Deslizamiento de asentamiento profundo
18	GHY-02	>21	Muy alta	Deslizamiento de escombros
19	WP50-RMS	10.44179884	Alta	Flujo de escombros

La permeabilidad del suelo obedece al tipo de material, así como a la velocidad en que tarda en infiltrarse el agua. En la mayoría de las muestras se obtuvieron valores altos y medios y, en una menor proporción valores bajos, con base en esto, se podría interpretar que el área de estudio presenta una conductividad hidráulica de moderadamente alta a muy alta. (Tabla 13).

Los valores bajos de conductividad se pueden interpretar debido a una baja porosidad, pocos poros grandes y una pobre interconectividad entre ellos, así como la presencia de una elevada cantidad de arcillas las cuales se expanden e impiden que el agua pase rápido por los materiales. Mientras que los valores altos

generalmente se presentan en suelos con textura gruesa y por ende el agua pasa a rápida velocidad.

Las muestras en las que los valores son relativamente altos corresponden en su mayoría a deslizamientos de escombros y flujos de escombros. A continuación, se muestran algunos ejemplos de los procesos a los cuales se les realizó análisis de conductividad:

- 1) Deslizamiento de asentamiento profundo: en este proceso la permeabilidad es moderadamente alta y el material está compuesto de arenas, limos y arcillas. En este proceso el agua de lluvia se infiltró en los poros saturando los materiales finos como las arcillas, las cuales tienen una gran capacidad de retención al contacto con el agua, por lo tanto, al saturarse generó que los materiales más gruesos se deslizaran y aunado a ello, la ausencia de vegetación en esa área, la poca resistencia de los materiales y la pendiente favorecieron que se generara este proceso de gran tamaño y espesor, el cual aportó un gran volumen de sedimentos a la cuenca (Figura 78).



Figura 78. Conductividad hidráulica moderadamente alta en un deslizamiento de asentamiento profundo. Fuente: Captura propia.

- 2) Deslizamiento de escombros: en este proceso la permeabilidad es alta y el material es heterogéneo (arenas, gravas y finos), lo que permitió que, en

lluvias extraordinarias, el agua se infiltrara en el suelo sin vegetación debido a la deforestación que se presenta en el área. El agua se infiltró en los materiales rápidamente, ocupando los espacios vacíos o poros. La presión en los poros indica que el agua generó una carga extra en el suelo, disminuyendo la resistencia de los materiales, lo que permitió que el material perdiera cohesión y al perder estabilidad se deslizó (Figura 79).



Figura 79. Alta conductividad hidráulica en deslizamiento de escombros. Fuente: Captura propia.

- 3) Flujo de escombros: en este proceso la conductividad es muy alta debido al tipo de materiales que se presentan como gravas y arenas de tamaño de varios centímetros, lo que permitió que el agua que cae en la ladera se infiltrara muy rápidamente a pesar de que en esa área hay vegetación de pinos. El flujo de agua a través del suelo muy permeable de baja cohesión originó el arrastre de partículas y la erosión interna del suelo que generó un flujo de escombros de 26 metros de largo y 4 de profundidad (Figura 80).



Figura 80. Muy alta conductividad hidráulica en un flujo de escombros donde se puede observar la heterogeneidad de los materiales. Fuente: Captura propia.

Granulometría

Este análisis permitió determinar la proporción relativa de los diferentes tamaños de los granos que se encontraban en las muestras de suelo. En este trabajo se manejaron muestras estadísticamente representativas de suelo para realizar dicho análisis.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 15 donde se muestran los parámetros geotécnicos de la conductividad hidráulica y la granulometría. Dichos parámetros indican que, en todas las muestras de suelo, el porcentaje de arenas está por encima de las gravas y los finos, es decir, los materiales en el área de estudio están compuestos en un porcentaje aproximado de 48% de arenas, un 37% de gravas y un 15% de finos. La curvatura de uniformidad que se obtuvo a través del análisis granulométrico indica que, de las 19 muestras de suelo, en 11 de ellas el suelo está mal graduado, en 7 la graduación es discontinua y en solo una muestra el suelo está bien graduado.

Tabla 15. Parámetros geotécnicos de conductividad hidráulica y granulometría de las muestras de suelo del área de estudio.

Muestra	% Grava	%Arena	%Finos	Cu	Ks	Interpretación Ks	Tipo de Proceso
WP52-RMS	0.6	93.9	5.47	2.9	1.010665585	Baja	Deslizamiento de escombros
GHY-2	7.1	89.3	3.67	3.6	6.125432145	Moderadamente alta	Deslizamiento de asentamiento profundo
WP53-RMS	1.1	98.9	0	2.3	8.396946565	Moderadamente alta	Flujo de escombros
WP44-VMS	7.8	90.4	1.8	6.6	8.126077321	Moderadamente alta	Flujo de escombros
DRL-P1	32	55.9	12.14	13.3	10.66278929	Alta	Deslizamiento de escombros
DRL-P2	21.4	64	14.64	0.8	12.51718743	Alta	Flujo de escombros
WP46-VMS	37.4	62.6	0.04	25.3	5.345536275	Moderadamente alta	Deslizamiento de suelo
GHY-3	23.8	75.3	0.92	11.7	6.125432145	Moderadamente alta	Flujo de escombros
DRL-P3	1.9	96.6	1.44	0.2	4.719595259	Media	Flujo de escombros
JSD-03	2	96	2.01	5.5	2.783518198	Moderadamente baja	Deslizamiento de asentamiento profundo
PUNTO 4	23.2	67.8	9.05	9.2	3.529364581	Media	Deslizamiento de asentamiento profundo
PUNTO 5	28.8	70.6	0.67	20	>21	Muy alta	Deslizamiento de escombros
GHY-1	20.9	78.2	0.86	6.1	3.021390068	Media	Flujo de escombros
JSD-02	11.4	88.6	0	4.2	>21	Muy alta	Flujo de escombros
GHY-01	10.8	88.5	0.65	4.2	6.297709924	Moderadamente alta	Deslizamiento de escombros
JSD-01	22.6	74.3	3.04	8.3	0.695159426	Muy baja	Flujo de escombros
WP48-VMS	16.7	73.3	9.97	7.1	5.506194469	Moderadamente alta	Deslizamiento de asentamiento profundo
GHY-02	7.1	89.3	3.67	4	>21	Muy alta	Deslizamiento de escombros
WP50-RMS	8.5	84.9	6.58	9	10.44179884	Alta	Flujo de escombros

De acuerdo con los resultados anteriores, se define que el suelo en las laderas de ambos márgenes del área de estudio es un suelo poco estable debido a que son suelos arenosos heterogéneos en donde se presentan muchos vacíos y, por lo tanto, son suelos poco cohesivos. Las arenas y gravas mal graduadas son materiales poco estables y cuando tienen un porcentaje de finos son susceptibles a deslizarse.

Los suelos cambian su grado de consolidación o compactación con el paso del tiempo al estar expuestos al intemperismo. En el área de estudio el suelo está expuesto a diversos factores, lo que lo hace un suelo suelto poco consolidado. Uno de estos factores es la vegetación, esto es porque dicha vegetación es removida por la constante tala que existe en el área y, al no haber vegetación que sujete el suelo arenoso poco compacto con una alta permeabilidad, se generan dichos procesos. Este tipo de características se encuentran principalmente en los valles fluviales y las laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medias y suaves.

Los sedimentos aportados a la cuenca por dichos procesos están compuestos de arenas y gravas en su mayoría y al ser depositados y no tener consolidación, en eventos de lluvia extrema donde la corriente del río aumenta, estos son arrastrados a las partes bajas de la cuenca.

De los procesos identificados en el área de estudio, no se obtuvieron muestras de suelo del proceso gravitacional caída de rocas debido a la ubicación de dichos procesos y por la composición de estos (rocas).

3.7 Cálculo de volúmenes de materiales

El inventario de procesos gravitacionales fue la base para estimar el volumen de materiales, ya que en él se concentran los procesos identificados en el área de estudio durante el trabajo de campo y de gabinete. Una vez que se construyó el inventario de procesos con los datos principales de cada uno como las coordenadas, altitud, margen del río en donde se localizan, tipo de proceso y medidas para calcular volumen, se procedió a realizar los cálculos con las medidas correspondientes tomada en campo para realizar la estimación de volúmenes de materiales.

Debido a las condiciones del área de estudio, no fue posible tomar las medidas de todos los procesos, pero a pesar de eso, se logró medir la mayoría de estos a pesar de las dificultades del terreno. En los deslizamientos y los flujos de escombros

se tomaron las medidas a las cicatrices de desprendimiento, mientras que, en las caídas de rocas, cuando se identificaron los bloques desprendidos cercanos a la fuente, se les tomó medidas a estos ya que son justamente el material aportado por dicho proceso (Figura 81). Lo anterior, es comprensible debido a que los materiales como el suelo y los detritos al ser depositados sobre el cauce, estos son arrastrados por el agua en su totalidad o parcialmente y se pierde dicho depósito, mientras que, en los procesos de caída de rocas estas por su gran volumen y peso, son difíciles de arrastrar por la corriente y, por ende, es fácil medirlas para calcular su volumen.



Figura 81. A. Toma de medidas de un deslizamiento de asentamiento profundo. B. Toma de mediciones de un bloque de caída. Fuente: Captura propia.

Con los datos obtenidos en campo se estimó/calculó el volumen de materiales de los procesos con la fórmula que se muestra en la metodología. En el siguiente deslizamiento de escombros (Figura 82) se puede observar un ejemplo de cómo se aplicó la fórmula para el cálculo de volumen:

Ancho: 7 metros

Largo: 6 metros

Espesor: 4.5 metros

Entonces:

Volumen de material (m^3) = Ancho (**7 metros**) x Largo (**6 metros**) x Espesor (**4.5 metros**) = **189 m**

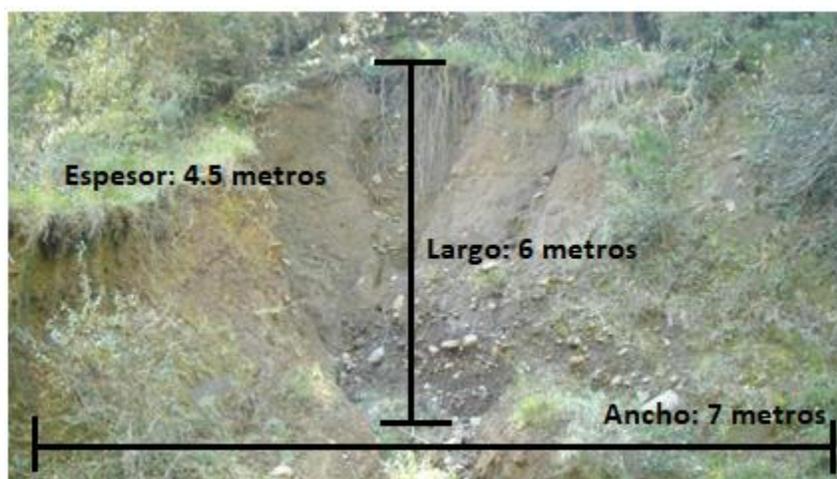


Figura 82. Toma de medidas de un deslizamiento de escombros para el cálculo del volumen. Fuente: Captura propia.

El ejemplo anterior se aplicó a 84 procesos que componen el inventario (deslizamientos de escombros, suelo, de asentamiento profundo, flujos de escombros y caída de rocas), pero a 10 procesos de caída de rocas no fue posible medir el área de la cicatriz, ni los bloques desprendidos debido a que la mayoría de los bloques se encontraban en áreas de difícil acceso o eran pequeños fragmentos dispersos en el cauce.

En la Tabla 16 se puede observar los procesos gravitacionales que componen el inventario con la estimación/cálculo de volumen en metros cúbicos (volumen por cada proceso, así como el total) y el margen del río en el que se encuentran.

Tabla 16. Volumen de materiales de los procesos gravitacionales que componen el inventario del Río el Estado, ladera suroeste del volcán Pico de Orizaba.

No.	Tipo de Proceso	Margen Río	Ancho	Largo	Espesor	Volumen m ³
1	Deslizamiento de escombros	Derecho	5.5	2.5	2.5	34.375
2	Caída de rocas	Derecho	2.5	1.5	1	3.75
3	Deslizamiento de suelo	Derecho	4.5	8.5	3.5	133.875
4	Deslizamiento de escombros	Derecho	6	2.5	1.5	22.5
5	Deslizamiento de escombros	Derecho	8	6.5	3.5	182

6	Caída de rocas	Derecho	5	2	1	10
7	Deslizamiento de asentamiento profundo	Derecho	17	15	12	3060
8	Flujo de escombros	Derecho	21	1.5	3	94.5
9	Caída de rocas	Derecho	4	2.5	3.5	35
10	Deslizamiento de suelo	Derecho	7	6.5	5	227.5
11	Flujo de escombros	Derecho	4	9	1.5	54
12	Deslizamiento de escombros	Derecho	6.5	11	4	286
13	Caída de rocas	Derecho	1.5	1	1	1.5
14	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
15	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
16	Deslizamiento de escombros	Derecho	4.5	2.5	1	11.25
17	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
18	Deslizamiento de escombros	Derecho	3.8	2.2	1.8	15.048
19	Deslizamiento de escombros	Derecho	8	4.3	1.4	48.16
20	Deslizamiento de escombros	Derecho	6.5	4.5	3	87.75
21	Deslizamiento de suelo	Derecho	9	6.5	3.5	204.75
22	Deslizamiento de suelo	Derecho	3	5	1	15
23	Caída de rocas	Derecho	2	3	2.5	15
24	Flujo de escombros	Derecho	11	6	3.5	231
25	Deslizamiento de escombros	Derecho	3.5	12.5	2.5	109.375
26	Deslizamiento de escombros	Derecho	4	3.5	1.5	21
27	Deslizamiento de escombros	Derecho	10.5	8	6	504
28	Deslizamiento de escombros	Derecho	7	6	4.5	189
29	Deslizamiento de escombros	Derecho	7.5	12	5.5	495
30	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
31	Flujo de escombros	Izquierdo	4	26	3	312
32	Caída de rocas	Izquierdo	SD	SD	SD	SD
33	Deslizamiento de suelo	Derecho	6	4	3	72
34	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	17	10.5	6	1071
35	Flujo de escombros	Derecho	3	21	2	126
36	Flujo de escombros	Derecho	6	22	5	660
37	Flujo de escombros	Derecho	4.5	21	2	189
38	Deslizamiento de suelo	Derecho	9	13	2	234
39	Deslizamiento de escombros	Derecho	9	14.5	6	783
40	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	7.5	8	4	240
41	Deslizamiento de escombros	Derecho	6	9	3.7	199.8
42	Deslizamiento de escombros	Derecho	5	7.8	1.5	58.5
43	Deslizamiento de suelo	Derecho	8	6.5	4	208
44	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	3.5	7	3	73.5
45	Flujo de escombros	Derecho	2.5	23	4	230
46	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
47	Caída de rocas	Derecho	1	1.5	1	1.5
48	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
49	Deslizamiento de suelo	Derecho	6	12	5	360
50	Deslizamiento de escombros	Derecho	9	11	1.5	148.5
51	Flujo de escombros	Derecho	2	14	3.5	98

52	Deslizamiento de asentamiento profundo	Derecho	9	15	8	1080
53	Caída de rocas	Derecho	1.5	1.5	1	2.25
54	Deslizamiento de escombros	Derecho	10	8	6	480
55	Deslizamiento de escombros	Derecho	6	7.5	5	225
56	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	4.8	8.2	4.5	177.12
57	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	3	7	2.5	52.5
58	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	7	6.5	4	182
59	Deslizamiento de asentamiento profundo	Izquierdo	18	23	9	3726
60	Deslizamiento de asentamiento profundo	Izquierdo	12	21	8.5	2142
61	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	11.5	9	5.5	569.25
62	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	4	4.5	2	36
63	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	3	3	4	36
64	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	8	10	6	480
65	Deslizamiento de escombros	Derecho	5	4	3.5	70
66	Caída de rocas	Derecho	3.5	1.5	1.5	7.875
67	Deslizamiento de escombros	Derecho	8	6.5	5	260
68	Deslizamiento de escombros	Derecho	7	12	4	336
69	Deslizamiento de escombros	Derecho	4	3.5	3.7	51.8
70	Deslizamiento de escombros	Derecho	7.3	8.5	4	248.2
71	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	6	8.5	5.5	280.5
72	Flujo de escombros	Derecho	3.5	21	3	220.5
73	Flujo de escombros	Izquierdo	2.8	11	2	61.6
74	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
75	Deslizamiento de asentamiento profundo	Derecho	10.5	11	7.5	866.25
76	Deslizamiento de escombros	Derecho	10.5	8	4.3	361.2
77	Deslizamiento de asentamiento profundo	Derecho	7	17.5	7	857.5
78	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	8	10.5	4	336
79	Flujo de escombros	Izquierdo	3	13.5	3	121.5
80	Deslizamiento de asentamiento profundo	Derecho	10.5	22	7.5	1732.5
81	Deslizamiento de escombros	Derecho	4.5	5.5	1.5	37.125
82	Deslizamiento de suelo	Izquierdo	7	8	4.5	252
83	Caída de rocas	Derecho	1.5	10	2	30
84	Deslizamiento de escombros	Derecho	6	9	3.5	189
85	Deslizamiento de escombros	Derecho	11	6.5	4	286
86	Deslizamiento de escombros	Derecho	7	11	2.5	192.5
87	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	6.8	5.5	5	187
88	Deslizamiento de escombros	Izquierdo	7	8	6	336
89	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
90	Caída de rocas	Derecho	SD	SD	SD	SD
91	Deslizamiento de escombros	Derecho	8.5	10.5	5	446.25
92	Deslizamiento de suelo	Derecho	11	5.5	8	484
93	Deslizamiento de escombros	Derecho	8	12.5	6.5	650

94	Deslizamiento de escombros	Derecho	6.5	11	4	286
Total de volumen en metros cúbicos						29,531.553

El resultado muestra que los procesos gravitacionales que se obtuvieron durante el trabajo de campo para realizar el inventario han aportado al río aproximadamente 29,531.553 metros cúbicos de materiales, los cuales en su mayoría han sido arrastrados por la corriente del río y en muy pocos casos, permanece parte de depósito en la base del proceso.

Este cálculo de volúmenes es una estimación aproximada, ya que fue realizada a partir de los datos que se obtuvieron en trabajo de campo. Las mediciones que se hicieron a los procesos gravitacionales para calcular el volumen fueron a través de un equipo con una precisión buena pero no precisa al cien por ciento que permitió obtener las medidas de manera práctica, es decir, de manera rápida y sencilla. Aunado a esto, es importante mencionar que, se tomaron las medidas a los escarpes en un momento posterior a los procesos, escarpes que pudieron haber sido mucho más grandes o pequeños por procesos erosivos naturales o incluso antrópicos antes de medirlos.

Por lo tanto, es lógico que el resultado sea una estimación aproximada, por lo que se concluye que el volumen calculado está por debajo del volumen potencial total que dichos procesos aportaron al río o que pueden llegar a aportar.

Por otra parte, se realizó la medición semiautomatizada para calcular el volumen de materiales mediante el uso del SIG a partir de los modelos digitales de elevación del área. El cálculo del volumen mediante el SIG se realizó para 19 procesos gravitacionales que representan el 20% del total (94) del inventario.

De los 19 procesos, 8 son flujos de escombros, 6 deslizamientos de escombros; 2 deslizamientos de suelo y 3 deslizamientos de asentamiento profundo. Es decir, el 84% son superficiales y el 16% de asentamiento profundo (Figura 83).

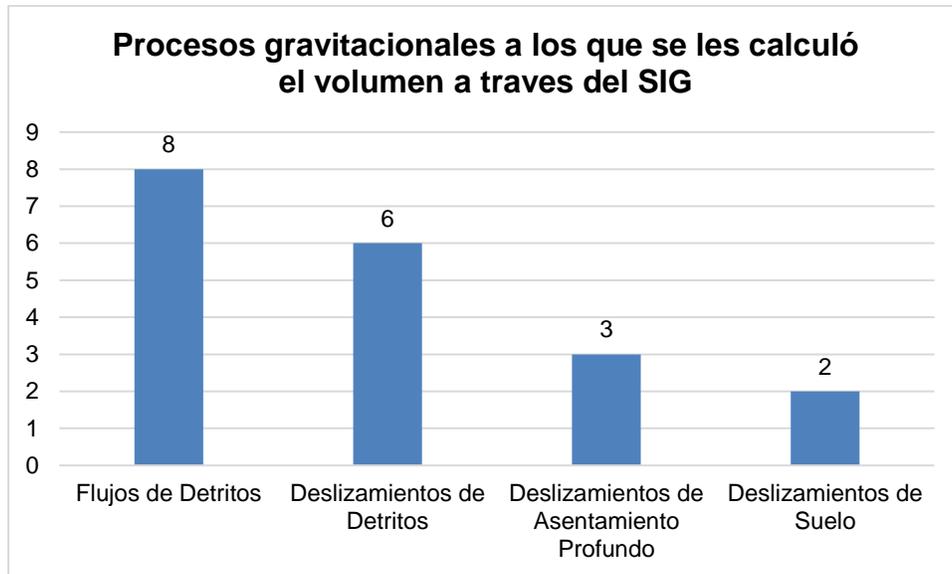


Figura 83. Gráfica de los 19 procesos a los cuales se les calculó el volumen de materiales a través de un SIG.

Para calcular el volumen se necesitó las áreas y profundidad de los procesos, a pesar de que en campo se realizó un levantamiento topográfico, no fue posible hacerlo en los 19 debido a la complejidad y riesgo de medir cada proceso gravitacional. En ese sentido, de los que no se realizó el levantamiento en campo (16), se identificaron en el mapa de relieve sombreado y se cartografiaron en forma de polígonos las partes de los deslizamientos para poder calcular su volumen mediante el SIG (Figura 84).

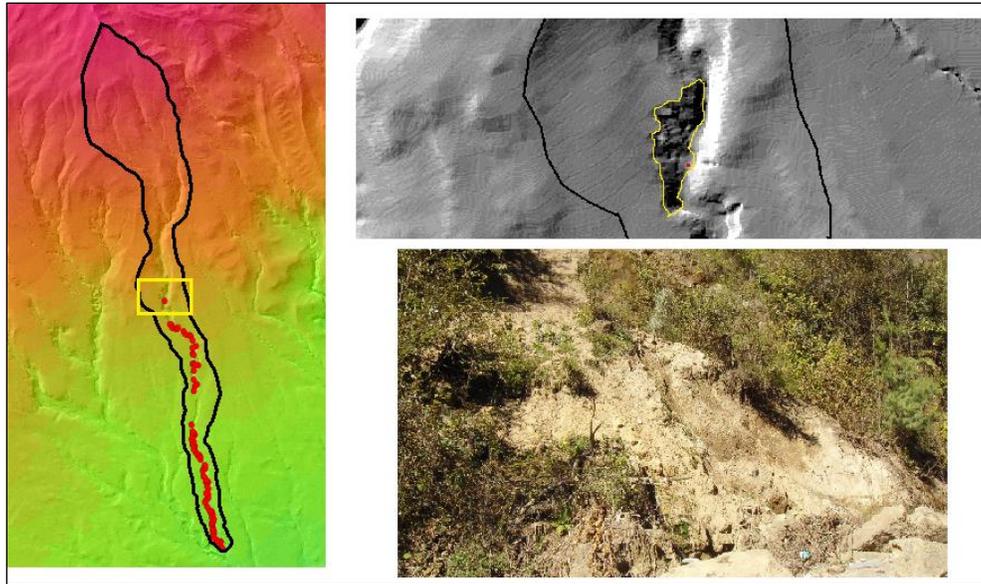


Figura 84. Trazo de los procesos gravitacionales en el modelo digital de elevación.
Fuente: Elaboración y captura propia.

A través del SIG y con las curvas de nivel se generaron dos modelos digitales de elevación para cada uno de los 19 deslizamientos, uno anterior a los procesos y el otro posterior a estos. La diferencia de ambos modelos digitales permitió calcular el volumen de los 19 procesos que se cartografiaron en forma de polígonos.

En la Tabla 17 se muestra el volumen calculado por el SIG de los 19 procesos gravitacionales, en ella observan las diferencias entre ambos cálculos y se puede distinguir claramente que en 18 procesos el cálculo del volumen es más de lo que se calculó manualmente, casi el doble e incluso el triple en algunos casos. Solo en un proceso el resultado salió por debajo de lo que se estimó manualmente.

Aunque las cifras resultantes no son exactas entre un método y otro, no se consideran mal ninguna de las dos, ya que la diferencia entre ellas no es muy lejana y es comprensible que el SIG sea más preciso que el cálculo manualmente con las mediciones que se obtuvieron en campo. Es por ello por lo que se aplicó una metodología semiautomática para que el trabajo del cálculo de volúmenes tenga más precisión y a su vez se pueda realizar tanto en trabajo de campo como en gabinete. La diferencia entre un método y otro en el resultado de los volúmenes de materiales es de 3,866.8126 metros cúbicos de material.

Tabla 17. Diferencias en el cálculo de volúmenes de materiales entre un método y otro.

No. de Proceso en el Inventario	Tipo de Proceso	Volumen m³ (cálculo mediante SIG)	Volumen m³ (cálculo manualmente)
5	Deslizamiento de escombros	364.8345	182
7	Deslizamiento de asentamiento profundo	4014.2146	3060
8	Flujo de escombros	254.1496	94.5
11	Flujo de escombros	83.1728	54
29	Deslizamiento de escombros	696.1453	495
31	Flujo de escombros	298.1157	312
40	Deslizamiento de suelo	332.9856	240
45	Flujo de escombros	281.1514	230
51	Flujo de escombros	111.8974	98
52	Deslizamiento de asentamiento profundo	1400.85	1080
62	Deslizamiento de escombros	74.1216	36
69	Deslizamiento de escombros	89.1685	51.8
71	Deslizamiento de suelo	345.2	280.5
72	Flujo de escombros	415.4796	220.5
73	Flujo de escombros	186.6532	61.6
76	Deslizamiento de escombros	396.38	361.2
79	Flujo de escombros	200.51	121.5
80	Deslizamiento de asentamiento profundo	3020.86	1732.5
81	Deslizamiento de escombros	49.1478	37.125
Total		12,615.0376	8,748.225

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue el implementar una metodología práctica para calcular de manera semiautomática los volúmenes de materiales aportados por procesos gravitacionales en la Cuenca del Río el Estado, así como la realización de un inventario de procesos gravitacionales, para que a partir de él se pudiera estimar el volumen aportado por dichos procesos. Con base en esto, se sabe que en México no existen muchos trabajos donde se calculen los volúmenes de materiales generados por procesos gravitacionales y tampoco donde desarrollen metodologías para el cálculo de estos.

Es por esto la importancia y el valor de esta investigación, porque proponiendo una metodología práctica y sencilla, ésta se puede aplicar a diferentes terrenos volcánicos donde se generen procesos gravitacionales y que permita a las autoridades inventariarlos y posteriormente, calcular el potencial de material que es aportado por dichos procesos para que se eviten desastres y pérdidas en la población.

En primer lugar, para cumplir con los objetivos de este proyecto, el trabajo de campo fue importante porque se reconoció el área de estudio y los factores a los que está sometida. En segundo lugar, se identificaron los procesos gravitacionales, se conoció su dimensión, su distribución, así como su recurrencia.

También hubo ciertas ventajas y limitaciones, por ejemplo, una gran ventaja fue que los recorridos se hicieron en los meses en que no había precipitaciones y el cauce del río se encontraba seco, lo que permitió que se pudiera recorrer el área para identificar los procesos y realizar las mediciones necesarias. Las limitaciones que se tuvieron fueron varias; 1) no poder usar imágenes de satélite de alta resolución debido al alto costo de éstas, 2) otra limitante es que al no tener imágenes de satélite de diferentes años, no se pudo hacer un comparativo del antes y después de la ocurrencia de los procesos, 3) para tomar las medidas de los procesos fue necesario caminar sobre ellos, aunque en algunos esa acción fue imposible debido a las condiciones topográficas y que no se contaba con el equipo necesario ni con la experiencia para escalar sobre los procesos.

A pesar de tener limitaciones, el trabajo de campo se complementó con el de gabinete procesando información en el SIG y obteniendo resultados que permitieron establecer la metodología semiautomática para calcular los volúmenes de sedimentos

La elaboración del inventario se basó en los recorridos durante el trabajo de campo, ya que en ellos se identificaron los procesos a lo largo de ambos márgenes del río y también se complementó con las ortografías del año 2008. La construcción de este permitió conocer la distribución en las diferentes formas del relieve y calcular el volumen de sedimentos que aportó cada proceso gravitacional a la cuenca.

El análisis geomorfométrico se realizó con uno de los tantos métodos que existen, ya que la geomorfología es una ciencia que se ha estudiado mucho y existen varios métodos aceptados. En este trabajo se utilizó el método de clasificación del relieve por origen propuesto por el ITC, en donde cada una de las formas del relieve del área de estudio se describieron por las observaciones realizadas en campo, por los trabajos que ya existen sobre el área y con los análisis en gabinete que se hicieron con la ayuda del SIG; como son el modelo digital de elevación, el mapa de relieve sombreado, el mapa altimétrico y el de pendientes.

Este análisis permitió conocer que en los valles fluviales y las laderas de montaña constituidas de arenas y lahares de pendientes medidas y suaves son en donde más se distribuyen los procesos gravitacionales y son las que más sedimentos aportan a la cuenca, lo anterior, debido a que dichas formas de relieve tienen un mayor potencial para que se generen los procesos debido a factores litológicos, climáticos, pendientes fuertes y deforestación principalmente. En primer lugar, se realizó la clasificación del relieve y posteriormente, se sobrepusieron los 94 procesos para conocer su distribución y calcular el aporte de sedimentos de manera manual con las mediciones que se realizaron a los procesos en campo y, en el SIG a los 19 procesos que se tomaron como muestra.

Por otro lado, el muestreo que se realizó permitió la inclusión y representatividad de cada proceso, excepto el de caída de rocas, fuera de eso, los resultados de las

19 muestras que se obtuvieron permitieron conocer de manera general el comportamiento de los procesos en el área de estudio.

La técnica para la toma de muestras de suelo de las cabeceras de los procesos gravitacionales no fue del todo sencilla debido a que para tomar cada muestra se subió a la cabecera de cada proceso y el terreno era muy inestable, por lo que se tuvo trabajar con arneses para evitar accidentes. Al momento de estar en el lugar de la toma de muestra, obtenerlas fue relativamente sencillo ya que los materiales, aunque estaban inalterados, su composición era muy heterogénea y poco consolidada, lo que permitió la mayoría se extrajeran con facilidad.

De cada cabecera se obtuvieron tres núcleos en dirección vertical con una distancia entre ellos de aproximadamente 15 cm. Una de las ventajas fue que todos los núcleos se extrajeron sin casi modificar su estructura original debido a la composición del suelo, y al realizarles los análisis a los tres núcleos, los resultados fueron similares y no hubo variabilidad.

La desventaja fue que al tomarse los núcleos muy cercanos uno del otro, solo permitió conocer las características de esa área del proceso y se concluyó que toda la cabecera tiene las mismas características. Una sugerencia que se da para la implementación de dicha metodología es que se tomen varios núcleos de suelo en diferentes partes de la cabecera para que se abarque más área y los resultados sean más precisos, aunque eso sugiere más trabajo en campo, gabinete y en laboratorio.

Para el análisis granulométrico, se tuvo que hacer el tamizado de cada muestra de suelo en diferentes tamices para su clasificación y posteriormente, vaciar los datos en una base de datos e interpretarlos. Para la conductividad hidráulica fue algo similar, se realizó el análisis a todos los núcleos y los resultados se vaciaron en una base y de igual forma se interpretaron los resultados junto con los de granulometría.

Los resultados obtenidos con estas dos pruebas permitieron definir que en primer lugar la composición de los materiales en el área de estudio es heterogénea, es decir, poco consolidados y cohesivos y que el agua se infiltra muy fácilmente por

dichos materiales, lo que hace entre otros factores que se generen procesos gravitacionales. La mayoría de los sedimentos que se aportan por los procesos, están constituidos principalmente por arenas en su mayoría, gravas y un porcentaje bajo de finos y de bloques de roca, producto del proceso de caída.

En lo que se refiere a la toma de medidas de los procesos gravitacionales en el trabajo de campo, es que una de las ventajas fue que el equipo (distanciómetro láser) era de fácil manejo y con un buen alcance (500 metros) ya que este permitió medir los procesos grandes debido a que toma medidas superiores a 10 metros. La precisión del equipo permitió obtener medidas con un margen de error de +- 50 cm.

Los procesos pequeños y medianos se midieron con cinta métrica o a pasos de 60 cm, lo cual afectó un poco las mediciones de largo, ancho y profundo y por ende el cálculo del volumen. A pesar de esto, el método fue práctico y se considera que los resultados obtenidos fueron relativamente confiables, ya que el error debido al instrumento de medida y el error debido al operador, fue mínimo.

El cálculo de volumen que se obtuvo con la diferencia de dos modelos digitales del terreno generados a partir de las curvas de nivel con ayuda del SIG resultó ser más alto que el que se calculó de manera manual, aunque no distan mucho y es lógico que el SIG sea más preciso a diferencia del método manual.

Las ventajas de calcular el volumen a través de un SIG es que se puede realizar en gabinete, de manera rápida y sencilla y preciso si se usan los datos correctos. Ahora bien, una desventaja es que el software que se utilizó no es tan accesible para cualquier persona y su uso depende del conocimiento que se tenga para trabajar con él.

En ambos métodos (manual y semiautomático) el mayor porcentaje de sedimentos son aportados por los valles fluviales, ya que aportan el 77% de sedimentos a la cuenca.

Una de las ventajas que tienen ambos métodos, es que pueden aplicarse a diferentes sistemas fluviales volcánicos donde los procesos gravitacionales sean recurrentes y las condiciones del terreno lo permitan, ya que los materiales utilizados son accesibles, precisos y fácil de usar. También existen limitantes como

las condiciones físicas y climáticas del área de estudio, ya que a veces durante el trabajo de campo había demasiada neblina que era imposible tener visibilidad y medir los procesos, o había procesos en los que era muy complicado tomar las medidas debido a su ubicación o en algunos, simplemente fue imposible obtener las medidas (como en la mayoría de los procesos de caída de rocas, ya que se localizaban en escarpes muy altos).

Se considera que ambos métodos tienen buen grado de certeza debido a que se realizaron de manera correcta, con instrumentos de buena calidad y con el apoyo de profesionales en la materia.

El hecho de que el cálculo sea para tan solo un momento en el tiempo tiene ventajas y desventajas; una ventaja es que el cálculo puede realizarse en diferentes épocas (por ejemplo, años) y hacer una comparación de la variabilidad de los sedimentos aportados en diferentes años. Una desventaja es que debido a la dinámica de la cuenca, es posible que un cálculo pueda variar mucho en un mismo año, es decir, si se calcula el volumen de materiales en época de sequías el volumen pueden ser menor considerablemente en comparación si se hace en época de lluvias, ya que las fuertes precipitaciones en conjunto con otros factores, pueden generar procesos gravitacionales o activen los que ya estaban y el aporte de sedimentos puede ser mayor en comparación con el que se hizo meses atrás.

El cálculo que se realizó se hizo para los procesos gravitacionales que se identificaron en el área, pero la temporalidad de estos es diferente, es decir, no todos los deslizamientos desplazaron el material al mismo tiempo sobre el cauce. La estimación que se calculó es lo que potencialmente puede desplazarse en un evento extraordinario de lluvias intensas, en donde varios procesos se activan y desplazan material al cauce del río

El cálculo de volúmenes del área de estudio ayudará en la planeación a las autoridades competentes para la mitigación de riesgos, ya que el saber el porcentaje o volumen de sedimentos, les permitirá conocer si dichos sedimentos al ser arrastrados por el agua pueden provocar afectaciones en la parte baja de la cuenca y no solamente en la cuenca del Río El Estado, sino también en otra área que se

localice en la parte baja de los sistemas fluviales volcánicos donde se presenten procesos gravitacionales.

Es necesario mencionar que, el volumen calculado es una estimación aproximada y está muy por debajo del total que dichos procesos han aportado o pueden llegar a aportar. No obstante, el tener un aproximado nos da una idea del potencial que presenta la cuenca y permitirá realizar una planeación territorial adecuada.

Se concluye que la hipótesis planteada en este trabajo ha sido probada, ya que confirma que los sedimentos y/o materiales que los procesos gravitacionales aportan al cauce del río si se pueden cuantificar de manera semiautomática a partir de medidas tomadas a los procesos en trabajo de campo y a través del modelo digital de elevación, con la ayuda de un SIG. Es claro que existen ciertas limitaciones respecto a la metodología aplicada y que tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, al ser un método que se realiza en campo y en gabinete, se complementan. Se considera que es una metodología integral, en donde se realizan varios análisis para llegar a un objetivo específico pero que en el proceso de la investigación se obtienen resultados importantes.

Finalmente, esta metodología se puede mejorar siguiendo las mismas técnicas, pero tal vez con los avances de la tecnología se pueda emplear equipo y software más precisos y accesibles, para que el método sea más preciso, confiable, rápido y pueda ser utilizado principalmente por las autoridades para la prevención de desastres y que la población no se vea afectada.

Otra propuesta de mejora a dicha metodología en lo personal, sería implementar el factor social, es decir, incluir un análisis de cómo perciben los procesos gravitacionales la población que vive en los alrededores del área de estudio, para que tengan por un lado el conocimiento de cómo actuar en caso de que se generen procesos gravitacionales estando presentes, y por otro lado, el que sepan que dadas las condiciones del área, pueden mitigar dichos procesos no deforestando y reforestar las áreas donde no haya vegetación que fije el suelo.

REFERENCIAS

- Alanís, A. R. M. (2018). Influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera en la subcuenca del Río-Chiquito Barranca del Muerto, Volcán Pico de Orizaba. Tesis de Doctorado en Geografía, Posgrado en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ayala, F. J., Andreu Fe, M., Ferrer, M., de Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gómez, J., Sanpedro, J. y Cienfuegos, F.J. (1987). *Manual de Taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Becerra, C. (2006). Análisis de riesgo natural por remociones en masa, carretera El Cobre, División El Teniente. Rancagua, Chile. Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).
- Blahut, J., Van Westen, C.J., Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, 119 (1-2), 36-51.
- Borgatti, L. y Soldati, M. (2005). Fenomeni Franosi. En Panizza, M. (Ed.). *Manuale de Geomorfología Applicata* (pp. 88-123). Milán: Franco Angeli.
- Bromhead, E.N. (1986). *The stability of slopes*. Nueva York: Surrey University Press.
- Brunsdon, D. (1993). Mass movement; the research frontier and beyond: a geomorphological approach. *Geomorphology*, 7, 85-128.
- Cardinali, M., Ardizzone, F., Galli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2000). Landslides triggered by rapid snow melting: the December 1996-January 1997 event in Central Italy. Proceedings of the EGS Plinius Conference Held, (January), 439–448.
- Cardona, K., & Giraldo, I. (2016). Validation of landslide assessment models by means of landslide inventories at sub-regional scales. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/57220/1/1017193962.2016.pdf>

Carrasco-Núñez, G., Ban, M., (1994). Geologic map and structure sections of the summit area of Citlaltépetl volcano, México with summary of the geology of the Citlaltépetl volcano summit area: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras, 9, 1 mapa, texto explicativo.

Carrasco-Núñez, G., 2000, Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México, en: Delgado- Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M., (eds.), Cenozoic volcanism and tectonics of México: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 334, 247-262.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2004). *Guía básica para la elaboración de mapas estatales y municipales de peligros de riesgos*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres y Secretaría de Gobernación.

Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T., & El Hamdouni, R. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341–411.

Comisión Nacional del Agua. (2018). Subdirección General Técnica. Disponibilidad de cuencas hidrológicas 2018. Página electrónica.

<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas>

Comisión Nacional del Agua. (2019). Subdirección General Técnica. Regiones hidrológicas 2019. Página electrónica.

<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrologicas#&ui-state=dialog>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2008). Página electrónica.

<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

Concha-Dimas, A., Cerca, M., Rodríguez-Elizarrarás, S. y Watters, R. J. (2005). Geomorphological evidence of the influence of pre-existing basement

structure on emplacement and deformation of volcanic edifices at the Cofre de Perote-Pico de Orizaba chain and implications for avalanche generation. *Geomorphology*, 72, 19-39.

Crozier, M.J. (1975). Techniques for the morphometric analysis of landlips. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 17, 78-101.

Crozier, M. J. (1986). *Landslides; Cause, Consequences and Environment*. Londres: Croom Helm.

Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. En Turner, A. K., Schuster, R. L. (Eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Spec. Rep.-Transp. Res. Board, 247.

De la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltépetl (Pico de Orizaba) Volcano, eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 307-318.

Departamento de Recursos Naturales del estado de Washington (DNR). Forest Practices Division, (2006). *Landslide Hazard Zonation (LHZ) Mapping Protocol*, version 2.0.

EPOCH (European Community Programme). (1993). En Flageollet, J. C. (Ed.), *Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, 3 vols.

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 99-111.

<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.014>

Flores, Delgadillo, L. y Alcalá, Martínez, J.R (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*, Laboratorio de Física de Suelos. Departamento de Edafología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

García, Enriqueta. (1998). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Carta Climática*, escala 1:1,000,000.

- García, Enriqueta. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Quinta Edición. Instituto de Geografía, UNAM. 90 pp.
- Goudie, A.S. (Ed.). (2004). *Encyclopedia of geomorphology*. Nueva York: Routledge.
- Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M. y Rossi, M. (2009). Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 22-229.
- Harp, E. L., & Jibson, R. W. (1996). Landslides triggered by the 1994 Northridge, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(1B), S319--S332. article.
- Harp, E. L., Hagaman, K.W., Held, M.D. y Mackenna, J. P. (2002). *Inventario digital de deslizamientos de tierra y los depósitos provocados por éstos que causó el paso del huracán Mitch en Honduras*. Denver: Departamento Interior de los Estados Unidos.
- Hauser, A. (1994). Remociones en masa en Chile. (mass wasting in Chile). *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 31(3), 159. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)90783-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)90783-8).
- Hervás, J., Bobrowsky, P. (2009). Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk. En Sassa, K. Canuti, P. (Eds.). *Landslides-Disaster Risk Reduction* (pp.321-349). Berlin: Springer.
- Hutchinson, J. N. (1968). Mass movement. En Fairbridge, R. W. (Ed.). *The Encyclopedia of Geomorphology* (pp. 688-695). Nueva York: Reinhold.
- Hutchinson, J. N. (1988). Morphological geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. En Bonnard, C. (Ed.). *Landslides. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, 1 (pp. 3-35).
- Hubbard, B.E. (2001). *Volcanic Hazard Mapping Using Aircraft, Satellite and Digital Topographic Data: Pico de Orizaba (Citlaltépetl)* (Tesis doctoral). State University of New York, México, Buffalo, Nueva York.

- Hubbard, B.E., Sheridan, M.F., Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R. y Rodríguez, S. (2007). Comparative lahar hazard mapping at Volcán Citlaltépetl, Mexico, using SRTM, ASTER and DTED-1 Digital Topography. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160 (1), 99-124.
- Ibsen, M. L., Brunsden, D., Bromhead, E. y Collinson. (1996). Slab slide. En: Dikau, A. Brunsden, D. Shortt, L. e Ibsen, M. L. (Eds.). *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*. International Association of Geomorphologists, 5, (pp. 64-77), Chichester: John Wiley and Sons.
- INEGI. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2004). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología*. México: INEGI.
- INEGI. ((Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso de suelo y vegetación. Escala 1:250,000: Serie VI, México*.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1995). *Edafología, escala 1:1,000,000*.
- Kalderon-Asael, B., Katz, O., Aharonov, E., & Marco, S. (2008). Modeling the relation between area and volume of landslides. Report for Steering Committee for Earthquakes, Jerusalem, Israel.
- La Jornada (2004). Página electrónica:
<https://www.jornada.com.mx/2004/12/30/010n1pol.php>
- Legorreta-Cuevas, H. (2012). Comportamiento de Suelos. Tema 3. Calsificación de Suelos (Granulometría, Límites de Consistencia y SUCS). División de Ingenierías Civil y Geomática, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Legorreta-Paulin, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, J., Paredes, M. y Aceves, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (2), 343-354.

- Legorreta-Paulín, G., Bursik, M., Zamorano, O.J.J., Lugo, Hubp. J., Martínez. H.B., y Bajo. Sánchez. J.V. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz.
- Legorreta-Paulín, G., Castro, R. M., & Arana-Salinas, L. (2020). Modelado de volúmenes utilizando análisis geomorfológico para el estudio de sedimentos aportados por deslizamientos en el flanco sur del Volcán Pico de Orizaba, México. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 37(1), 80-88.
- Lugo, Hubp, J. (1989). Diccionario geomorfológico, Instituto de Geografía y Coordinación de -ciencias, UNAM, México.
- Lugo, Hubp, J. (2011). Diccionario geomorfológico, Instituto de Geografía. Geografía para el Siglo XXI, Serie: Textos universitarios, núm. 7, México.
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario*, LVII (3), 379-424.
- Meijerink, Allard, M.J. (1988). Data adquisición and Data Capture Trough Terrain Mapping Units. *ITC Journal*, Enschede, Núm 1.
- Michel, J., Dario, C., Marc-Henri, D., Thierry, O., Marina, P. I., & Bejamin, R. (2020). A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes. *Engineering Geology*, 267, 105478.
- Mora y Varhson. (1991). Susceptibilidad por Deslizamiento en Nicaragua. Managua: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Ineter)/BGR.
- Mooser, F., Meyer-Abich, H., McBirney, A. R., 1958, Catalogue of the active volcanoes of the world including solftara fields. Part VI Central America: Napoli International Volcanology Asociation, 1-36.
- Obando, T. R. (2009). Evaluación de la amenaza por movimientos de masas al Noreste de Jinotega (Nicaragua). Informe, Dirección General de Geofísica. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), 21 pp.

- Peark, M.R., Ng, K.Y. y Zhang, D.D. (2005). Landslide and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. *Journal of Asian Earth Science*, 25, 821-836.
- Rodríguez, S. R., González, I. M. y Hernández, J. L. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana*, LVIII (2), 223-236.
- Rodriguez, É., Sandoval, J., Chaparro, J., Trejos, G., Medina, E., Ramírez, K., Ruiz, G. (2007). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Retrieved from www.imprenta.gov.com
- Salinas, M. (2004). Métodos de Muestreo. Ciencia UANL, enero-marzo, año/vol. VII, número 001. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México pp. 121-123.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). (2015). Programa de Prevención de Riesgos en los Asentamientos Humanos (PRAH).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2017). Página electrónica: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/parque-nacional-pico-de-orizaba-conocelo>
- Secretaría de Protección Civil. (2010). Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz. En Mora González, I., Morales Barrera, W. y Rodríguez Elizarrarás, S., (Comp.). Veracruz: Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, UNAM. IV. 39 mapas, escalas varias, Atlas en proceso de publicación.
- Servicio Geológico Mexicano. (2001). Carta Geologico-Minera E14-6 Orizaba, escala 1:250,000.

- Sheridan, M., Carrasco-Núñez, G., Hubbard, B., Siebe, C., Rodríguez, S. (2002). Mapa de peligros volcánicos del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba), Escala 1:250000. México: UNAM, Gobiernos de los Estados de Puebla y Veracruz.
- Skempton, A.W. y Hutchinson, J. N. (1969). Stability of natural slope and embankment foundations. En Seventh International Conference on Soils Mechanics and Foundations Engineering (pp. 291-340). Ciudad de México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, State of Art Volume.
- Strahler, A.N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. Bulletin of the Geological Society of America, 67, pp. 571-596.
- Tapia-Varela, G., y López-Blanco, J. (2002). Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México a escala 1:10,000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 19, núm. 1., pp. 50-65. UNAM.
- Tiga, J. (2013). Análise Espacial e Estatística dos Movimentos de Massa Deflagrados pelas Chuvas dos dias 11 e 12 de Janeiro de 2011 na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-220/13. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tricart, J. (1974). *Le Modelé des Région Séches*. París: SEDES.
- Tarback, E.J. y Lutgens F.K. (2000). Ciencias de la Tierra. Trad. de 6ª ed. (1999). España: Prentice Hall.
- Varnes, D.J. (1958). Landslide types and processes. En Eckel, E.B. (Ed.). Landslides and Engineering Practice (pp. 20-47) Highway Research Board Special Report 29. NAS-NCR Publication 544.
- Varnes, D. J. (1978). Landslide types and processes. En Eckel, E.B. (Ed.). Landslides and Engineering Practice (pp. 20-47). Washington D.C.: National Research Council, Highway Research Board, Special Report, 29.
- Verstappen, H Th., and van Zuidam, R. (1991). El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos, ITC, publication number 10. Enschede, 87 pp.

- Yáñez-García C., García-Durán, S., 1982, Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz: México, Comisión Federal de Electricidad, Reporte Técnico, 96 p.
- Waitz, P., 1910-1911, Observaciones geológicas acerca del Pico de Orizaba: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 7, 67-76.
- Wenkey, D., Jen C.H., Böse, M. y Lin, J.C. (2011). Assessment of sediment delivery from successive erosion on stream-coupled hillslopes via a time series of topographic surveys in the central high mountain range of Taiwan. *Quaternary International*, 263, 14-25, doi:10.1016/j. quaint.2011.02.018.
- Wieczorek, G. F. (1996). Landslides triggering mechanisms. En Turner, A. K. y Schuster, R. L. (Eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 76-90). Special Report, 247 Washington: National Academic Press.
- Zaruba, Q. y Mencl, V. (1969). *Landslides and their Control*. Nueva York: Elsevier y Academia de Ciencia de Checoslovaquia.
- Zimbelman, D.R., Watters, R.J., Firth, I.R., Breit, G.N. y Carrasco-Núñez, G. (2004). Stratovolcano stability assessment methods and results from Citlaltépetl, Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 66, pp 6-79.

ANEXO I. INVENTARIO DE PROCESOS GRAVITACIONALES

Latitud/Longitud: 18°55'23.9986" - 97°15'5.0430"
Altitud: 2,641 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 34.375
Ancho: 5.5 m, **largo:** 2.5 m, **espesor:** 2.5 m

No. 1 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'25.4096"-97°15'5.5789"
Altitud: 2,648 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 3.75
Largo: 2.5 m, **alto:** 1.5 m, **ancho:** 1 m

No. 2 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'27.8890 - 97°15'5.8583
Altitud: 2,667 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 133.875
Ancho: 4.5 m, **largo:** 8.5 m, **espesor:** 3.5 m

No. 3 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'27.8220 - 97°15'6.0810
Altitud: 2,673 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 22.5
Ancho: 6 m, **largo:** 2.5 m, **espesor:** 1.5 m

No. 4 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'27.7623 - 97°15'6.3357
Altitud: 2,682 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 182
Ancho: 8 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 3.5 m

No. 5 Deslizamiento de detritos



Latitud/Longitud: 18°55'28.8278 - 97°15'7.4495
Altitud: 2,686 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 10
Largo: .5 m, **alto:** 2 m, **ancho:** 1 m

No. 6 Caída de rocas



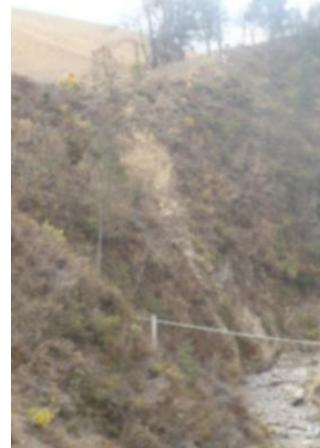
Latitud/Longitud: 18°55'28.7964 - 97°15'8.2132
Altitud: 2,695 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 3060
Ancho: 17 m, **largo:** 15 m, **espesor:** 12 m

No. 7 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°55'30.2179 - 97°15'9.1148
Altitud: 2,710 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 94.5
Ancho: 21 m, **largo:** 1.5 m, **espesor:** 3 m

No. 8 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'31.4038 - 97°15'9.5201
Altitud: 2,719 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 35
Largo: 4 m, **ancho:** 2.5 m, **alto:** 3.5 m

No. 9 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'32.0037 - 97°15'9.2802
Altitud: 2,724 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 94.5
Ancho: 7 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 5 m

No. 10 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'33.1892 - 97°15'9.3209
Altitud: 2,735 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 54
Ancho: 4 m, **largo:** 9 m, **espesor:** 1.5 m

No. 11 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'33.7134 - 97°15'9.7422
Altitud: 2,736 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 286
Ancho: 6.5 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 4 m

No. 12 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'33.4312 - 97°15'9.4848
Altitud: 2, 737 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 1.5
Largo: 1.5 m, **alto:** 1 m, **ancho:** 1 m

No. 13 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'34.7212 - 97°15'9.7874
Altitud: 2,7 44 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midieron los bloques porque eran muchos fragmentos pequeños.

No. 14 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'34.5332 - 97°15'9.8840
Altitud: 2,747 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midieron los bloques porque eran muchos fragmentos pequeños.

No. 15 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'36.2547 - 97°15'10.2868
Altitud: 2, 744 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 11.25
Ancho: 4.5 m, **largo:** 2.5 m, **espesor:** 1 m

No. 16 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'36.5432 - 97°15'10.4311
Altitud: 2,745 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midieron los bloques porque eran muchos fragmentos pequeños.

No. 17 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'37.4270 - 97°15'9.7138
Altitud: 2,745 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 15.048
Ancho: 3.8 m, **largo:** 2.20 m, **espesor:** 1.80 m

No. 18 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'37.9729 - 97°15'9.6067
Altitud: 2,744 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 48.16
Ancho: 8 m, **largo:** 4.3 m, **espesor:** 1.40 m

No. 19 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'38.7378 - 97°15'9.6266
Altitud: 2,744 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 87.75
Ancho: 6.5 m, **largo:** 4.5 m, **espesor:** 3 m

No. 20 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'39.16509 - 97°15'8.9929
Altitud: 2,744 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 204.75
Ancho: 9 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 3.5 m

No. 21 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'39.9016 - 97°15'10.3321
Altitud: 2,746 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 15
Ancho: 3 m, **largo:** 5 m, **espesor:** 1 m

No. 22 Deslizamiento superficial de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'41.0341 - 97°15'9.7941
Altitud: 2,748 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 15
Largo: 2 m, **alto:** 3 m, **ancho:** 2.5 m

No. 23 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'42.5679 - 97°15'10.1957
Altitud: 2,752 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 231
Ancho: 11 m, **largo:** 6 m, **espesor:** 3.5 m

No. 24 Flujo de detritos



Latitud/Longitud: 18°55'42.3392 - 97°15'10.8719
Altitud: 2.753 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 109.375
Ancho: 3.5 m, **largo:** 12.5 m, **espesor:** 2.5 m

No. 25 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'42.7670 - 97°15'10.7612
Altitud: 2, 758 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 21
Ancho: 4 m, **largo:** 3.5 m, **espesor:** 1.5 m

No. 26 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'43.4273 - 97°15'11.1598
Altitud: 2,761 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 504
Ancho: 10.5 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 6 m

No. 27 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'44.8787 - 97°15'12.6495
Altitud: 2,769 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 189
Ancho: 7 m, **largo:** 6 m, **espesor:** 4.5 m

No. 28 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'47.0757 - 97°15'13.5083
Altitud: 2,744 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 495
Ancho: 7.5 m, **largo:** 12 m, **espesor:** 5.5 m

No. 29 Deslizamiento de detritos



Latitud/Longitud: 18°55'47.9921 - 97°15'13.0563
Altitud: 2,781 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midieron todos los bloques porque eran muchos fragmentos pequeños.

No. 30 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'49.3310 - 97°15'11.9507
Altitud: 2,773 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 312
Ancho: 4 m, **largo:** 26 m, **espesor:** 3 m

No. 31 Flujo de detritos



Latitud/Longitud: 18°55'50.6394 - 97°15'11.7446
Altitud: 2,766 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: SD
No se midieron todos los bloques porque eran muchos fragmentos pequeños

No. 32 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°55'51.1233 - 97°15'12.8405
Altitud: 2, 782 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 72
Ancho: 6 m, **largo:** 4 m, **espesor:** 3 m

No. 33 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'53.4043 - 97°15'11.7467
Altitud: 2, 784 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 1071
Ancho: 17 m, **largo:** 10.5 m, **espesor:** 6 m

No. 34 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'54.9148 - 97°15'12.2032
Altitud: 2, 789 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 126
Ancho: 3 m, **largo:** 21 m, **espesor:** 2 m

No. 35 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'56.6309 - 97°15'12.1145
Altitud: 2, 794 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 660
Ancho: 6 m, **largo:** 22 m, **espesor:** 5 m

No. 36 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'56.5766 - 97°15'12.7883
Altitud: 2,800 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 189
Ancho: 4.5 m, **largo:** 21 m, **espesor:** 2 m

No. 37 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'57.1656 - 97°15'13.0689
Altitud: 2,800 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 234
Ancho: 9 m, **largo:** 13 m, **espesor:** 2 m

No. 38 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'57.6779 - 97°15'13.2050
Altitud: 2,804 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 783
Ancho: 9 m, **largo:** 14.5 m, **espesor:** 6 m

No. 39 Deslizamiento de escombros



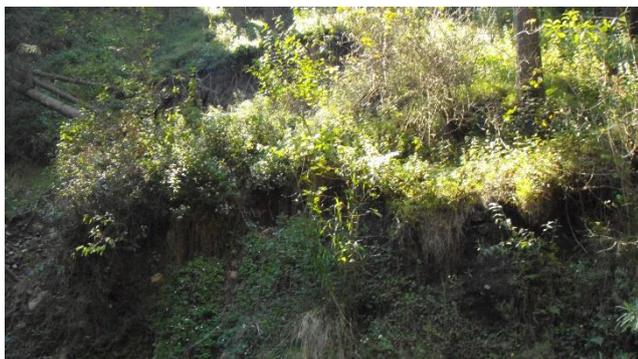
Latitud/Longitud: 18°55'58.1610 - 97°15'13.0867
Altitud: 2,810 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 240
Ancho: 7.5 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 4 m

No. 40 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°55'59.5572 - 97°15'13.8656
Altitud: 2, 813 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 199.8
Ancho: 6 m, **largo:** 9 m, **espesor:** 3.7 m

No. 41 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°55'59.7935 - 97°15'13.9437
Altitud: 2, 815 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 58.5
Ancho: 5 m, **largo:** 7.8 m, **espesor:** 1.5 m

No. 42 Deslizamiento de escombros



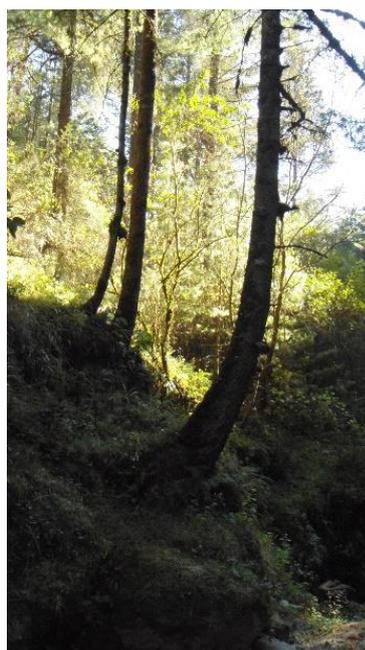
Latitud/Longitud: 18°56'2.2304 - 97°15'14.4168
Altitud: 2, 830 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 208
Ancho: 8 m, **largo:** 6.5, **espesor:** 4 m

No. 43 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'3.4483 - 97°15'14.2361
Altitud: 2, 841 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 73.5
Ancho: 3.5 m, **largo:** 7 m, **espesor:** 3 m

No. 44 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'3.1571 - 97°15'13.6299
Altitud: 2,843 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 230
Ancho: 2.5 m, **largo:** 23 m, **espesor:** 4 m

No. 45 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'4.1230 - 97°15'13.5961
Altitud: 2,845 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midieron todos los bloques porque eran muchos fragmentos grandes.

No. 46 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'4.8049 - 97°15'13.7225
Altitud: 2,847 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 1.5
Largo: 1 m, **alto:** 1.5 m, **ancho:** 1 m

No. 47 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'7.5744 - 97°15'15.6896
Altitud: 2,859 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midió el área de desprendimiento de las rocas.

No. 48 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'9.7156 - 97°15'16.4045
Altitud: 2, 868 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 360
Ancho: 6 m, **largo:** 12 m, **espesor:** 5 m

No. 49 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'8.8272 - 97°15'15.8266
Altitud: 2, 868 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 148.5
Ancho: 9 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 1.5 m

No. 50 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'9.2102 - 97°15'16.7955
Altitud: 2, 871 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 98
Ancho: 2 m, **largo:** 14 m, **espesor:** 3.5 m

No. 51 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'10.3242 - 97°15'17.4823
Altitud: 2, 872 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 1,080
Ancho: 9 m, **largo:** 15 m, **espesor:** 8 m

No. 52 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°56'11.0943 - 97°15'18.1130
Altitud: 2, 871 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 2.25
Largo: 1.5 m, **alto:** 1.5 m, **ancho:** 1 m

No. 53 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'12.0578 - 97°15'18.5478
Altitud: 2, 870 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 480
Ancho: 10 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 6 m

No. 54 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'12.7786 - 97°15'18.9708
Altitud: 2, 870 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 225
Ancho: 6 m, **largo:** 7.5 m, **espesor:** 5 m

No. 55 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'14.3493 - 97°15'18.5460
Altitud: 2, 871 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 177.12
Ancho: 4.80 m, **largo:** 8.2 m, **espesor:** 4.5 m

No. 56 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'14.0906 - 97°15'18.7850
Altitud: 2, 870 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 52.5
Ancho: 3 m, **largo:** 7 m, **espesor:** 2.5 m

No. 57 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'14.9760 - 97°15'19.4886
Altitud: 2, 873 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 182
Ancho: 7 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 4 m

No. 58 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'15.0004 - 97°15'19.3631
Altitud: 2, 873 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 3726
Ancho: 18 m, **largo:** 23 m, **espesor:** 9 m

No. 59 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°56'15.6673 - 97°15'19.4394
Altitud: 2, 877 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 2142
Ancho: 12 m, **largo:** 21 m, **espesor:** 8.5 m

No. 60 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°56'16.2499 - 97°15'19.1365
Altitud: 2, 878 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 569.25
Ancho: 11.5 m, **largo:** 9 m, **espesor:** 5.5 m

No. 61 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'17.3106 - 97°15'19.8725
Altitud: 2, 878 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 36
Ancho: 4 m, **largo:** 4.5 m, **espesor:** 2 m

No. 62 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'18.5327 - 97°15'19.3474
Altitud: 2, 880 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 36
Ancho: 3 m, **largo:** 3 m, **espesor:** 4 m

No. 63 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'19.6893 - 97°15'18.2219
Altitud: 2, 887 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 480
Ancho: 8 m, **largo:** 10 m, **espesor:** 6 m

No. 64 Deslizamiento de escombros



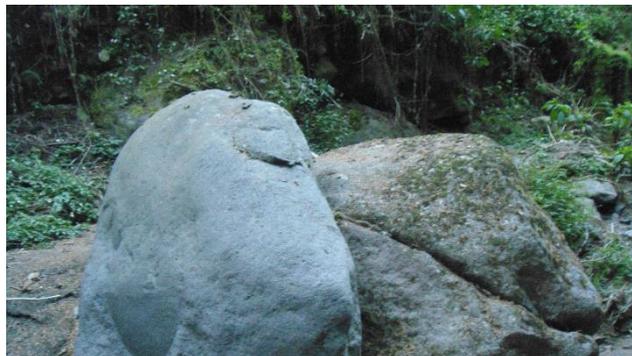
Latitud/Longitud: 18°56'20.2026 - 97°15'19.5728
Altitud: 2, 890 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 70
Ancho: 5 m, **largo:** 4 m, **espesor:** 3.5 m

No. 65 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'20.5960 - 97°15'19.2143
Altitud: 2, 894 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 7.875
Largo: 3.5 m, **alto:** 1.5 m, **ancho:** 1.5 m

No. 66 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'21.4319 - 97°15'19.5864
Altitud: 2, 894 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 260
Ancho: 8 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 5 m

No. 67 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'24.5040 - 97°15'19.8498
Altitud: 2, 899 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 336
Ancho: 7 m, **largo:** 12 m, **espesor:** 4 m

No. 68 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'40.6014 – 97°15'19.0635
Altitud: 2, 944 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 51.8
Ancho: 4 m, **largo:** 3.5 m, **espesor:** 3.70 m

No. 69 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'43.0476 – 97°15'18.4476
Altitud: 2, 952 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 248.2
Ancho: 7.30 m, **largo:** 8.5 m, **espesor:** 4 m

No. 70 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'44.2027 - 97°15'17.5523
Altitud: 2, 958 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 280.5
Ancho: 6 m, **largo:** 8.5 m, **espesor:** 5.5 m

No. 71 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°56'46.4634 - 97°15'18.7029
Altitud: 2, 963 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 220.5
Ancho: 3.5 m, **largo:** 21 m, **espesor:** 3 m

No. 72 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'50.7552 - 97°15'19.0064
Altitud: 2, 972 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 61.6
Ancho: 2.80 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 2 m

No. 73 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'53.0331 - 97°15'18.5001
Altitud: 2, 977 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: SD
No se midió el área donde se desprendieron las rocas.

No. 74 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°56'53.6858 – 97°15'19.1748
Altitud: 2, 979 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 866.25
Ancho: 10.5 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 7.5 m

No. 75 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°56'53.8309 – 97°15'19.3999
Altitud: 2, 983 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 361.2
Ancho: 10.5 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 4.30 m

No. 76 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'53.9712 - 97°15'19.1157
Altitud: 2, 989 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 857.5
Ancho: 7m, **largo:** 17.5 m, **espesor:** 7 m

No. 77 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°56'53.4356 - 97°15'17.0222
Altitud: 2, 998 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 336
Ancho: 8 m, **largo:** 10.5 m, **espesor:** 4 m

No. 78 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'58.3758 - 97°15'18.7955
Altitud: 2, 988 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 121.5
Ancho: 3 m, **largo:** 13.5 m, **espesor:** 3 m

No. 79 Flujo de escombros



Latitud/Longitud: 18°56'58.7425 - 97°15'19.2497
Altitud: 2, 992 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 1732.5
Ancho: 10.5 m, **largo:** 22 m, **espesor:** 7.5 m

No. 80 Deslizamiento de asentamiento profundo



Latitud/Longitud: 18°57'1.5578 - 97°15'19.5221
Altitud: 2,996 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 37.125
Ancho: 4.5 m, **largo:** 5.5 m, **espesor:** 1.5 m

No. 81 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'2.3143 - 97°15'17.9808
Altitud: 3,004 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 252
Ancho: 7 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 4.5 m

No. 82 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°57'5.1275 - 97°15'19.7708
Altitud: 3,022 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 30
Largo: 1.5 m, **alto:** 10 m, **ancho:** 2 m

No. 83 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°57'7.317 - 97°15'20.4627
Altitud: 3,034 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 189
Ancho: 6 m, **largo:** 9 m, **espesor:** 3.5 m

No. 84 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'7.3616 - 97°15'20.8492
Altitud: 3,033 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 192.5
Ancho: 11 m, **largo:** 6.5 m, **espesor:** 4 m

No. 85 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'8.1658 - 97°15'22.8709
Altitud: 3,044 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 187
Ancho: 7 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 2.5 m

No. 86 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'9.7786 - 97°15'23.6096
Altitud: 3,051 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 187
Ancho: 6.80 m, **largo:** 5.5 m, **espesor:** 5 m

No. 87 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°57'11.0861 - 97°15'26.5106
Altitud: 3,052 msnm
Margen del río: Izquierdo Volumen m³: 336
Ancho: 7 m, **largo:** 8 m, **espesor:** 6 m

No. 88 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°57'10.6546 - 97°15'27.3401

Altitud: 3,063 msnm

Margen del río: Derecho Volumen m³: SD

No se midió el área donde se desprendieron las rocas.

No. 89 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°57'10.8538 - 97°15'27.6467

Altitud: 3,070 msnm

Margen del río: Derecho Volumen m³: SD

No se midió el área donde se desprendieron las rocas.

No. 90 Caída de rocas



Latitud/Longitud: 18°57'11.1250 - 97°15'29.0172

Altitud: 3,076 msnm

Margen del río: Derecho Volumen m³: 446.25

Ancho: 8.5 m, **largo:** 10.5 m, **espesor:** 5 m

No. 91 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'12.6302 - 97°15'30.3108

Altitud: 3,074 msnm

Margen del río: Derecho Volumen m³: 484

Ancho: 11 m, **largo:** 5.5 m, **espesor:** 8 m

No. 92 Deslizamiento de suelo



Latitud/Longitud: 18°57'12.5348 - 97°15'29.6805
Altitud: 3,071 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 650
Ancho: 8 m, **largo:** 12.5 m, **espesor:** 6.5 m

No. 93 Deslizamiento de escombros



Latitud/Longitud: 18°57'24.2351 - 97°15'33.0296
Altitud: 3,062 msnm
Margen del río: Derecho Volumen m³: 286
Ancho: 6.5 m, **largo:** 11 m, **espesor:** 4 m

No. 94 Deslizamiento de escombros

