



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS EN EL RÍO EL
ESTADO, PUEBLA-VERACRUZ, MÉXICO”

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

BIÓL. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ PIÑA

DIRECTOR DE TESIS

DR. GABRIEL LEGORRETA PAULÍN INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Contenido:

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.	3
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	15
IV. OBJETIVO GENERAL.....	15
IV 1. OBJETIVOS PARTICULARES.	15
V. HIPÓTESIS.....	16
VI. JUSTIFICACIÓN.	16
CAPÍTULO 1. ÁREA DE ESTUDIO.....	17
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	27
2.1. TRABAJO DE GABINETE.....	29
2.2. TRABAJO DE CAMPO.	42
2.3. TRABAJO DE LABORATORIO.....	45
CAPÍTULO 3. RESULTADOS.	50
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.	71
BIBLIOGRAFÍA.	106

RESUMEN

En esta investigación se genera cartografía de susceptibilidad de deslizamientos mediante el modelo de laderas inestables, SINMAP; cuya metodología incluye la revisión de material cartográfico, el levantamiento de un inventario, la medición y modelación a través del SINMAP y su sucesiva validación. El inventario de la subcuenca “El Estado” está conformado por 113 deslizamientos. De ellos, 68 son deslizamientos de escombros, que representan el 60% del total, 20 son flujos de escombros (18 %), 16 son deslizamientos de asentamiento profundo (14 %), 5 son avalanchas de escombros (4 %) y 4 son caídas de rocas (4 %). Los deslizamientos se ubicaron en pendientes que superan los veinticuatro grados, en ambos márgenes del río; cuyas dimensiones varían de los 13 m², hasta los 2,500 m², además de áreas potenciales que alcanzan los 4,000 m².

El modelo SINMAP fue desarrollado a partir del promedio de 19 muestras, con base en características mecánicas similares como el ángulo de fricción interna y cohesión. Cualitativamente, las zonas que muestran el grado de estabilidad en el modelo, se presentan intercaladas entre sí en gran parte de la subcuenca. La zona inestable se distribuye en una extensa porción de la parte alta, limitándose solamente a las vertientes del cauce en la parte baja. Adyacente a la zona inestable se observan las zonas del límite más bajo y alto de estabilidad, sin presencia de zonas casi estable y moderadamente estable.

Cuantitativamente, se obtiene a partir de la matriz de error, la coherencia global de 49.99 % y la coherencia del productor de 52.05 %, que denotan una concordancia baja entre el inventario y el modelo, además de la coherencia del usuario de 1.10 %, donde el modelo sobreestima las zonas de deslizamientos, lo que implica que el uso del modelo SINMAP no es totalmente confiable en investigaciones de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en zonas volcánicas de México.

I. INTRODUCCIÓN.

Esta investigación plantea una metodología conformada por procedimientos y técnicas para evaluar la susceptibilidad de deslizamientos en el río “El Estado”, formando parte de un proyecto de investigación donde son evaluadas de igual forma, otras metodologías para probarlas y elegir la más robusta en terrenos volcánicos en México (Volcán Pico de Orizaba) y, que tenga un mayor grado de confiabilidad para medir la susceptibilidad de deslizamientos, que genera riesgo para la población que se encuentra asentada en estos sitios, la cual, asciende a 435,125 personas en un radio de 25 km² (INEGI, 2010).

Este trabajo se divide en 1) trabajo de gabinete, donde son revisados un marco teórico, que sirve como referencia para la identificación y clasificación de los deslizamientos en el valle; además, como fundamento para realizar los análisis de parámetros geotécnicos (conductividad hidráulica, corte directo (ángulo de fricción interna y cohesión) y granulometría) del material recolectado, así como para la adquisición y elaboración de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 2 metros, análisis de estabilidad en SINMAP y evaluación de la coherencia entre los modelos; todo lo anterior efectuado en Sistemas de Información Geográfica (SIG). También fueron revisadas y empleadas imágenes digitales e impresas (LANDSAT y SPOT), para realizar un reconocimiento de los deslizamientos en el área de estudio y la construcción de un inventario de deslizamientos (cartas topográficas digitales e impresas, escala 1:50,000 y ortofotos de 2008, escala 1:10,000). 2) trabajo de campo, que consistió en la toma de 19 muestras (numero estadísticamente válido que representa a todos los eventos) de los escarpes principales de algunos deslizamientos y 3) trabajo de laboratorio, para realizar los análisis de los parámetros geotécnicos al material y conocer los valores y criterios que posee en conductividad hidráulica, ángulo de fricción interna, cohesión y granulometría.

Esta investigación se realiza a partir de la necesidad que se tiene, de conocer el comportamiento que tienen los valles fluviales de la subcuenca del río “El estado” y otras subcuencas vecinas, respecto a los procesos gravitacionales o deslizamientos que ocurren en estos sitios, mediante la generación de cartografía en SINMAP, la cual, asigna clases de susceptibilidad que se simbolizan por tonalidades de color, a partir del índice de estabilidad de taludes con datos cartográficos, geotécnicos e hidrológicos, para evaluar la susceptibilidad del terreno.

Esta metodología es aplicada en terrenos volcánicos de México, que son escenarios donde se mantiene la ocurrencia de diversos fenómenos naturales (deslizamientos) y sociales; representando un riesgo a la población que desarrolla sus actividades en estas zonas. Ya que los deslizamientos ocurren cada año, provocando pérdidas en la economía, la infraestructura y en vidas humanas (Jian y Xiang-guo, 2009). Partiendo de esta premisa, es necesaria la realización de trabajos detallados en este tema, a fin de apoyar en la correcta planificación del territorio, al ubicar sitios vulnerables a peligros y desastres para las actividades humanas.

II. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.

Los deslizamientos, son procesos donde el material se mueve por factores como pendientes fuertes, suelo deleznable, carencia de cobertura vegetal, lluvias extremas, etc. (Van Zuidam, 1985; Tangestani, 2009). Para su estudio se emplean varios tipos de métodos, entre los que se encuentran el heurístico, estadístico y determinístico (Legorreta y Bursik, 2009). Con estos métodos se genera cartografía de susceptibilidad de deslizamientos. Esta cartografía sirve como referencia en la toma de decisiones por parte de las autoridades encargadas del tema (Hervás y Bobrowsky, 2009).

La evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos de un área, es esencial para entender la evolución del paisaje, siendo empleada para comprobar sucesos o medir el riesgo que representan para el ser humano y sus actividades (Galli *et al.*, 2008). La cartografía se realiza a distintas escalas que van desde lo local y regional, hasta lo nacional, dependiendo de los recursos con que se cuenten y las necesidades del proyecto (Guzzetti, 2000). Por ello, es necesario que se formen y capaciten especialistas en geomorfología y geología que tengan las competencias para identificar, reconocer, catalogar, clasificar y cartografiar dichos procesos (Dikau *et al.*, 1996).

Las investigaciones realizadas en el tema en diversos países, se han centrado en tratar de comprender los mecanismos que ocasionan los deslizamientos. En Italia, Galli *et al.*, (2008), comparan tres mapas de inventario de deslizamientos y realizan un estudio de los montes Apeninos, con los que se evalúa y propone un marco general para el análisis de los deslizamientos. El trabajo establece la descripción, ubicación, tipo y abundancia de los deslizamientos y determinan un modelo de susceptibilidad. Esto permite la comparación de la cartografía del inventario y del modelo, estableciendo las ventajas y limitaciones de las diferentes técnicas utilizadas para calcular el nivel de coincidencia. También en este artículo, se menciona que los inventarios de deslizamientos son esenciales para entender la evolución del paisaje y determinar la susceptibilidad y riesgo.

Además, han sido implementadas metodologías que incluyen SIG para la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos. En Oahu, Hawai, Sanjit y Aly, (2009), trabajaron con SINMAP para evaluar la estabilidad de la pendiente y detectar zonas predispuestas a ser inestables en 32 cuencas. Mencionan que la zona es propensa a fallar por factores como fuertes pendientes y precipitaciones abundantes, además del factor humano, con la construcción de infraestructura en estas zonas. En esta investigación se utilizaron datos geotécnicos e hidrológicos para emplearlos en las regiones de calibración, además de fotografías aéreas, un

MDE de 10 metros, un inventario que comprende desde 1949 hasta 2006 y que incluye 226 deslizamientos superficiales y trabajo de campo. Se calibró la información con base en observaciones realizadas en el área de estudio por los investigadores. En esta investigación, se concluye que SINMAP puede utilizarse para deslizamientos superficiales en terrenos volcánicos de clima tropical, pendientes fuertes y precipitaciones abundantes. Además de la mejora en las predicciones del modelo, con el uso de las propiedades del suelo y una mayor resolución en el MDE. El perfeccionamiento se propone para que haya una mayor confiabilidad en los resultados de los trabajos, coadyuvando con el tema de mitigación en zonas de riesgo de deslizamientos.

En 2009, Legorreta y Bursik implementan y evalúan la susceptibilidad dentro de un SIG, debido a que estos trabajos son escasos y hacen falta métodos precisos en los que se incluyan técnicas adecuadas, como el empleo de inventarios y parámetros geotécnicos del material, para que haya una mejor confiabilidad en los resultados. En esta investigación se evalúa SINMAP dentro del sistema LOGISNET, con la premisa de incluir variables geotécnicas de distintas capas de suelo en SINMAP, por medio de la suma de las fuerzas de las capas ejercidas a los planos de falla en la cartografía a escalas local y regional. Para realizar este análisis, cartografían más de 200 deslizamientos en el condado del Norte de California, USA. Estos deslizamientos representan una condición de peligro latente, debido a una mezcla de factores como la precipitación, material inestable provocado por la acción erosiva del ambiente y las pendientes abruptas. Este estudio busca perfeccionar la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos, usando SINMAP. Sus resultados muestran una predicción errada, generada por la escala a la que se trabaja y la resolución del MDE. Se menciona que aunque SINMAP está diseñado para pronosticar deslizamientos superficiales, se contaba con la certeza de que podría predecir la susceptibilidad a deslizamientos de otro tipo, como los de asentamiento profundo.

En México, de igual forma se han venido realizando investigaciones relacionadas con la estabilidad de laderas, donde se trata de implementar métodos adecuados para identificar la mecánica de los eventos, a fin de entender su evolución y prevenir desastres a partir de eventos ocurridos. Mora y Rojas, (2012), realizan una investigación en un deslizamiento ocurrido en San Juan de Grijalva, Chiapas, en 2007. Representan el desarrollo de la inconsistencia de la pendiente con el análisis de la estabilidad del material y la filtración del agua de precipitaciones abundantes. Se extraen dos muestras inalteradas del cuerpo del deslizamiento, utilizadas para conocer mediante estudios en laboratorio, las propiedades como peso específico del material, relación de vacíos, contenido de agua, conductividad hidráulica, granulometría y parámetros de resistencia (ángulo de fricción interna y cohesión) mediante pruebas triaxiales. La modelación se realizó con programas de cómputo especiales como *Plax Flow*, donde fue simulado el flujo del agua en material no saturado y *Geo*, en el que fue analizada la estabilidad de la pendiente, además del software *Geo Slope*, con el que analizan la estabilidad estructural del talud, con parámetros como el peso específico del material, la cohesión y el ángulo de fricción interna. Este estudio propone una metodología integral, que incluye la identificación de zonas específicas riesgosas en áreas urbanas y caminos, realizando un recorrido para recolectar algunos parámetros como: geometría del talud (vegetación, clima, estratigrafía, etc.), obtención de muestras, pruebas geotécnicas en laboratorio, adquisición de datos históricos de precipitaciones y el análisis de la estabilidad del material saturado. Con este estudio, se pudo determinar el riesgo a deslizamientos por lluvias extraordinarias, mediante la influencia de la humedad en los deslizamientos, además de identificar zonas con riesgo de fallo.

En el volcán Pico de Orizaba se han venido realizando investigaciones de procesos gravitacionales como Hubbard *et al.*, (1999); Capra *et al.*, (2002); Rodríguez *et al.*, (2006); Legorreta *et al.*, (2013); Legorreta *et al.*, (2014) y Aceves *et al.*, (2016), donde se abordan mecanismos de ocurrencia y el riesgo que

representan a la población. Hubbard *et al.*, (1999), mencionan que dentro de los factores que promueven los procesos gravitacionales en el Pico de Orizaba se encuentran además de sismos, el glacial de la cumbre y la actividad hidrotermal que se extiende en la zona, creando el escenario ideal para que el material falle, provocando el aumento en las presiones de poro durante las fuertes lluvias y huracanes.

Después, Capra *et al.*, (2002), realizan investigaciones similares en los volcanes del Cinturón Volcánico Trans-mexicano (CVTM), a partir de la comparación con el evento eruptivo del monte Santa Elena en Washington, USA. El objetivo de esta investigación fue presentar una recopilación de la ocurrencia de los depósitos de avalanchas de escombros y de otros tipos de flujos originados por el colapso de algunos volcanes, incluidos el Colima, Popocatepetl y Pico de Orizaba. Sugieren que estos estudios son importantes ya que representan riesgos volcánicos que se generan en volcanes activos, inactivos y latentes mediante terremotos, precipitaciones o simplemente por gravedad, donde no existe ningún aviso previo para su desencadenamiento.

Más tarde, Rodríguez *et al.*, (2006), realizan una investigación en la parte sur del volcán Pico de Orizaba, analizando un evento desastroso que se desencadenó en Junio de 2003. En este evento se conjugaron factores como precipitaciones extraordinarias y pendientes fuertes, generando el reblandecimiento del material y su posterior acarreo por el río Chiquito-Barranca del Muerto (Ch-BM) y que aguas abajo, causó pérdidas en la infraestructura en las ciudades de Nogales y Mendoza, así como de vidas humanas en Balasterra, Veracruz.

Posteriormente, Legorreta *et al.*, (2013), analizan los deslizamientos en la cuenca del río Ch-BM, realizando interpretaciones basadas en datos obtenidos por medio de un inventario con datos estandarizados y el análisis estadístico de Regresión Logística Múltiple (RLM). En el inventario utilizan variables y valores que incluyen

elevación, curvatura de la pendiente, geología y uso de suelo, georreferenciados e incorporados al SIG ArcMap. Utilizan también para la identificación multitemporal de los deslizamientos, fotos aéreas de dos fechas (1994, escala 1:20,000 y 2008, escala 1:10,000) y un DEM de 10 metros. Identifican en los deslizamientos: flujos de escombros, deslizamientos de escombros, deslizamientos antiguos de asentamiento profundo, flujos de tierra y caídas de rocas. El modelo de RLM fue comparado con el inventario para observar como el modelo predice los eventos apegados a la realidad, dando una sobre predicción, debido a las diferentes escalas de los mapas temáticos. Su análisis indica que hay limitantes que impiden que el modelo funcione de manera correcta. Algunas limitantes son la experiencia del usuario, la disponibilidad y fiabilidad de la información y, la resolución del MDE, que de alguna forma puede producir la pérdida de la representación cartográfica de los deslizamientos.

En estudios recientes, Aceves *et al.*, (2016), realizan investigaciones en la subcuenca “El Estado”, para el desarrollo de una metodología mediante SIG y RML, con la construcción de cartografía de susceptibilidad de deslizamientos, mencionando que hasta hoy, no se ha desarrollado una metodología confiable en ese sitio. Desarrollan la investigación mediante tres niveles: en el primer nivel, son utilizados mapas digitales con curvas de elevación a 10 metros, fotografías aéreas 1:10,000 y 1:20,000 y un MDE con resolución de 10 metros del INEGI; generando con este material el mapa hipsométrico, de pendientes y el morfográfico. En el segundo nivel, fue creado un inventario multitemporal a partir de ortofotos y trabajo de campo, utilizándose para caracterizar los deslizamientos, con información geológica, de relieve, uso de suelo, hidrológica y climática. Finalmente en el tercer nivel, se creó una base topográfica a partir de un MDE a 10 metros y cartas digitales 1:50,000, donde fueron obtenidas capas de altitud, pendiente, curvatura de la ladera, área de aporte, dirección de flujo y saturación, donde 2 de ellas se obtuvieron de mapas de geología y uso de suelo del INEGI a escala 1:250,000, que se capturaron en SIG con una resolución de píxel de 10 metros.

Los datos de los deslizamientos se obtuvieron de ortofotos que corresponden a 1991 (escala 1:20,000) y 2008 (escala 1:10,000). La evaluación multicolineal de las 8 variables usadas (altimetría, ángulo de pendiente, relieve, dirección de flujo, saturación, área de contribución de humedad, geología y uso de suelo) se realizó mediante el factor de inflación de la varianza. Para la cartografía de la susceptibilidad se utilizó la RML mediante el uso y combinación de LOGISTEN y SPSS. Para que el modelo de RML pudiera funcionar, se usaron muestras aleatorias de áreas con y sin deslizamientos. En este trabajo la RML muestra una confiabilidad del 79.81 % en la predicción de deslizamientos.

MATERIAL (SUELO): Forma depósitos finos sin consolidar, frágiles en presencia de agua, con diámetros muy pequeños (2 micras a 2 mm) (Selby, 1982). Mantiene propiedades que le confieren resistencia, manteniéndose estable o inestable. La resistencia al esfuerzo cortante está dada por el ángulo de fricción interna (desequilibrio de dos fuerzas con otra que añade magnitud y dirección) y la cohesión (enlaces intermoleculares de unión entre partículas). Sirven para conocer la estabilidad en un gráfico (Figura 1), donde el esfuerzo cortante τ indica el desplazamiento horizontal de las partículas y el esfuerzo normal σ , representa la carga. Ambas fuerzas se miden en K/cm^2 (Legorreta, 2010; Selby, 1982).

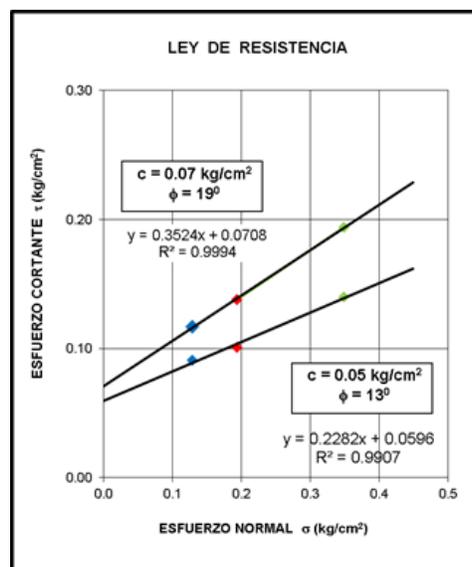


Figura 1. Gráfico de corte directo.

DESLIZAMIENTOS: Son procesos gravitacionales donde hay movimiento de material (roca, detritos o derrubios, o suelo). Por su parte, Varnes en 1958, los describe como movimientos de material edáfico y rocoso, además de elementos del entorno natural y antrópico. Su movimiento se ve potencializado con la ayuda de agentes de transporte (agua, viento o hielo), direccionando el material sobre un plano (Monroe, 2008). La velocidad de movimiento es influida por agentes de transporte, siendo desde casi imperceptibles (< 0.06 metros (m)/año), hasta extremadamente rápidos (3 m/segundo) (Cruden y Varnes, 1996; Monroe, 2008).

Influyen además factores internos y externos como precipitaciones abundantes o cambio de uso de suelo. Así como pendientes que superan los 8° (15 %) (Van Zuidam, 1985). La dirección del material puede ser lateral o perpendicular, clasificándose en: 1) de caída, donde suelos y rocas se mueven por diversos factores como la erosión, teniendo recorridos cortos y 2) de hundimiento, donde el suelo se mueve de manera masiva, dividiéndose en translacionales y rotacionales, donde la deformación del material y el contenido de agua juegan un papel importante (Selby, 1982). Éstas clasificaciones, han servido como base en trabajos de Alcántara, (2000); Dikau *et al.*, (1996); Hutchinson, (1988); EPOCH, (1993); entre otros. A continuación se muestran las clasificaciones empleadas.

Material	Descripción
Escombros	Contiene una proporción significativa de material grueso, en donde del 20 al 80 % de las partículas son mayores a 2 milímetros (mm)
Lodo	Material que en el 80 % o más de las partículas son más pequeñas que 0.06 mm, tamaño límite de partículas de sedimento
Roca	Masa dura o firme que estaba intacta y en su lugar natural antes de que el movimiento inicie
suelo	Agregado de partículas sólidas, generalmente minerales y fragmentos de roca, resultado de la erosión de la roca donde los poros se encuentran ocupados por gases o líquidos

Tabla 1. Tipo de material implicado en los procesos gravitacionales, Fuente: Varnes, (1978).

Mecanismos de movimiento	Tipos de movimiento involucrado		
	Tipo	Roca (<i>rock</i>)	Derrubio (<i>debris</i>)
Desprendimiento (<i>fall</i>)	Caída o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caída o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caída o desprendimiento de suelo (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de suelo (<i>soil topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Múltiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques no-rotacional (<i>rotational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de rocas en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelo (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Extensión lateral (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corriente de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujo de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansión lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales de roca (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales de derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: Alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: Rotación de flujos de tierras (<i>slump earth-flow</i>)

Tabla 2. Clasificación de los tipos de movimiento. Fuente: EPOCH, (1993), tomada de Varnes (1978) y Hitchinson (1988).

En seguida se muestra una figura idealizada con cada uno de los tipos de deslizamientos de hundimiento (translacional y rotacional), mencionándose además algunas características principales de cada uno de los tipos de movimientos (desprendimientos o caídas, deslizamientos, flujos y movimientos complejos).

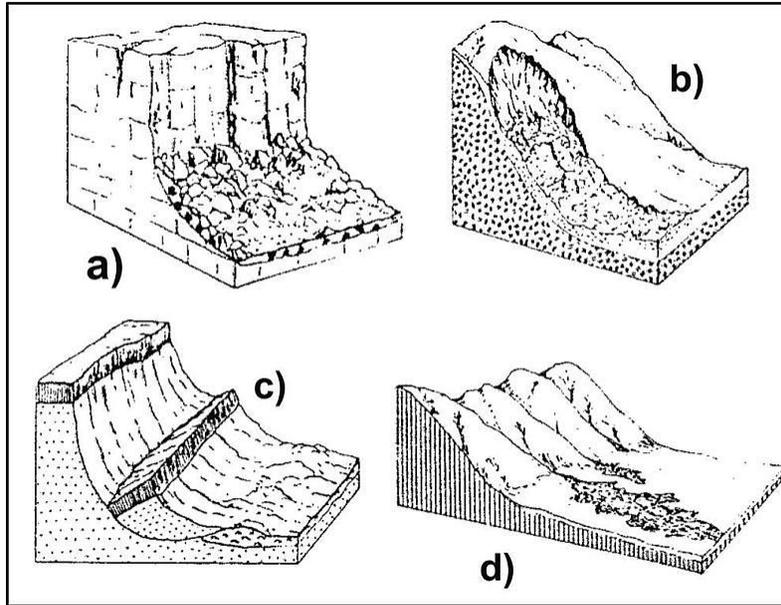


Figura 2. Tipos de movimientos: a).- Caída de rocas; b).- Avalancha de escombros; c).- Deslizamiento rotacional y d).- Flujo de escombros (Fuente: Selby, 1982).

Los **desprendimientos o caídas**, involucran la caída libre de material (rocas, detritos o suelo) de un escarpe o ladera inclinada, que generalmente supera los 30° o, es una pared de roca (corte por erosión fluvial) (Alcántara, 2000). El volumen depende de la separación laminar, disgregación o separación en bloques, correspondiendo a mayor masa en rocas, sufriendo alteraciones por quiebre o pulimento, siendo menor cuando se desliza y mayor cuando cae (Ochoa, 2004).

Los **deslizamientos**, son desplazamientos de material (roca, suelo o detritos) ladera abajo sobre una superficie de rompimiento, siendo favorecido por contactos inclinados igual que la pendiente, presentando en la mayoría de los casos inclinaciones arriba de 15° (Lugo, 1989). Los procesos inician con grietas de tensión, que son los futuros escarpes principales. De acuerdo con el tipo de movimiento, se denominan translacionales, rotacionales y planares. Los de tipo translacional ocurren en zonas semiplanas o convexas, incluidos los de rocas en bloques, de derrubios en bloques y translacionales de suelo. En los rotacionales la superficie puede ser cóncava o curva, con deformación muy baja, consecuentemente los movimientos pueden ocasionar retroceso de la corona,

aumentando su huella y su expansión, donde la velocidad depende del material y la morfología del relieve. En los planares, la superficie es horizontal e incluyen deslizamientos de rocas, de derrubios y coladas de barro (Alcántara, 2000; Ochoa, 2004).

Los **flujos** son movimiento de material (roca, suelo o detritos) ladera abajo, con un comportamiento muy parecido a un fluido viscoso, pueden ser rápidos o muy lentos, secos o húmedos, dividiéndose en flujos de lodo, flujos o lahares y avalanchas de suelo y rocas (Sánchez, 2005).

Los **movimientos complejos** ocurren cuando dos o más procesos de los descritos anteriormente, se mezclan durante el proceso de remoción desde su inicio y en su avance, transformando sus características, convirtiéndose o combinándose con otros. Se distinguen los aludes o avalanchas y los flujos, cuyo depósito es alargado y estrecho (Alcántara, 2000; Ochoa, 2004).

Estos eventos, deben incluirse en un inventario, que se utiliza como herramienta en la elaboración de cartografía, para conocer la abundancia, tipo y ubicación de los deslizamientos en una región (Hervás y Bobrowsky, 2009). Para la preparación del inventario, deben ser realizados trabajo de campo y gabinete (Carrara y Merenda, 1976). También el inventario se utiliza para conocer la situación del pasado y presente en un sitio (Grignon *et al.*, 2004).

CORRELACIONES UTILIZADAS EN ESTUDIOS DE SUSCEPTIBILIDAD: Deben ser examinados, además de los factores que los generan, también elementos como afectación y conmoción que provocan en la población. Son analizados por conceptos como riesgo, peligro, susceptibilidad y vulnerabilidad, que son empleados comúnmente en la literatura (Sánchez, 2005).

El peligro de deslizamientos se define como la posibilidad de que estos eventos vuelvan a impactar en un área determinada, provocando daños. La susceptibilidad a deslizamientos, se calcula mediante el área afectada y su distribución espacial, además de su velocidad e intensidad, en zonas potenciales. El riesgo es el impacto que puedan tener en una zona y en un determinado periodo de tiempo, incidiendo directamente en la población (Glade *et al.*, 2004; Rodgers, 1993).

Estos conceptos mantienen una relación muy estrecha (Figura 3), donde el peligro, la vulnerabilidad y los elementos de riesgo, ayudan a calcular el riesgo de ocurrencia. Los elementos deben ser identificados para realizar un cálculo efectivo del riesgo en distintos niveles, los cuales, resultan de la confrontación entre el peligro y los elementos del riesgo que se encuentran inmersos en la vulnerabilidad. El riesgo de deslizamientos se puede interpretar como la convergencia del peligro y la susceptibilidad (mediante los elementos del riesgo en la vulnerabilidad), donde se intersectan factores como deslizamientos, tiempo, área determinada, infraestructura y población. Escenario que provoca impacto en la zona.

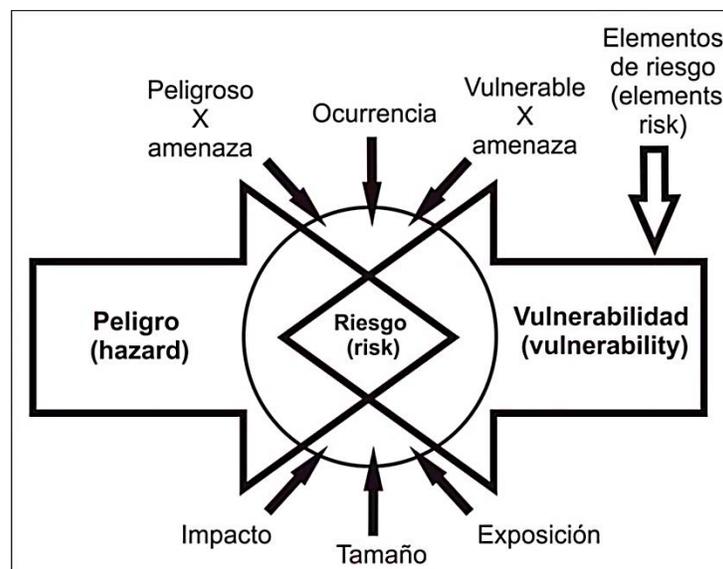


Figura 3. Relación entre elementos para calcular el riesgo. Fuente: Alexander, (2000) en Glade *et al.*, (2004).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente en México no se cuenta con estudios integrales de evaluación de susceptibilidad de deslizamientos que incluyan inventarios de deslizamientos, bases de datos geoespaciales y datos geotécnicos, que permitan modelar la susceptibilidad de manera apropiada en los SIG. Así mismo, no existen métodos estandarizados de la evaluación de la eficiencia de los modelos. La carencia de inventarios y de evaluación de la coherencia entre los mapas, no solo compromete la fiabilidad de los modelos, sino que también, puede conducir al uso inadecuado de los mismos. En esta investigación, se busca atacar esta problemática mediante un estudio integral en el tema de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en terrenos volcánicos, aplicados a la subcuenca “El Estado”.

IV. OBJETIVO GENERAL.

Generar cartografía de susceptibilidad de deslizamientos con el empleo de SINMAP, para el manejo de laderas inestables que afecta a los terrenos volcánicos (porción sur del volcán Pico de Orizaba).

IV 1. OBJETIVOS PARTICULARES.

- 1) Crear un inventario de deslizamientos.
- 2) Obtener muestras y analizar parámetros geotécnicos de los deslizamientos del valle y determinar su relación con estos eventos.
- 3) Realizar modelaciones con ayuda de SINMAP para generar cartografía de susceptibilidad de deslizamientos en la subcuenca “El Estado”.
- 4) Evaluar la eficiencia del modelo para predecir deslizamientos.

V. HIPÓTESIS.

La utilización de un inventario de deslizamientos, el análisis de datos geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión, conductividad hidráulica y granulometría) y su inclusión en modelación de la susceptibilidad con SINMAP, así como la evaluación de la capacidad predictiva del modelo, proporcionará cartografía objetiva y sistemática, que ayude a evaluar la susceptibilidad de deslizamientos en la subcuenca “El Estado”. Esta metodología aplicada en el estudio de deslizamientos en terrenos volcánicos, permitirá tomar decisiones adecuadas en el ordenamiento territorial.

VI. JUSTIFICACIÓN.

Como se menciona en el planteamiento del problema, en la actualidad no existen estudios en México que evalúen la susceptibilidad de deslizamientos en terrenos volcánicos, que cuenten con metodologías estandarizadas que incluyan inventarios de deslizamientos, análisis de parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión, conductividad hidráulica y granulometría), modelación con SINMAP y validación con matriz de error. Con base en este hecho, se considera que en trabajos donde se desarrolle modelado con SINMAP, que incluyan parámetros geotécnicos ficticios, pueden generar cartografía errada, además de escenarios irreales. Esta consideración radica en que el material contiene parámetros geotécnicos propios, que deben ser conocidos con análisis geotécnicos e incluidos en modelaciones con SINMAP, además de la evaluación de la comparación entre el inventario y el modelo SINMAP. Estos trabajos deben realizarse de manera detallada, al tratarse de estudios integrales, permitiendo a la vez, identificar alguna de las técnicas que deban ser reguladas en su inclusión en alguno de los procesos de construcción de la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos, para la selección y/o mejora de una metodología para estudios de este tipo, en terrenos volcánicos del país.

CAPÍTULO 1. ÁREA DE ESTUDIO.

La subcuenca "El Estado" se ubica en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, a 4 K del cráter, entre las coordenadas geográficas 18°59'57.89" latitud Norte y 97°16'4.14" longitud Oeste y, 18°55'10.93" latitud Norte y 97°14'52.14" longitud Oeste. La superficie es de 5.04 km², con una longitud de 8.4 K. Es afluente del río Ch-BM y se ubica en el límite estatal de Puebla y Veracruz.

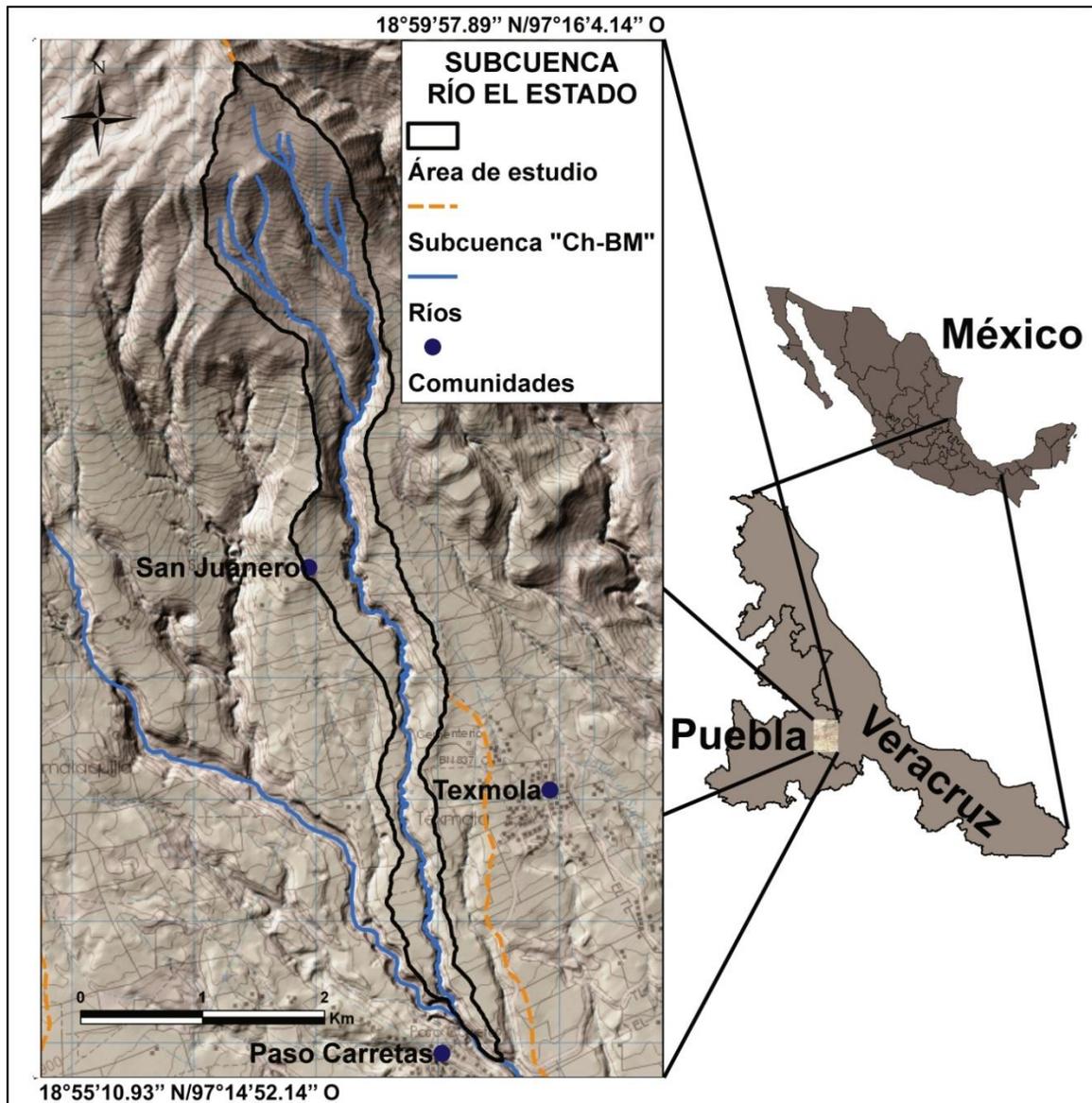


Figura 4. Localización del área de estudio.

El terreno en la subcuenca está conformado por un valle profundo y estrecho con forma en “V” (Figura 5), con pendientes fuertes producto de la erosión en barrancos secundarios profundos. Corresponde de acuerdo a la clasificación de Strahler, (1957), a una subcuenca de segundo orden, erosionando material piroclástico y coladas lávicas, pertenecientes al complejo volcánico Pico de Orizaba-Sierra Negra (PO-SN).

El valle es abierto en la cabecera y la profundidad del cauce se incrementa conforme decrece la altitud, midiendo solo algunos centímetros en la cabecera, hasta alcanzar más de 100 metros en la confluencia con el río Ch-BM (Aceves *et al.*, 2016). El cauce es sinuoso, provocado por la erosión ondulante de los meandros en el material volcánico. Estos meandros y la socavación del material producto de la erosión, permiten la formación de fuertes pendientes en los taludes del valle.



Figura 5. Vista frontal del valle producto de la erosión fluvial.

El perfil topográfico (Figura 6) muestra los límites superior (4,230 metros sobre el nivel del mar (msnm) e inferior (2,680 msnm). Se observa también aumento de la pendiente de manera constante, suave y sin accidentes topográficos notorios, a lo largo de los 1,380 metros altitudinalmente, correspondiendo casi a 172.5 metros cada K.

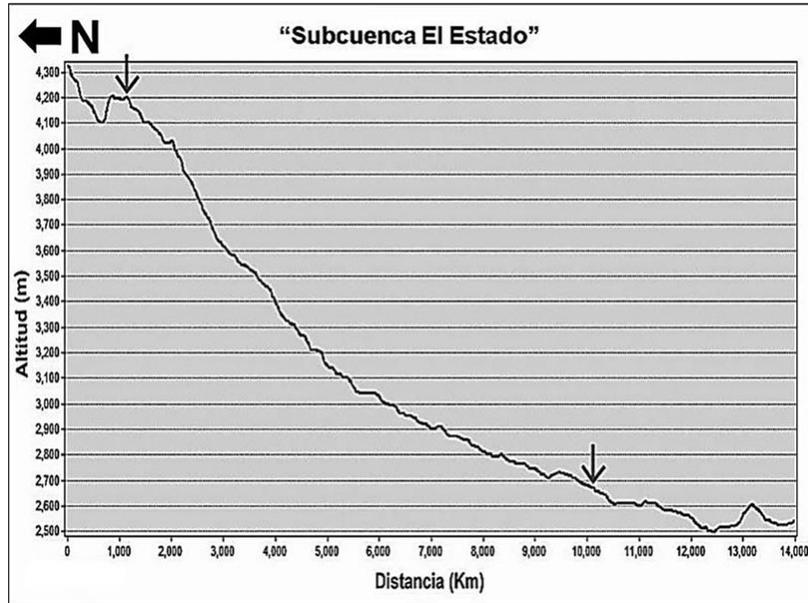


Figura 6. Perfil topográfico (las flechas indican los límites altitudinales de la subcuenca).

Es importante mencionar que la subcuenca se ha dividido para mayor funcionalidad en la descripción del área y del índice de estabilidad en SINMAP, en dos partes: la parte alta, que va de los 4,230 a los 3,085 msnm y; baja, de los 3,084 a los 2680 msnm, con base en el perfil topográfico y en características geomorfológicas como profundidad del valle, pendiente de las vertientes, etc.

La parte alta, que abarca de los 4,230 a los 3,085 msnm, presenta un valle abierto totalmente, donde el cauce alcanza hasta medio metro de ancho. La vegetación se mantiene robusta. Acercándose a la mitad de la subcuenca, se identifica ya un cauce bien definido, con pendientes fuertes. El material presenta retrabajamiento por la fricción entre las partículas transportadas en suspensión, saltación o acarreo en la corriente. En esta parte el cauce cubre de 2 a 7 metros de amplitud y presenta en algunas secciones, terrazas formadas en ambos lados del cauce.

La parte baja, que comprende de los 3,084 a los 2,680 msnm, presenta mayor profundidad en el valle, con alturas de más de 100 metros en algunas secciones (Aceves *et al.*, 2016). El material está conformado por arcillas, limos, arenas,

gravas y bloques de diferente tamaño (desde unos centímetros, hasta 3 metros). En sitios donde ocurren deslizamientos, el material removido o depósito no permanece por mucho tiempo. Esto es debido a que al depositarse en el cauce, es removido por las corrientes de agua, permaneciendo solo la cicatriz del escarpe principal.

Se observa que el 85 % del área total está deforestada, siendo provocado por el cambio de uso de suelo, destinado a la agricultura, pastoreo, etc., ocasionado por las actividades humanas. El resto del área, correspondiente al 15 %, contiene remanentes de bosque, compuesto por comunidades de pastos (*Muhlenbergia macroura*), pinos (*Abies spp.*, *Cupressus spp.*, *Pinus Leiophyla* y *Pinus montezumae*, principalmente), arbustos (*Bacharis*) y herbáceas (*Lupinus spp.*)¹, concentrándose principalmente en las vertientes del valle.

ASPECTOS ANTRÓPICOS Y USO DE SUELO: La subcuenca está siendo sometida a presiones antrópicas, que incluyen diversas prácticas de aprovechamiento de los recursos naturales para el desarrollo de la población. En zonas que ya no forman parte del Parque Nacional Pico de Orizaba, de acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Protegidas, (2014), se llevan a cabo actividades por la población que vive en las laderas, conformadas principalmente por agricultura de temporal, incluida maíz (*Zea mays*), papa (*Solanum tuberosum*), avena (*Avena sp.*), cebada (*Hordeum vulgare*) y huertos familiares de aguacate Hass; además de ganadería, donde se crían especies de bovino criollo, ovino y caprino, para el aprovechamiento de lana, carne y leche, donde los pastizales son perfectos para el forrajeo. Ver Figura 8.

CLIMA: El clima de esta zona es resultado de la convergencia de dos tipos de ambiente. **Cb**, que es templado, con verano fresco largo, con temperatura media

¹ Dra. Mariela Gómez Romero, mensaje de correo electrónico al autor, Septiembre de 2014.

anual entre 5° y 12° C y **Cw**, que es templado, con temperatura media anual entre 12° y 18° C. El mes más cálido es mayo con 27° C y el más frío enero con -4° C (Arriaga *et al.*, 2000). El mes más seco es febrero y el más húmedo septiembre (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015). Ver Figura 9.

PRECIPITACIÓN: La precipitación en esta zona es extraordinaria, como mencionan Rodríguez *et al.*, (2006), resultado de las variaciones climáticas que convergen en la región, ocasionadas por factores como la conjunción de sistemas de baja presión, que originan depresiones tropicales y frentes fríos en la zona costera de Veracruz. Tales precipitaciones extraordinarias potencializan la formación de deslizamientos. La precipitación total anual en el área de estudio es de 1,100 mm. El mayor volumen de precipitación se da en la época de lluvias de mayo a noviembre (Legorreta *et al.*, 2013).

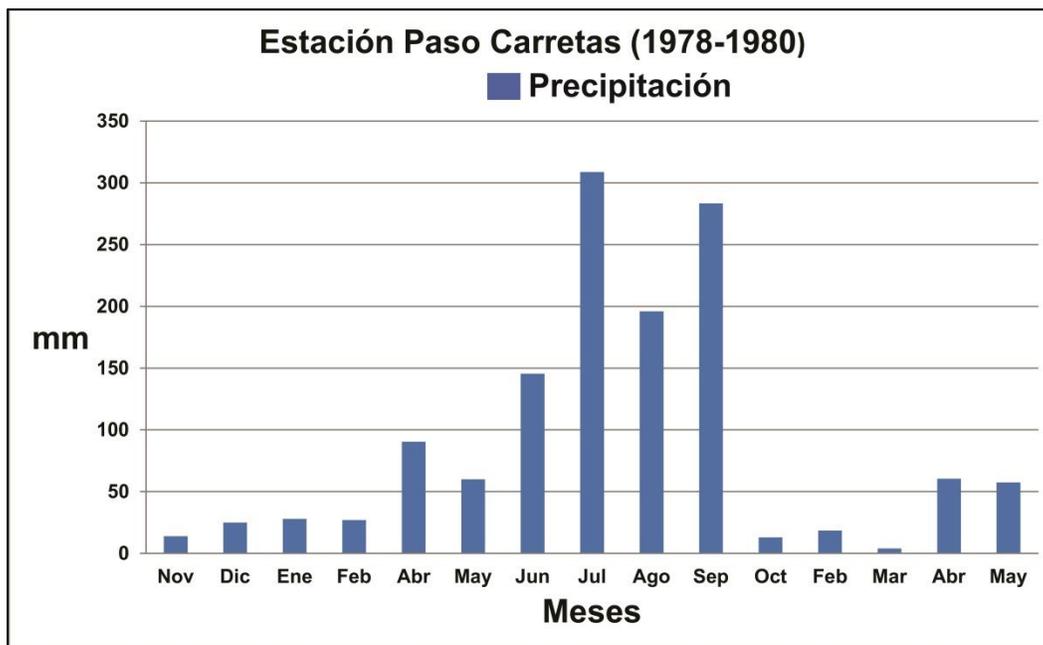


Figura 7. Precipitación total mensual en la estación Paso Carretas. Fuente: CNA, (2014).

EDAFOLOGÍA: Los suelos generados a partir del material parental, han desarrollado las siguientes propiedades y horizontes: **Andosol, órtico húmico,**

que se desarrolla a partir de material volcánico, resultando en la transformación a complejos órgano-minerales estables o minerales de ordenamiento pobre como alofanos (elementos químicos con cargas negativas variables que interacciona con la materia húmica del suelo), donde el material está completamente mezclado, con elevado contenido de carbono orgánico. Se desarrolla en varios tipos de climas, son suelos negros o café oscuro, restringiéndose a zonas templadas y tropicales. **Andosol, órtico, húmico, regosol**, que son suelos muy parecidos al anterior en su pedogénesis y distribución, además son suelos sin consolidar, son profundos y contienen arena y material flúvico (aporte de material fluvial). **Regosol eutrítico**, que están muy poco desarrollados, generados a partir de material no consolidado, son profundos y pobres en grava, con arena y material flúvico, el material se satura con sustancias básicas (Calcio, Magnesio, etc.). Se extienden a zonas erosionadas en regiones áridas, semiáridas y montañosas, encontrándose en cualquier tipo de clima (WRB, 2007; FAO, 1999). Ver Figura 10.

GEOLOGÍA: El volcán Pico de Orizaba es la mayor elevación de México, con 5,660 msnm. Es un estratovolcán que inicia su actividad hace 650,000 AP aproximadamente (Hoskundsson, 1992). Surge en un sistema de fallas que se alinean en dirección norte-sur, edificándose sobre rocas sedimentarias (calizas y lutitas) del Mesozoico, intensamente plegadas y afalladas (Siebe *et al.*, 1993). La subcuenca se encuentra en brechas volcánicas de composición intermedia del Terciario superior (Ts Bvi) (INEGI, 1994). La estratigrafía está compuesta por secuencias indiferenciadas de lahares (Carrasco y Ban, 1994). Además de material piroclástico (ceniza, arena, pómez y escoria) y flujos de lava en bloques de composición andesítica. Las secuencias forman unidades similares en composición, emplazamiento y estructura, encontrándose intercaladas y algunas sin cementar. Se distribuyen irregularmente por todo el edificio desde la cumbre, formando lenguas que limitan principalmente los valles fluviales (Carrasco y Rose, 1995). Ver Figura 11.

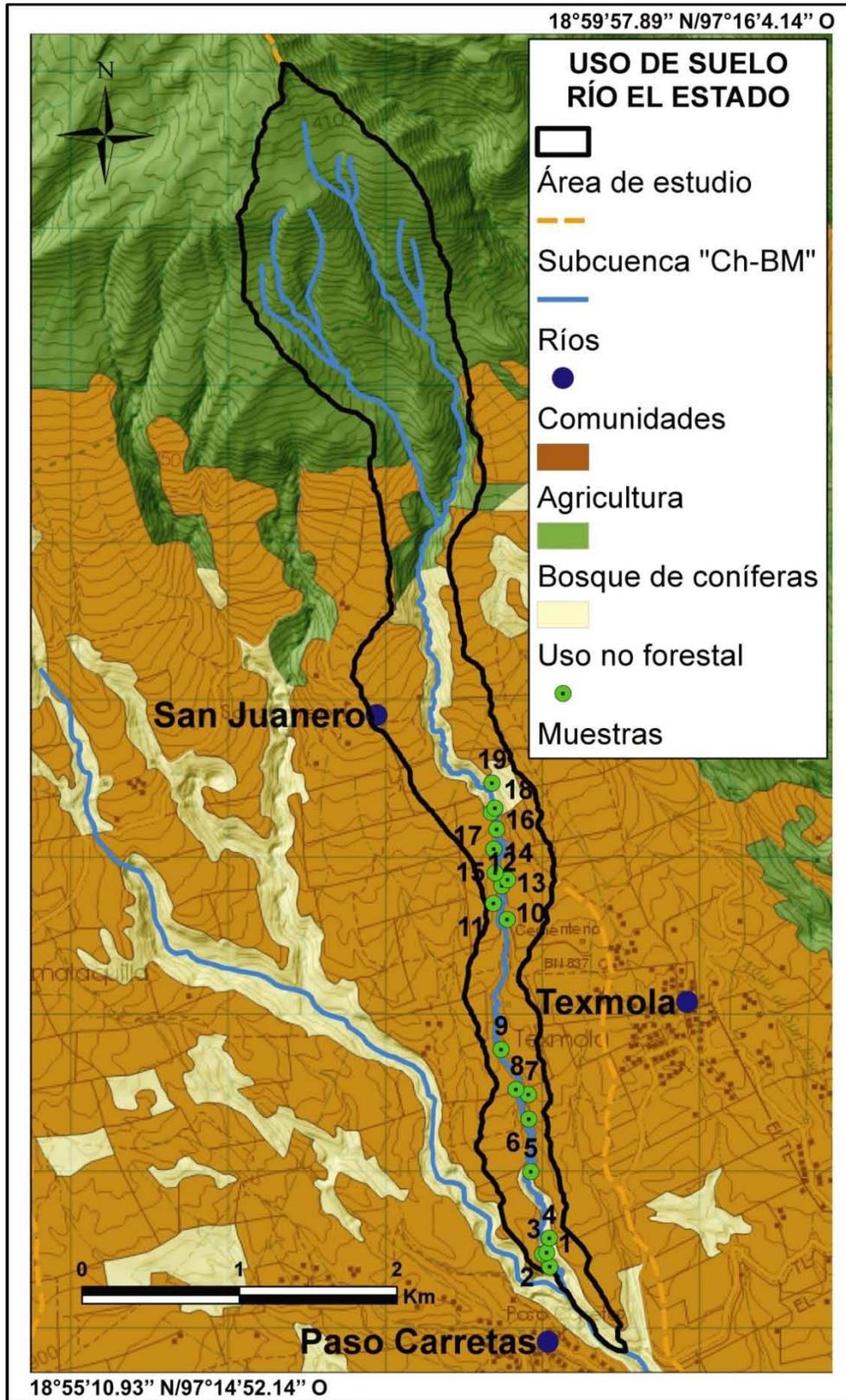


Figura 8. Cartografía de Uso de suelo y muestras, Fuente: INEGI, (2010).



Figura 9. Cartografía de Clima, Fuente: García, (1998). Escala 1:30,000.

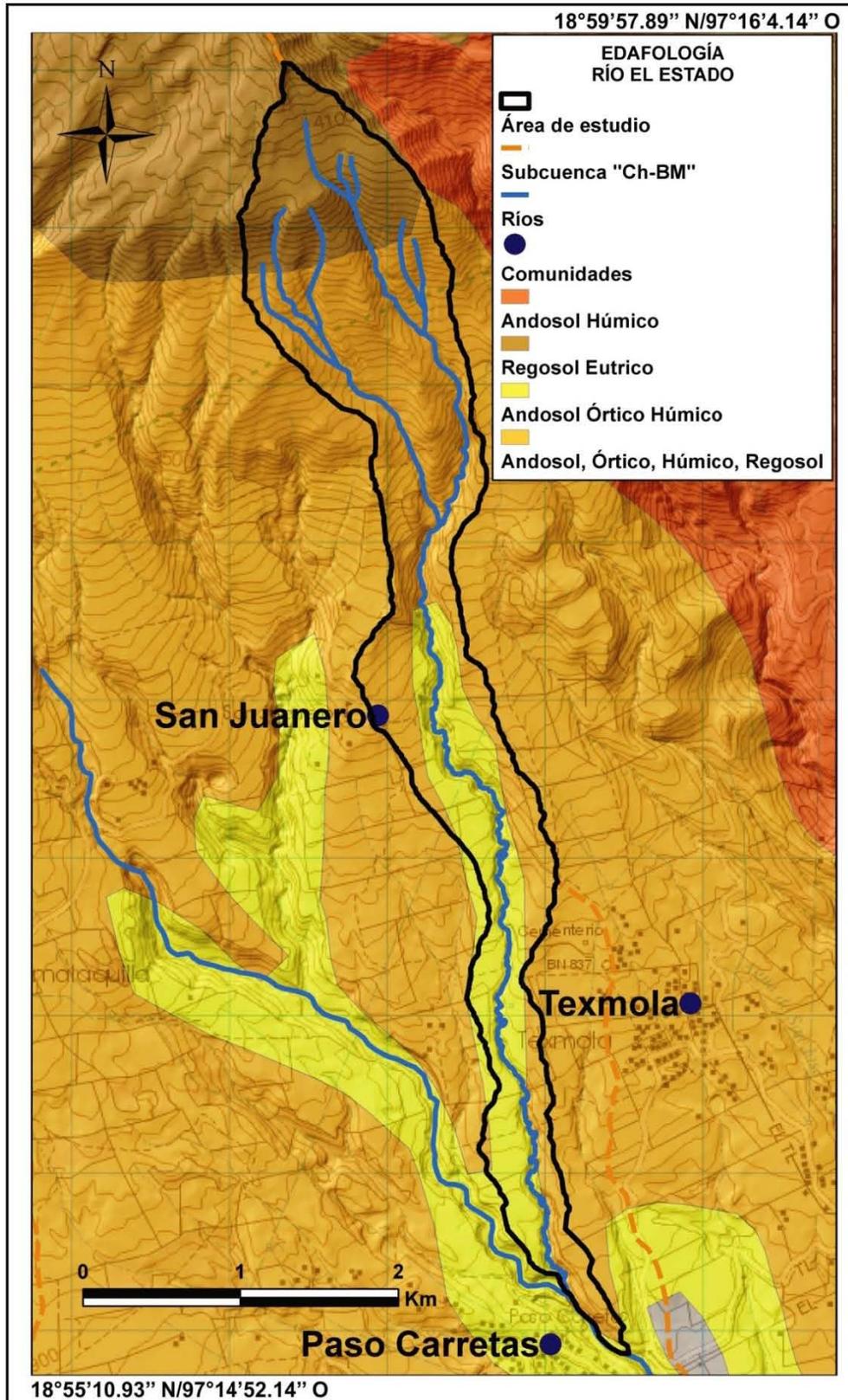


Figura 10. Cartografía Edafológica, Fuente: INIFAP, (1995).

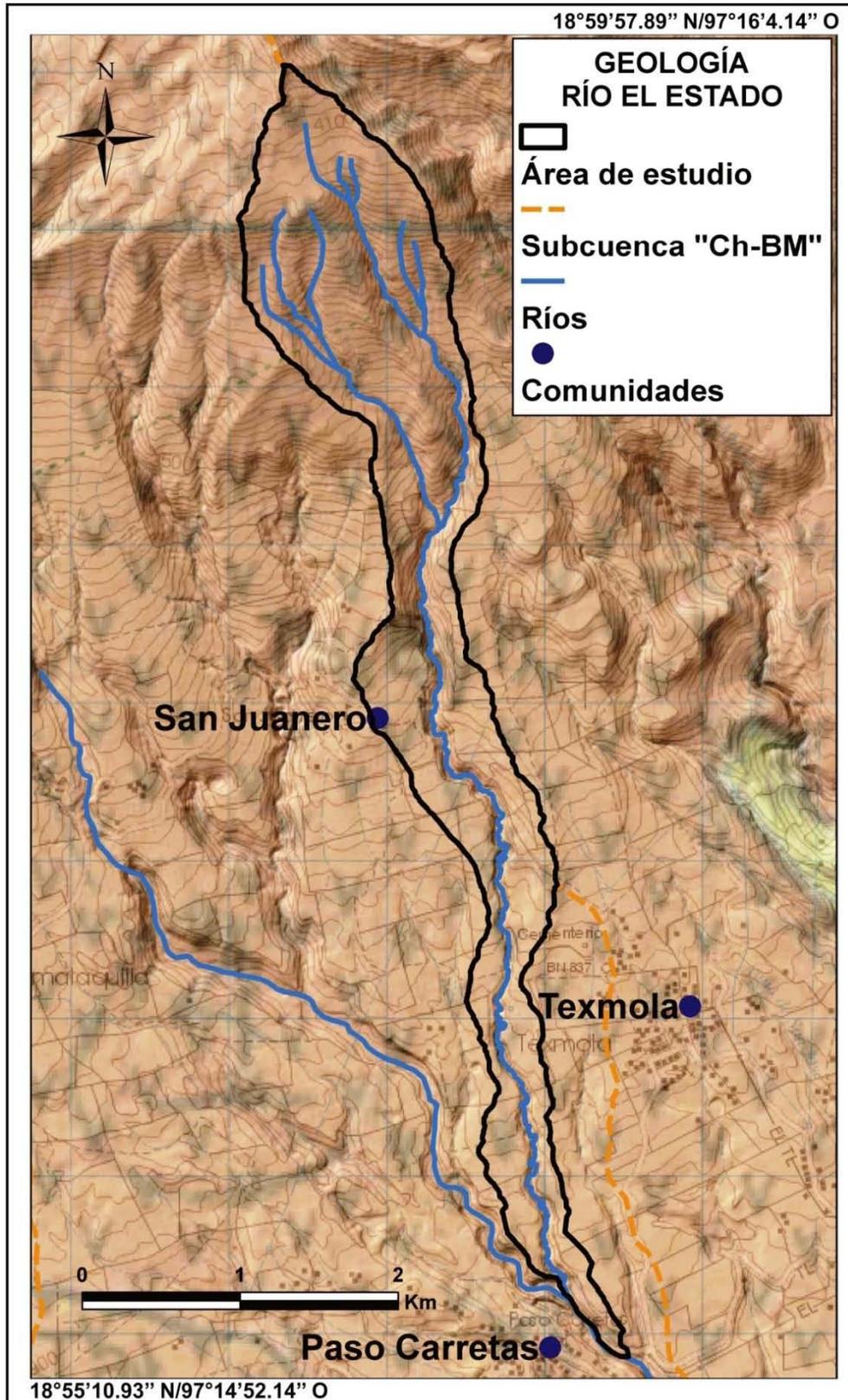


Figura 11. Cartografía Geológica, Fuente: Carta temática (geológica). Escala 1:30,000.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.

Para el desarrollo de esta investigación se realizó: 1) trabajo de gabinete, 2) trabajo de campo y 3) trabajo de laboratorio. El trabajo de gabinete es realizado durante la preparación, desarrollo y presentación de resultados con información del tema de deslizamientos, como marco teórico, cartografía digital e impresa, preparación de datos, construcción del inventario, el modelo SINMAP, validación del modelo e interpretación de los resultados.

El trabajo de campo se realizó en el área de estudio en dos fechas: otoño de 2011 para el inventario, donde se realizó el levantamiento de los eventos en el valle fluvial y primavera de 2012, para la recolección de las muestras para la realización de análisis geotécnicos, con el apoyo de investigadores y estudiantes del Instituto de Geografía y Geofísica de la UNAM y de la Universidad de Búfalo, Estados Unidos.

El trabajo de laboratorio se realizó en laboratorios de la UNAM, con el traslado previo de las muestras a cada uno de los laboratorios y la preparación para el desarrollo de los análisis geotécnicos del material, con ayuda del personal de los laboratorios.

A continuación se muestra el diagrama de flujo seguido en este proyecto de investigación, con cada uno de los pasos empleados, que comprenden procedimientos y técnicas que permitieron evaluar el modelo en esta investigación de evaluación de susceptibilidad de la subcuenca.

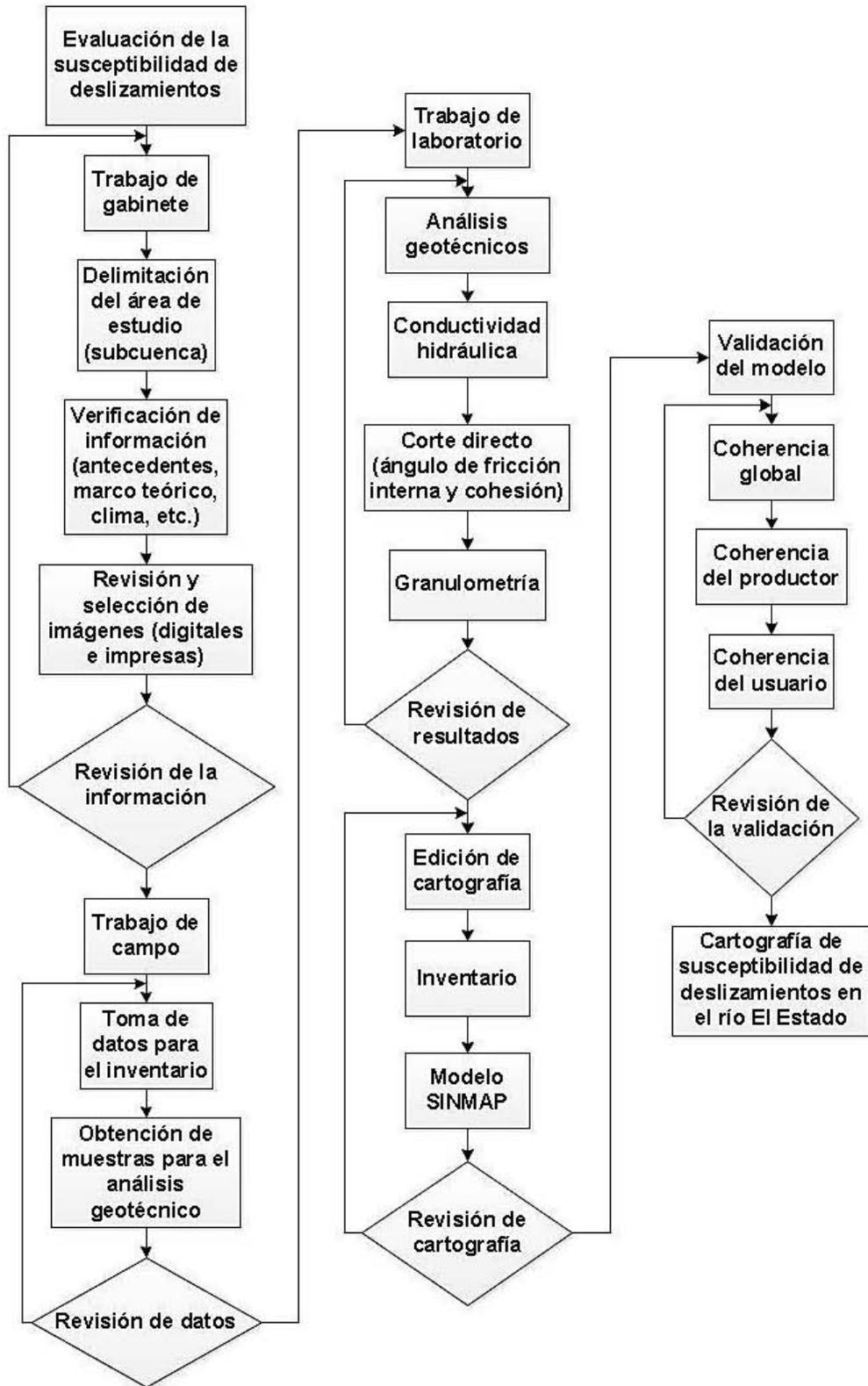


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología de evaluación de la susceptibilidad de deslizamiento en la subcuenca "El Estado".

2.1. TRABAJO DE GABINETE.

Aquí, fue reunida y consultada información del tema de deslizamientos, modelo SINMAP y validación de la confiabilidad, mencionándose en seguida:

INVENTARIO: Fueron tomados como referencia, trabajos relacionados con el tema, además de aplicar técnicas adecuadas en la elaboración del mismo de trabajos de: Carrara y Merenda, (1976); Grignon *et al.*, (2004); Galli *et al.*, (2008) y Hervás y Bobrowsky., (2009). Se inició con la inspección previa de material cartográfico del área de estudio.

Esto incluye cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI, imágenes satelitales LANDSAT (adquiridas de forma libre en el sitio <http://glovis.usgs.gov/>), SPOT y ortofotos del INEGI (del año 2008, escala 1:10,000, proporcionadas por el Laboratorio de Análisis Geo Espacial del Instituto de Geografía de la UNAM) para efectuar un reconocimiento visual de manera detallada del área. El inventario debe ir acompañado de una tabla de atributos en la que se incluye un código único de identificación (ID), ubicación geográfica, tipo, fecha de la actividad, la aparición o reactivación, volumen y/o superficie, tipo de suelo, ángulo de inclinación y mecanismos que los ocasionan.

En muchos casos, toda la información no puede estar disponible (fecha de ocurrencia, mecanismos de activación y velocidad), de tal forma que la mayoría de los inventarios solo contienen un subconjunto de los datos requeridos, dependiendo del objetivo y recursos económicos del estudio (Hervás y Bobrowsky, 2009). Para la creación del inventario, es marcada solamente la cabecera de los deslizamientos, debido a que en la mayoría de ellos, solo esta parte se encontraba en el sitio.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN SINMAP: Stability INdex MAPping es un programa (software) empleado en plataformas SIG, como herramienta cartográfica, que asigna clases de susceptibilidad que se simbolizan por tonalidades de color, a partir del índice de estabilidad de taludes con datos cartográficos, geotécnicos e hidrológicos, en estudios cuantitativos, para evaluar la susceptibilidad del terreno. Se basa en el factor de seguridad (FS) del modelo infinito de la estabilidad de pendientes y en el modelo hidrológico (Hammond *et al.*, 1992; Montgomery y Dietrich, 1994; Pack *et al.*, 2005). El FS representa la correspondencia que existe entre la estabilidad y la inestabilidad en una pendiente. Se utiliza además un MDE, donde se requiere la pendiente y área de captación. Los límites como gravedad, densidad del agua y suelo, etc., que emplea SINMAP, aunque tienen distribuciones uniformes, son inciertos de alguna manera, pudiendo ser ajustados o calibrados por regiones de calibración, basadas en capas de información relacionadas con datos geotécnicos.

DERIVACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD: Para el cálculo del FS se integran operaciones matemáticas que incluyen la derivación del índice de estabilidad, mediante la combinación del modelo infinito de estabilidad de pendiente y el índice de humedad hidrológico.

MODELO INFINITO DE LA ESTABILIDAD DE LA PENDIENTE: El modelo infinito de estabilidad de pendiente sugerido por Hammond *et al.*, (1992); Montgomery y Dietrich, (1994), es determinado básicamente por el FS, y se expresa como:

$$(1) \text{ FS} = \frac{C_r + C_s + \cos^2 \theta [\rho_{sg} (D - Dw) + (\rho_{sg} - \rho_{wg}) D w] \tan \phi}{D \rho_{sg} \sin \theta \cos \theta}$$

Dónde: FS = Factor de Seguridad; C_r = Raíz de cohesión (N/m^2); C_s = Cohesión del suelo (N/m^2); θ = Ángulo de la pendiente; ρ_s = Densidad del suelo húmedo (kg/m^3); ρ_w = Densidad del agua (kg/m^3); g = Aceleración gravitacional (9.81 m/s);

D = Profundidad vertical de suelo (m); D_w = Altura vertical del flujo de agua dentro de la capa de suelo (m) y ϕ = Ángulo interno de fricción del suelo (-).

Pack *et al.*, (2005), realiza una aproximación del modelo hidrológico, que presenta para calcular el espesor del suelo de manera perpendicular a la pendiente, a diferencia de medirlo de forma vertical. Entonces la profundidad y espesor h (m) del suelo se relacionan:

$$(2) h = D \cos \theta,$$

con este cambio, la ecuación 1 del FS se simplifica a:

$$(3) FS = C + \cos \theta [1 - wr] \tan \Phi / \sin \theta,$$

dónde w es la humedad relativa,

$$(4) w = D_w/D = h_w/h;$$

C = cohesión combinada sin dimensión relativa al espesor perpendicular del suelo,

$$(5) C = (C_r + C_s) / (h \rho_s g),$$

r = relación entre densidad del agua y densidad del suelo,

$$(6) r = \rho_w / \rho_s.$$

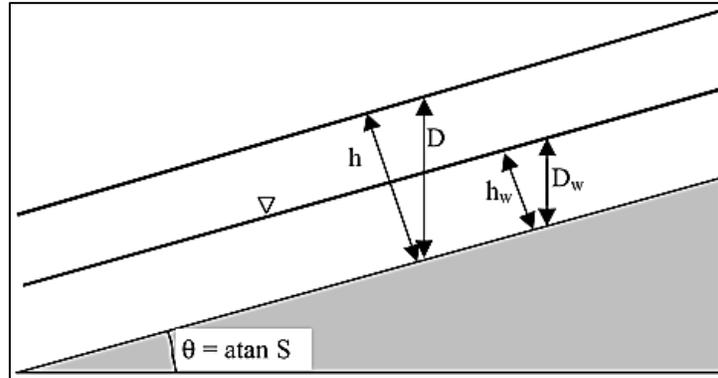


Figura 13. Esquema del modelo infinito de estabilidad de pendiente. Fuente: Pack et al., (2005).

La forma adimensional del modelo infinito de la estabilidad de pendientes propuesto por los autores es la ecuación 3, ya que la cohesión (suelo) se acopla con el espesor $\cos \theta [1 - wr]$ $\tan \phi$ y la densidad del suelo, como un factor de fuerza de cohesión adimensional C (ecuación 5), donde la relación de las fuerzas de cohesión es relativa al peso del suelo y la contribución relativa a la estabilidad de la pendiente a las fuerzas cohesivas. Este numerador, cuantifica la contribución a la estabilidad ocasionado por la fricción interna del suelo (dependiendo del ángulo de fricción interna ϕ o el coeficiente de fricción de rozamiento $\tan \phi$) (Pack et al., 2005).

ÍNDICE DE HUMEDAD TOPOGRÁFICA: Las áreas específicas de captación pueden ser vistas en campo, debido a que la humedad que se mantiene en las capas más altas del suelo o las áreas superficialmente saturadas, tienden a ocurrir en superficies convergentes cóncavas, donde el área de captación específica a , se expresa como el área sobre la pendiente por la longitud del contorno de la unidad (m^2/m) (Beven y Kirkby, 1979).

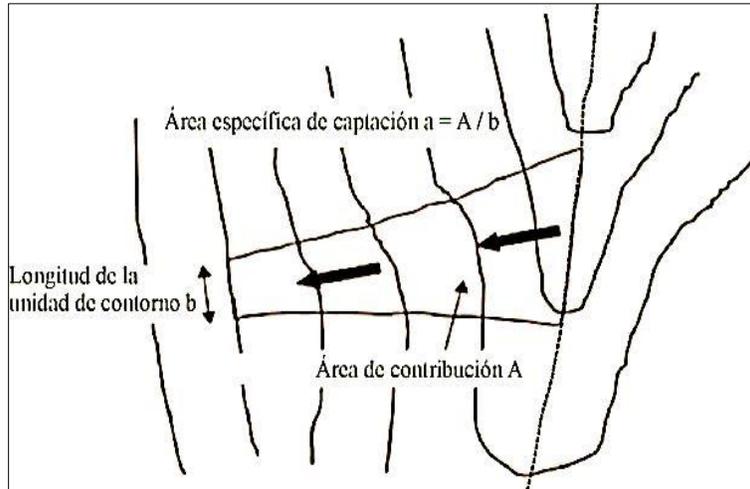


Figura 14. Distribución del área específica de captación. Fuente: Pack et al., (2005).

Montgomery y Dietrich, (1994), proponen un modelo topográfico (TOPMODEL), fundamentado en lo siguiente: El flujo sub superficial lateral, sigue gradientes topográficos que proceden del área específica de captación, definida por la topografía de la superficie (Figura 14). La descarga lateral y la recarga de estado constante R (m/hr), están equilibradas en cada punto y la capacidad para el flujo lateral en cada punto es $T \sin \theta$, donde T es la transmisividad del suelo (m^2/hr), por lo que la conductividad hidráulica es m/hr. La descarga lateral q está incluida en el primero y segundo puntos anteriores, donde la profundidad es integrada por la longitud del contorno de la unidad m^2/hr , es:

$$(7) q = Ra.$$

La capacidad para el flujo latera en cada punto, difieren de un TOPMODEL habitual (Beven y Kirkby, 1979), asumiéndose así que K decrece con la profundidad. En estas operaciones se utiliza la función **seno** ya que el flujo es a lo largo de la pendiente. De acuerdo con lo anterior, la ecuación 3 se da por:

$$(8) w = \text{Min} \left(\frac{R a}{T \sin \theta}, 1 \right)$$

La humedad relativa posee un límite superior a 1 con sobre abundancia para formar flujos sub superficiales. La humedad relativa (Figura 14), define la profundidad relativa de la columna de agua dentro de la capa de suelo. En la ecuación 8, el cociente R/T, cuantifica la humedad relativa, donde R es la lluvia total y T es el periodo de recarga que genera inestabilidad (Pack *et al.*, 2005).

DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD: En la definición del índice de estabilidad, son incorporados el índice hidrológico de la ecuación 8 y el factor de seguridad de la ecuación 3, se crea entonces la siguiente ecuación:

$$(9) FS = \frac{C + \cos \left[1 - \min \left(\frac{R a}{T \sin \theta}, 1 \right) r \right] \tan \phi}{\sin \theta}$$

Así, el índice de estabilidad (SI) es precisado por el FS, de la forma probable de que una zona sea estable tomando distribuciones uniformes de parámetros con variación sobre rangos específicos de: $SI = \text{Prob}(FS > 1)$, evaluando la probabilidad sobre las distribuciones de C, x, y t, dónde $x = R/T$; $t = \tan \phi$ y U simboliza funciones de distribuciones uniformes con límites inferiores y superiores:

$$(10) C \sim U(C_1, C_2)$$

$$x \sim U(x_1, x_2)$$

$$t \sim U(t_1, t_2);$$

cuando la variable C y t varían en la distribución (valores mínimos C₁ y t₁) además del valor máximo x₁, se puede definir un panorama conservador, de tal forma que

se tiene una incertidumbre asumida (por variabilidad) en los parámetros. De tal forma que las áreas en este contexto mantienen un FS mayor a 1, infiriendo entonces que se encuentran en límites de este modelo y son estables, definiendo en la siguiente ecuación

$$(11) SI = FS_{min} = \frac{C_1 + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{x^2 a}{\sin \theta}, 1 \right) \right] t_1}{\sin \theta}$$

En áreas donde el FS mínimo es inferior a 1, existe probabilidad de que falle el material, inducida por una probabilidad espacial que es causada por la variabilidad espacial existente en C, tan ϕ y T. esta probabilidad posee un elemento temporal R, que determina la variación de la humedad con el tiempo.

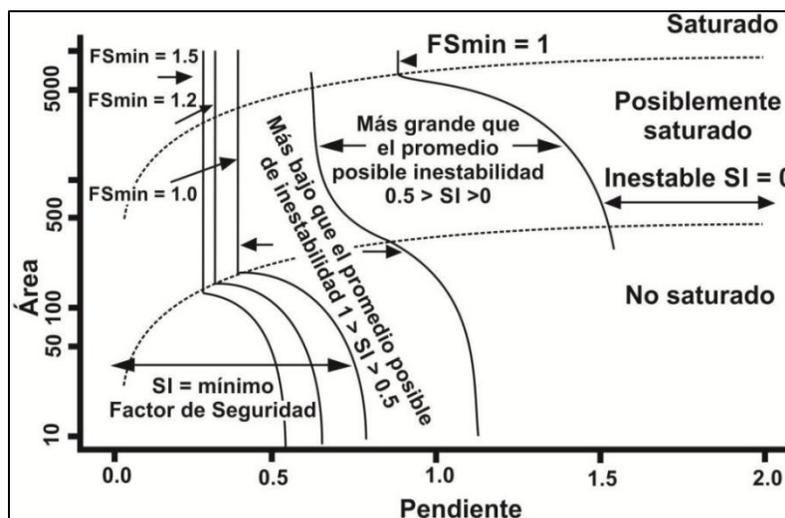


Figura 15. Índice de estabilidad, definido en pendiente-área. Fuente: Pack et al., (2005).

Por lo que, la incertidumbre en x, conjunta probabilidades espaciales temporales, donde estas regiones (con FSmin < 1), se define como sigue:

$$(12) SI = Prob (FS > 1),$$

sobre las distribuciones C, x y t de ecuación 10). Dándose el mejor escenario cuando $C = C_2$; $x = x_1$ y $t = t_2$, los cuales generan:

$$(13) \text{FSmáx} = \frac{C_2 + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{x_1}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_2}{\sin \theta}$$

$C_2 + \cos \theta \left[1 - \min \left(\frac{x_1}{\sin \theta}, 1 \right) r \right] t_2$; en el caso de que $\text{FSmáx} > 1$, entonces:

$$(14) \text{SI} = \text{Prob} (\text{FS} > 1) = 0.$$

En la Tabla 3 se ilustra el $\text{SI} > 1$ ($\text{FSmin} > 1$), $0 < \text{SI} < 1$ ($\text{FSmáx} < 1$), visualización empleada para entender esta aproximación.

MODELADO CON SINMAP: En seguida se indican las rutinas realizadas para generar el modelo:

ELABORACIÓN DE LAS REGIONES DE CALIBRACIÓN: Se crearon regiones de calibración de acuerdo con los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna y cohesión). Esto con la finalidad de determinar los atributos del material en la zona y para que haya consistencia en los parámetros.

TRATAMIENTO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN: El MDE empleado en el análisis debe someterse a una rutina de procesamientos en SINMAP, basados en metodologías descritas en trabajos de O'Callaghan y Mark, (1984), Marks *et al.*, (1984), Band, (1986), Jenson y Domingue, (1988), Tarboton, (1989), Tarboton, (1997) y Garbrecht y Martz, (1997).

RECTIFICACIÓN EN EL LLENADO DE PÍXELES (*PIT FILLED*): En los MDE existen datos de altitud que son reconocidos por el software como depresiones o zonas planas en la rejilla, rodeadas por sectores más altos de la superficie. Estas depresiones son artefactos o vacíos, considerados por el software como errores. Estos errores se corrigen rellorando las celdas deprimidas, por medio de levantamientos en la elevación de cada celda, de acuerdo con la altitud del punto más bajo que se encuentre en las celdas contiguas y asignan el punto al contorno de la celda deprimida (Jenson y Domingue, 1988).

DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE Y DIRECCIÓN DE FLUJO: Para realizar este procesamiento es utilizado el método de dirección de flujo D^∞ de Tarboton, (1997), empleado en estudios posteriores como O'Callaghan y Mark, (1984), donde el ángulo de dirección de flujo inicia en el punto cardinal derecho de la celda, con un recorrido hacia la izquierda, asignando la dirección del flujo a alguna de las ocho celdas vecinas, contiguas o en diagonal.

El valor se asigna a aquella que presente mayor depresión, a partir de vectores trazados desde el centro de la celda, hacia los centros de las celdas vecinas, asignando aquel vector que se encuentra fuera del rango de los 45° , tomándose como la magnitud y dirección del vector y, de la pendiente de la dirección del flujo (Tarboton, 1997). Como se muestra en la Figura 16.

Cuando no hay presencia de vectores positivos o negativos, es empleado el método de Garbrecht y Martz, (1997), donde el drenado ocurre de manera uniforme en las celdas vecinas, incluyéndose aunque estas áreas sean estables, para que haya compatibilidad con otros modelos o se pueda simbolizar la ausencia de datos en la cartografía.

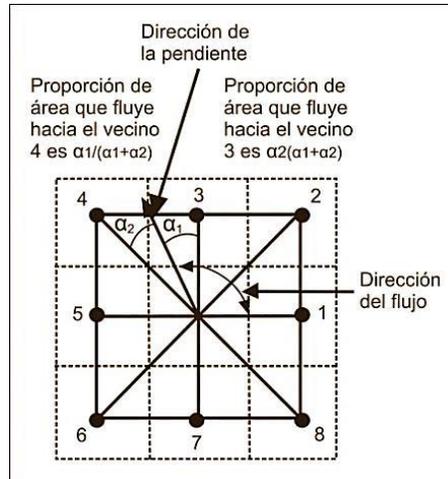


Figura 16. Esquema de dirección del flujo múltiple de Tarboton, (1997). Fuente: Pack et al., (2005).

DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE CAPTACIÓN O ÁREA DE

CONTRIBUCIÓN: Esta zona es donde confluyen todos los escurrimientos en pendientes determinadas, SINMAP reconoce todas las celdas que comprenden a la subcuenca. Esta zona es calculada a partir de las direcciones individuales en la pendiente ascendente de cada celda, donde los flujos de las celdas adyacentes caen a una misma, que ocurre cuando los ángulos de celdas contiguas o en diagonal, tienen ángulos específicos o cuando el ángulo cae directamente entre dos celdas adyacentes (Sánchez, 2005).

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE HUMEDAD: Este índice define zonas de distintas concentraciones de humedad en la subcuenca, originado por escurrimientos en la superficie del área de estudio y que depende de las condiciones de cobertura vegetal, características litológicas y edáficas, entre otras.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD (SI): En la cartografía del índice de estabilidad, se representan las zonas de acuerdo al grado de estabilidad y que son determinadas por el factor de seguridad de cada píxel, que es designado por características litológicas, de pendiente e hidrológicas. SINMAP

asigna distintas clases de estabilidad, las cuales corresponden a valores que van desde 0 (inestable) hasta 1.5 (estable) (Tabla 3).

Clasificación	Valores del índice de estabilidad (I.E.)
Estable	$I.E. > 1.5$
Moderadamente estable	$1.25 < I.E. = 1.5$
Casi estable	$1.0 < I.E. = 1.25$
Límite más bajo de estabilidad	$0.5 < I.E. = 1.0$
Límite más alto de estabilidad	$0.0 < I.E. = 0.5$
Inestable	$I.E. = 0$

Tabla 3. Valores asignados a las características de estabilidad. Fuente: Pack et al., (2005).

Así mismo, SINMAP asigna colores a las distintas clases en: zona estable (verde pistache), es aquella que mantiene el índice de estabilidad superior a 1.5, zona moderadamente estable ($1.25 < I.E. = 1.5$, azul), zona casi estable ($1.0 < I.E. = 1.25$, amarillo), zona en el límite más bajo de estabilidad ($0.5 < I.E. = 1.0$, rosa), zona en el límite más alto de estabilidad ($0.0 < I.E. = 0$, rojo) y zona inestable (0, verde olivo).

VALIDACIÓN DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD: En la actualidad, se emplea como base para la evaluación del modelo de susceptibilidad la matriz de error (Figura 17), que evalúa el modelo que está representando la realidad (Congalton, 1994; Congalton y Green, 1999). Esta validación se hace cruzando la información de los datos cartografiados, contra los sitios observados (Congalton, 2001). Aquí, empleamos un concepto de coherencia en lugar de fiabilidad de Congalton (2001), porque los datos utilizados en la construcción del modelo, forman parte del conjunto de datos utilizados para la validación (la totalidad de los

píxeles del área de estudio). Así, en los cálculos efectuados para realizar la evaluación del modelo, se obtienen resultados que determinan el grado de correspondencia entre la predicción por cartografía y la ocurrencia real de deslizamientos, como sigue:

- La coherencia global (*Overall accuracy*), que es la suma de píxeles catalogados de manera correcta, sobre el número total de píxeles, multiplicados por 100 (Lillesand y Kieffer, 2000).
- La coherencia del productor (*Producer's accuracy*), que es el número de píxeles catalogados de manera correcta en cada clase, sobre los píxeles reales en esta clase, multiplicados por 100 (Lillesand y Kieffer, 2000).
- La coherencia del usuario (*User's accuracy*), que es el número de píxeles catalogados de manera correcta en cada clase, sobre los píxeles inventariados por el modelo en esa clase (Lillesand y Kieffer, 2000).

Mediante este procedimiento se mide la coherencia que existe entre la categoría cartografiada y la categoría representada en el terreno (Congalton, 2001; Lunnetta y Lyon, 2000). En este trabajo es empleada la matriz de error para comparar la cartografía del inventario en áreas sin y con deslizamientos, contra el modelo SINMAP en áreas sin y con deslizamientos.

		Datos de referencia			Fila total	Coberturas de uso de suelo V = Vegetación A = Agua U = Urbano
		V	A	U		
Datos de clasificación	V	43	10	6	59	Precisión Global = 96/123 = 78 %
	A	3	23	5	31	
	U	2	1	30	33	
Columna total		48	34	41	123	
Precisión del productor		Exactitud el usuario				
V = 43/49 = 90 %		V = 43/59 = 73 %				
A = 23/34 = 68 %		A = 23/31 = 74 %				
U = 30/41 = 73 %		U = 30/33 = 91 %				

Figura 17. Matriz de error utilizada en la evaluación de la coherencia del modelo (tomada de Congalton, 2001).

ADQUISICIÓN Y ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN: En la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en SINMAP, se requiere de un MDE que representa los atributos de la superficie terrestre, creando una correlación recíproca entre la realidad y los datos geotécnicos. Para su construcción primero fueron adquiridas las curvas de nivel a 20 metros (sitio oficial del INEGI). Para generar el MDE con resolución a 2 metros, fueron utilizados los módulos ejecutables JFP (software creados por el Dr. Jean F. Parrot), que ayudaron en el procesamiento de las curvas de nivel.

El primer módulo que se utilizó fue *trans_dxf_jfp* (Parrot, 2012), para convertir el archivo de curvas de .dxf a .raw y contar con un archivo limpio y de mayor calidad, creándose también una tabla de correspondencia, que contiene el número de líneas y columnas, así como el número de bytes de la imagen, los valores en tonos de color (tonos de gris) y el tamaño de píxel.

En seguida, mediante el módulo *Extract_V2* (Parrot, 2011), se realizó el corte de las curvas de nivel, que consistió en recortar las curvas que comprenden el área

de estudio, utilizando las aplicaciones del módulo Extracción Numérica, indicando las primeras y últimas líneas y columnas donde se realizó el corte. El corte de las curvas y cambio de formato, permite su despliegue en imagen compuesta por filas y columnas; además de tener una escala de grises, que representa un valor altimétrico cada uno. Después el archivo se abre en **Paint Shop Pro** (JACS Inc., 1991), para revisar cada línea y efectuar una verificación de cada uno de los píxeles que conforman las curvas de nivel, asignando y acomodando cada uno de ellos de acuerdo a sus valores en las curvas altimétricas.

Posteriormente, se utiliza el módulo **broad4_mx** (Parrot, 2003) para asociar los tonos de gris con los valores altitudinales. Luego, se realiza la interposición de la información mediante el módulo **dilat_curves** (Taud, Parrot, Alvarez, 1999), que utiliza las curvas de nivel y los puntos cotejados para dilatarse hasta que las superficies se amplíen y se junten. Finalmente se emplea el módulo **Miel4_mx** (Parrot, 2003), que genera el MDE mediante una interpolación multidireccional, obteniendo el MDE como imagen de 4 bits por píxel y 200 centímetros (2 m) por lado en el tamaño de píxel. Esta imagen tiene los valores del píxel y altitud vinculados, sin embargo, aún no está georreferenciado. La imagen generada puede ser visualizada en el módulo **Tlalloc**, versión 1.0 (Parrot, 2013). Finalmente se utiliza el módulo **Dem_ascii** (Parrot, 2011), para asignar la referencia al MDE y generar la extensión .asc, que requiere el MDE para ser desplegado en SINMAP.

2.2. TRABAJO DE CAMPO.

Este proceso se realizó para la construcción del inventario mediante el reconocimiento del área, además de la recolección de material para las pruebas de análisis geotécnicos.

INVENTARIO: Se inicia con la ubicación de los deslizamientos en campo, para contrastarla con el material cartográfico utilizado previamente, realizando

recorridos en el cauce del río. En la mayoría de los deslizamientos se observó solamente la cicatriz de la corona, grietas de tensión, cabecera y, escarpes principal y menor, debido a que los componentes como el cuerpo y el depósito ya habían sido erosionados por la corriente fluvial, comprobándose que eran antiguos. Con base en las observaciones realizadas en la cartografía y en campo, se agrupan los deslizamientos con fines prácticos para este trabajo, de acuerdo a sus dimensiones en: pequeños (menores a 830 m²), medianos (entre 831 y 1600 m²) y grandes (superiores a 1601m²).

El material y equipo empleado en la realización del inventario consistió dentro del material cartográfico en un Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) marca GARMIN®, modelo Map 76CSX; un distanciómetro láser, marca Nikon Forestry, con un alcance de 500 metros y una precisión de +/- 50 centímetros y; libreta de campo. El trabajo se realizó de acuerdo al siguiente procedimiento: se inició con la ubicación, donde las coordenadas geográficas de cada deslizamiento se tomaron en el punto central del evento o, en el sitio más cercano a este. En esta parte se presentaron algunas complicaciones como lo fue: 1) la presencia de vegetación muy cerrada y 2) material del depósito muy inestable, donde la pendiente superaba los 35°.

En seguida se midieron las dimensiones de los deslizamientos mediante dos técnicas: 1) usando un distanciómetro en deslizamientos grandes, tomándose las alturas y distancias de los escarpes y 2) mediante el uso de cinta métrica o a pasos, en deslizamientos medianos y pequeños, ya que el distanciómetro es para tomar medidas superiores a 10 m. Finalmente todos los datos fueron anotados en la libreta de campo (hora, tipo, margen de ubicación (derecho o izquierdo), tipo de material, dimensiones (largo/alto/profundidad) y tamaño del cauce).

TRATAMIENTO DE ANÁLISIS GEOTÉCNICOS: Se realizó la recolección de muestras en campo en la primavera de 2012 (Figura 8). Las muestras fueron

tomadas en el escarpe principal, zona que presenta planos de corte definido (Selby, 1982). A diferencia del material removido, depositado en el cuerpo o en la zona de evacuación, el cual, se encuentra fragmentado y ha sufrido alteraciones en las propiedades originales del material (Legorreta *et al.*, 2012). Las muestras fueron tomadas de 19 deslizamientos (numero estadísticamente válido que representa a todos los eventos), que comprende el 17 % del total de los procesos gravitacionales.

Se inició con la ubicación de los deslizamientos en el valle. El material se obtuvo mediante cápsulas (segmentos de tubo PVC, de 4 pulgadas de diámetro por 8 centímetros de extensión) para extraer 1 kilogramo de muestra aproximadamente, necesaria para los análisis de parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión, conductividad hidráulica y granulometría). Fue extraído material de tres puntos en el mismo escarpe, con medio metro de separación aproximadamente entre ellos.

Previo a los análisis, las muestras fueron preparadas y se eliminó el exceso de humedad. Este procedimiento se realizó en cada una de las muestras, ya que son requeridos para obtener datos reales. El equipo utilizado en la preparación de las muestras fueron un horno eléctrico y una balanza analítica.

A continuación se presenta en la Tabla 4 la base de datos de las muestras (ID, nombre, ubicación y altitud de las muestras).

ID	Muestra	Latitud	Longitud	Altitud
1	DRL-P1	18° 55' 27.65"	97° 15' 8.65"	2709
2	WP44-VMS	18°55'30.26"	97°15'10.23"	2751
3	DRL-P2	18°55'30.55"	97°15'9.34"	2706
4	GHY-1	18°55'33.5''	97°15'08.7''	2719
5	WP46-VMS	18°55'47.33"	97°15'12.62"	2791
6	GHY-2	18°55'58.2''	97°15'12.9''	2791
7	DRL-P3	18°56'3.30"	97°15'12.96"	2778
8	WP48-VMS	18°56'4.40"	97°15'15.65"	2833
9	GHY-3	18°56'12.7''	97°15'18.8''	2816
10	P4-DVL	18°56'39.55"	97°15'17.17"	2930
11	JSD-01	18°56'42.9'N	97°15'20.1''	2945
12	WP50-RMS	18°56'46.54"	97°15'18.29"	2930
13	JSD-02	18°56'47.8''	97°15'17.0''	2954
14	GHY-01	18°56'49.22"	97°15'19.70"	2943
15	WP52-RMS	18°56'54.17"	97°15'19.95"	2967
16	GHY-02	18°56'58.23"	97°15'19.30"	2965
17	WP53-RMS	18°57'1.75"	97°15'20.42"	2997
18	JSD-03	18°57'02.6''	97°15'19.6''	3007
19	P5-DVL	18°57'7.81"	97°15'20.16"	3029

Tabla 4. Muestras tomadas en la subcuenca "El Estado".

2.3. TRABAJO DE LABORATORIO.

Las muestras recolectadas en campo se sometieron a análisis geotécnicos en el Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM, para realizar los análisis de conductividad hidráulica y en el laboratorio de Mecánica de Suelos y Geotécnia "Francisco Zamora Millán" de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM, donde se realizaron los análisis de corte directo y granulometría. Estos trabajos fueron realizados con base en fundamentos teóricos y prácticos establecidos, que se presentan en seguida:

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: Definida por la letra K , es la evaluación de los desplazamientos del agua por los poros de suelo, que son los flujos de agua, por área de superficie, por unidad de gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico es el cambio del potencial hidráulico (altura de la columna que se alcanza con el equilibrio con la presión atmosférica), por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo. La magnitud de la conductividad, es la cantidad, tamaño y geometría de los poros (Hillel, 1998).

El método utilizado para para calcular la conductividad, se apoya en la ley de Darcy, la cual, afirma que el movimiento del agua ocurre entre un punto con energía potencial alta a otro con energía baja, donde el movimiento sigue la trayectoria de disminución de la presión hidráulica, cuya velocidad se relaciona con la diferencia en la presión hidráulica entre dos puntos (Gavande, 1976). Para la obtención de K , se utiliza la fórmula $K_s = (Q/At)(L/\Delta H)$ (Flores y Alcalá, 2012), donde: K_s es la conductividad hidráulica saturada (cm/h); Q , es el volumen de agua captado en la probeta (cm^3); A , es la superficie de la parte horizontal del tubo (cm^2); t , es el tiempo que tarda el agua en acumularse y filtrarse hasta la última marca del volumen (h); L , es la altura del cilindro de suelo (cm) y ΔH , es la carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm).

De acuerdo con la ecuación anterior, se obtienen valores que se podrán ubicar y comparar con tablas establecidas por Schoeneberger *et al.*, (1998) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) y Flores y Alcalá, (2012) de la UNAM (Anexo 1), para conocer la clase textural y la interpretación de la conductividad hidráulica de las muestras; donde valores pequeños de K_s , son resultado de una porosidad baja o nula. Tal es el caso de material con arcillas expandibles. Los análisis de conductividad hidráulica se realizaron con el método basado en la Ley de Darcy, que consiste en saturar un cilindro de suelo, mantenerlo bajo carga constante de agua y medir el volumen que pasa en cierta

fracción de tiempo. Fueron empleados materiales como cilindros de plástico, embudos Buchner, papel filtro, probeta y agua (Figura 18). Durante el análisis, los datos se anotaron en un formato pre establecido.

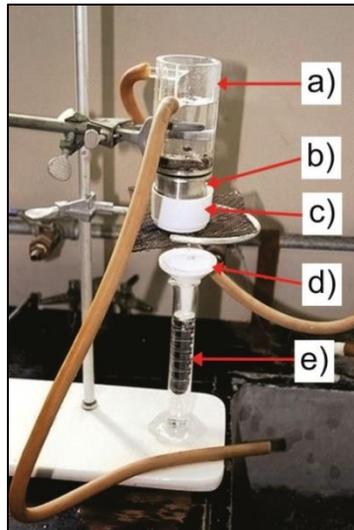


Figura 18. Equipo para realizar la prueba, a) Cilindro de plástico, b) Cilindro de acero inoxidable, c) Papel filtro, d) Embudo Buchner y e) Probeta.

Los datos obtenidos constan en clave de la muestra, núcleo analizado y tiempo transcurrido, que se presentan en el Apéndice 1.

CORTE DIRECTO: En este análisis las muestras se sometieron a diversos procesos de medición, tomando magnitudes de peso y distancia del equipo. Previo a la prueba, se utilizó material para la preparación, que consistió en vernier (Mitutoyo), cápsulas de cerámica y metal, espátulas, brochas, vasos de precipitados, charolas de metal y reglas graduadas. Para realizar el análisis se requirió papel filtro, llaves Allen, cronómetro, micrómetros para las mediciones de esfuerzos horizontales y verticales y, bases de datos pre establecidas.

El parámetro de corte directo debe ser calculado para conocer las características mecánicas (ángulo de fricción interna y cohesión) del material, propiedades que permiten que haya alteraciones en el suelo, ocasionados por factores internos y

externos. Los esfuerzos que actúan en el material pueden ser reproducidos en circunstancias simuladas con aparatos especiales, como el de corte directo (Figura 19), donde se realiza bajo ensayos de deformación controlada (compresión y deslizamiento horizontal), teniendo la posibilidad de monitorearse la deformación y trazarse en gráficos el comportamiento del material (Figura 1). En estas pruebas puede ser medida la resistencia al esfuerzo cortante, mediante esfuerzos de atracción y fricción provocados entre los granos (Lambe y Whitman, 1990). Los gráficos y tablas con los resultados se presentan en el Apéndice 2.

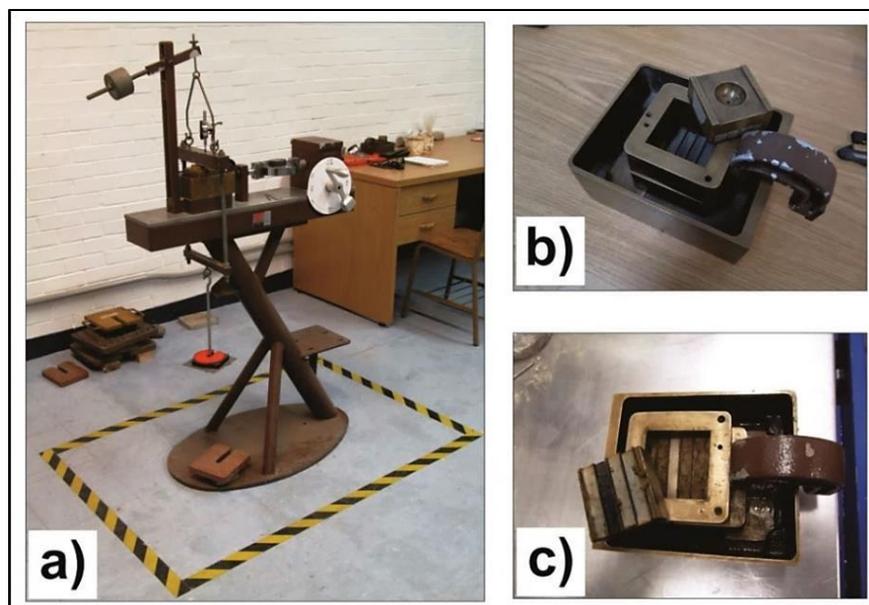


Figura 19. a) Aparato de corte directo; b) probeta y c) probeta con muestra.

GRANULOMETRÍA: Para conocer las propiedades físicas de un suelo, se requiere saber el tamaño y forma de los granos, compacidad y granulometría del material (Jiménez y De Justo, 1975). Las propiedades mecánicas de los suelos (granos gruesos y finos), dependen directamente de la distribución de las partículas que los constituyen de acuerdo a sus tamaños. En suelos cuya granulometría puede determinarse por mallas (gruesos), la distribución por tamaños puede revelar las propiedades físicas del material, además de que el comportamiento mecánico e hidráulico, está principalmente definido por la

compacidad de los granos y su orientación. La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices con abertura descendente (D60 y D10), generándose curvas acumulativas que representan el porcentaje en peso de las partículas que corresponden a las aberturas de las mallas (Badillo, 1985). Los datos obtenidos se anotan en tablas, las cuales se muestran en el Apéndice 2.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS.

Los trabajos realizados en esta investigación, permitieron obtener mediante el tratamiento de datos y generación de cartografía, la interpretación del grado de estabilidad de la subcuenca, además de verificar el grado de certeza que tuvo la metodología aplicada, que incluye el inventario de deslizamientos, la descripción geomorfológica, los cálculos de conductividad hidráulica y corte directo (ángulo de fricción interna y cohesión), los gráficos de distribución de los valores de corte directo, el modelado con SINMAP y la validación de los modelos, los cuales se describen a continuación.

INVENTARIO: Este inventario se construyó a partir de una base de datos de los eventos registrados, con las coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), clase, tipo y margen en el que se ubica (Apéndice 3). Con ayuda de SIG, se creó cartografía temática, con capas ráster (MDE) y vectoriales (subcuenca y deslizamientos), que ayudó además en la generación de los mapas temáticos de la subcuenca. En este inventario fueron incluidos solamente los polígonos de las cabeceras de los deslizamientos, ya que las estructuras como el depósito habían sido removidas por la corriente. Los deslizamientos ascienden a 113 eventos, de los cuales 59 se ubicaron en el margen izquierdo y 54 en el derecho. En seguida se muestra la tabla con el número y porcentaje de eventos y, el inventario de deslizamientos de la subcuenca “El Estado”.

Proceso gravitacional	Deslizamiento de escombros	Flujo de escombros	Asentamiento profundo	Avalancha de escombros	Caída de rocas	Total
Número de eventos	68	20	16	5	4	113
Porcentaje (%)	60	18	14	4	4	100

Tabla 5. Cantidad y porcentaje de deslizamientos en la subcuenca “El Estado”.

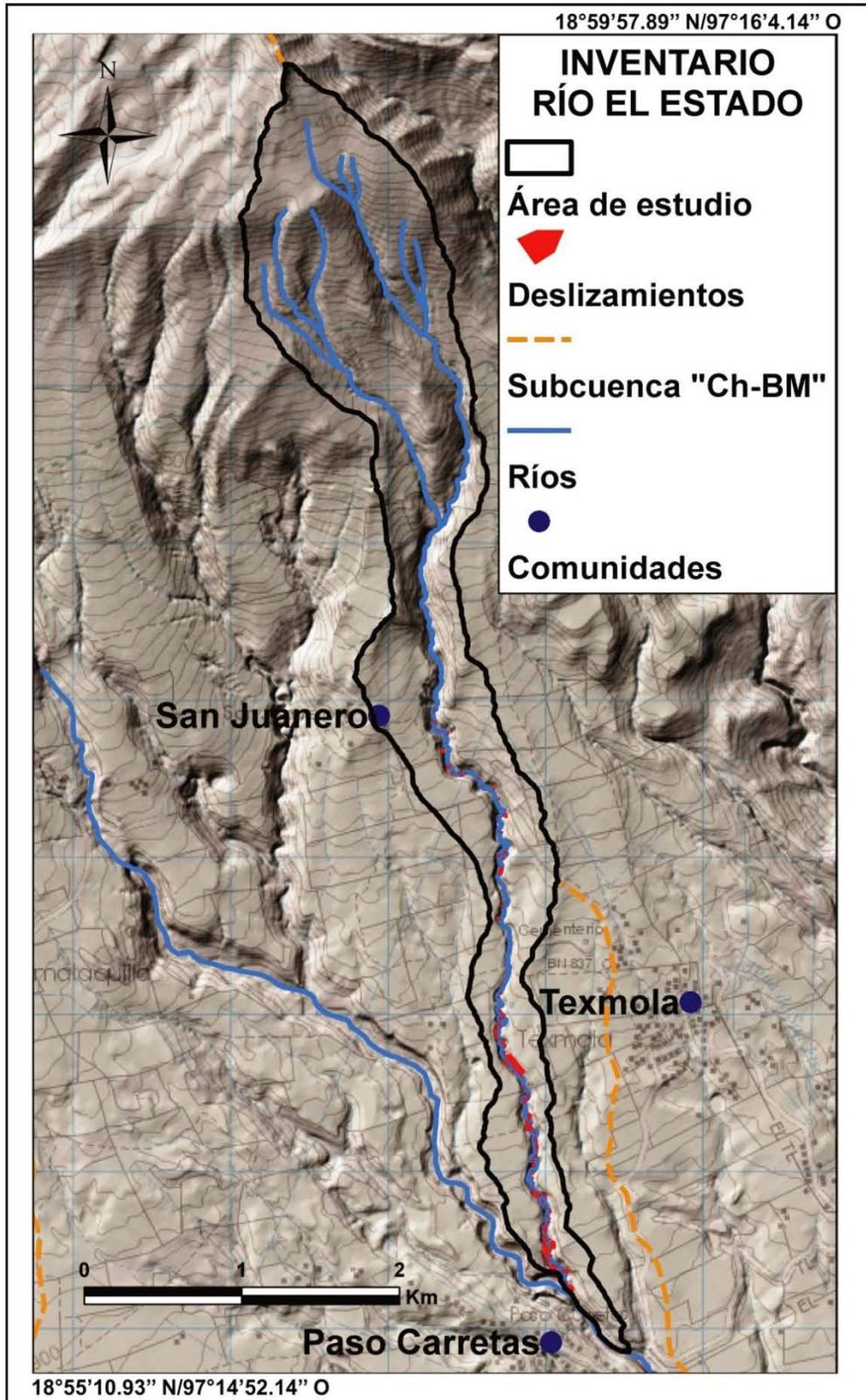


Figura 20. Inventario de deslizamientos en la subcuenca "El Estado".

El material involucrado en todos los deslizamientos es principalmente suelo, compuesto por andosol y regosol, producto de la erosión física y química de materiales que corresponde a secuencias indiferenciadas de lahares, material piroclástico (ceniza, arena, pómez y escoria); además de flujos de lava masiva en bloques, que se encuentran intercalados y sin cementar en algunas unidades. También, se encontraron clastos de varios centímetros, hasta bloques de 2 metros y fragmentos de rocas de mayores dimensiones, en sitios donde había contactos litológicos de suelo y piroclastos con coladas de lava. Además, se encontraba afectada y formaba parte de los depósitos, la vegetación que se desarrollaba en el sitio, incluyendo arbustos, herbáceas y pinos de hasta 20 metros. Son mencionadas a continuación las características de los eventos en el valle:

Deslizamiento de escombros, donde se encontraron 68 eventos, de los cuales 29 se ubican en el margen derecho y 39 en el margen izquierdo del cauce, ascendiendo al 60 % del total. Las dimensiones de los deslizamientos van desde los 13 m², hasta los 1,300 m². Mientras que las distancias entre ellos van desde la adyacencia, hasta los 230 metros.

Flujo de escombros, donde se presentaron 20 eventos, ubicándose 10 en el margen derecho y 10 en el margen izquierdo del cauce, correspondiendo al 18 % del total. Se observó solamente la cicatriz. Las dimensiones de los deslizamientos varían desde 26 m², hasta 414 m².

Deslizamientos de asentamiento profundo, localizándose 16 eventos, donde 9 se desarrollan en el margen derecho y 7 en el margen izquierdo del cauce, representando el 14 % del total. Los deslizamientos varían en las dimensiones, que van de los 1,000 m² hasta 2,500 m².

Avalancha de escombros, ubicándose 5 eventos, donde 3 se encuentran en el margen derecho y 2 en el margen izquierdo del cauce, representando el 4 % del

total. Las dimensiones de estos eventos van desde los 22 m² hasta los 462 m². Las distancias entre ellos van de los 25 metros hasta los 735 metros.

Caída de rocas, donde se encontraron 4 eventos, dos ubicados en el margen derecho y dos en el margen izquierdo del cauce, representando el 4 % del total. El tamaño de los eventos correspondía a paredes de roca expuesta, representando superficies potenciales a estos eventos, variando de los 90 m², hasta los 4,000 m².

En seguida se muestra un gráfico comparativo donde se observa la abundancia de los distintos tipos de deslizamientos en la subcuenca. Los deslizamientos de escombros son los que prevalecen en la subcuenca, seguidos por los flujos de escombros, asentamiento profundo, avalancha de escombros y caída de rocas, respectivamente.

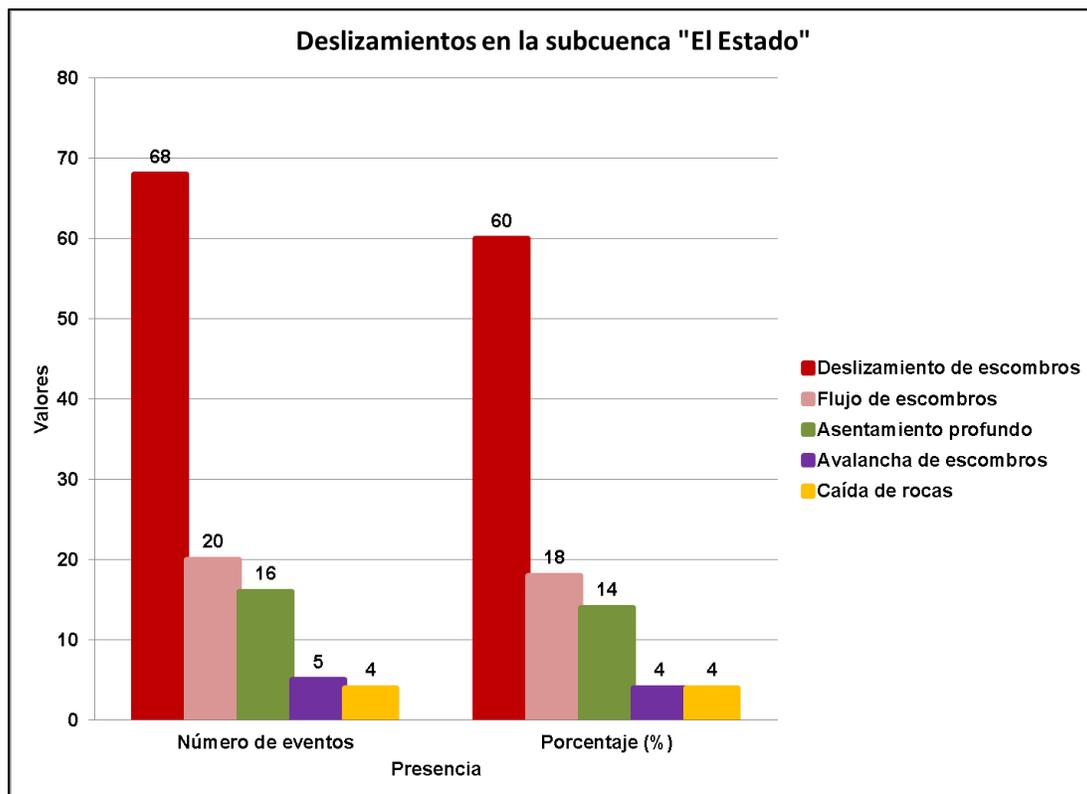


Figura 21. Gráfico comparativo de la ocurrencia de deslizamientos.

En los tipos de factores detonantes, se identifican los: **geológico** (materiales intemperizados y orientados de igual forma que el plano de inclinación de los estratos, discontinuidades estructurales (contactos) y permeabilidad constante), **morfológico** (levantamientos volcánicos, erosión fluvial y subterránea y, retiro de la vegetación nativa por incendios por ejemplo), **ambiental** (precipitaciones intensas, eventos de lluvias extraordinarias y expansión e hidratación de arcillas) y **antrópico** (excavación de vertientes, incremento de peso en las vertientes, deforestación y vibraciones artificiales). Se realiza en seguida una descripción geomorfológica de la subcuenca (pendiente, curvatura, orientación, geomorfológica, geológica, antrópicas e hidrológica), así como la relación con el material, lo cual, forma parte de los factores que generan deslizamientos en la zona.

- **Pendiente**, se extiende en toda la subcuenca, en zonas planas (pendiente menor a 13°), semiplanas (pendientes de 14° a 27°) y de pendiente en el cauce (pendiente mayor a 28°). Las partes planas se presentan principalmente en la parte baja de la subcuenca, desde la mitad del valle hasta la desembocadura con el río Ch-BM; mientras que en la parte alta casi no se observan superficies de pendientes suaves, a excepción de una pequeña área en la cabecera, al noroeste de la subcuenca; las zonas planas cubren casi el 60 % del área. Estas partes permiten en la subcuenca el desarrollo de actividades humanas como la agricultura, pastoreo, etc. En la parte media de la subcuenca, se observa que la pendiente abarca casi toda la extensión en ambos márgenes, llegando a cubrir en el flanco oeste toda la vertiente del valle. En la parte alta se encuentran dispersas en la cabecera, cubriendo una mayor superficie en las vertientes, correspondiendo a las crestas del valle; mientras que en la parte baja, se sitúa exclusivamente en el cauce fluvial, teniendo en algunas secciones hasta 160 metros de amplitud, siendo estos sitios donde se desencadenan los deslizamientos en el río. Estas áreas conforman el 40 % aproximadamente del total de terreno de la subcuenca.

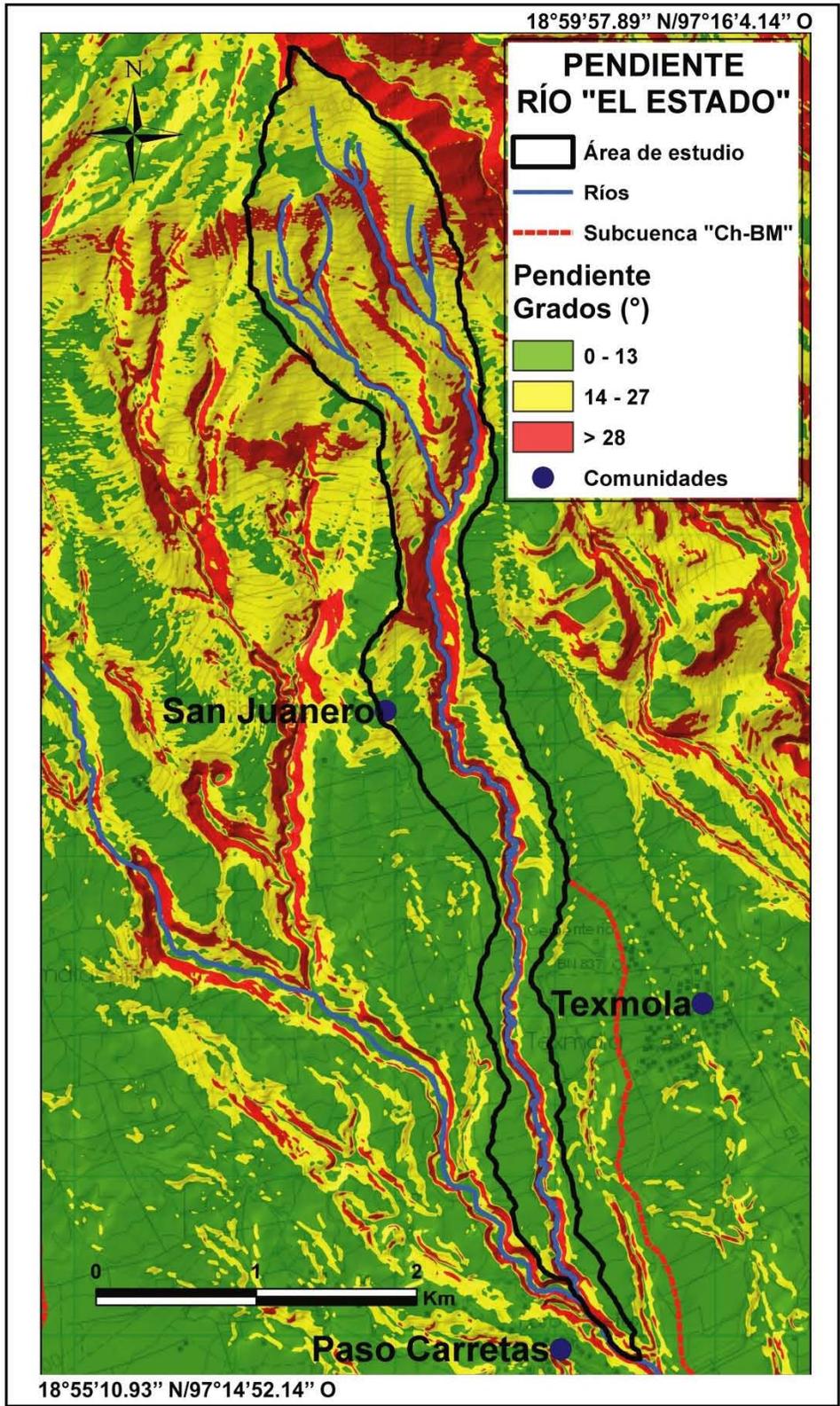


Figura 22. Pendiente de la subcuenca "El estado" en grados.

- **Curvatura**, de acuerdo con el tipo de relieve, la subcuenca presenta zonas cóncavas en toda el área que cubre el valle fluvial, donde el cauce se ha encajado en los sedimentos. En la parte alta se observan varias zanjas que se unen aguas abajo en la mitad del valle con el cauce principal. Las zonas convexas en la subcuenca se presentan principalmente en la parte alta, donde se presentan las crestas de roca de coladas lávicas, donde el cauce se observa ramificado a través de los piroclastos. Las partes planas se presentan contiguas al cauce, corriendo paralelamente con este, hasta la mitad de la subcuenca en la parte baja, además de presentarse en la base del cauce, consecuencia del asentamiento del material que arrastra la corriente en época de lluvias.

- **Orientación**, donde las vertientes establecen direcciones predominantes este y oeste, además de exposición hacia el este-noreste y oeste-suroeste, ya que el acarreo de los sedimentos erosionados, ha ocurrido con orientación preferencial norte-sur, corriendo por el flanco sur del volcán Pico de Orizaba, donde el material piroclástico ha sido socavado. En estas vertientes, influye la exposición continua del material a los rayos solares y a las corrientes de viento, manteniendo presiones en el material de manera permanente, lo que provoca que el material se encuentre débil ante esfuerzos sometidos por agentes externos, además de las presiones de tipo antrópico que aplican carga extra al material.

- **Geomorfológicas**, donde las corrientes en la parte alta de la subcuenca corren por casi 3 kilómetros y los flujos de agua han formado varios cursos de primer orden, hasta que se unen y forman un único cauce, que corre por toda la parte baja, con una extensión de casi 4 kilómetros. La profundidad del cauce es variable, incrementando conforme decrece la altitud. El material sometido a erosión fluvial y eólica se compone de piroclastos y coladas lávicas, conformando el valle, donde se combinan el cauce con lechos y terrazas, así como los taludes que conforman las vertientes. Se observa que en la parte alta de la subcuenca predominan las crestas, que corresponden a coladas lávicas, donde el terreno es

heterogéneo por la presencia de pendientes abruptas. En la mitad de la subcuenca, el valle abarca casi toda la amplitud, donde los límites se acercan y corren por el borde superior de las vertientes. La parte baja está dominada por superficies planas, volviéndose más homogénea.

- **Geológicas**, donde el material parental está conformado por piroclastos y coladas de lava, que han sido sometidos a intemperismo físico y químico, dando origen a los tipos de suelo presentes en las vertientes del valle. La estructura del material que está conformado por arena principalmente, permite que la infiltración del agua durante las lluvias se introduzca en los mantos inferiores, alterando las condiciones de estabilidad mediante los movimientos del aire o del agua a través de los poros del material, provocando su inestabilidad.

- **Antrópicas**, que es una de las variables que más ha impactado el paisaje por el cambio de uso de suelo en la subcuenca. Se observa que la subcuenca está dominada por actividades agrícolas, madereras y ganaderas. La agricultura se lleva a cabo en las zonas planas, donde las parcelas llegan al límite del valle fluvial, respetando el corte abrupto que generan las vertientes. El trazado de caminos y veredas a través de la subcuenca ha perturbado las condiciones naturales del material, agregando carga extra a los sedimentos, provocando un desequilibrio, ya que son utilizados para el traslado de vehículos y ganado a través de la subcuenca. La deforestación es una actividad que se lleva a cabo en la parte donde quedan aún remanentes de bosque, principalmente en las vertientes del valle y en la parte alta de la subcuenca, área que se encuentra colindando con en el Parque Nacional Pico de Orizaba.

- **Hidrológicas**, que comprenden las corrientes provocadas por las abundantes lluvias en la zona, que ocurren en los meses de junio, julio, agosto y septiembre, con cantidades aproximadas de 150, 310, 200 y 280 mm respectivamente. Se observa que la humedad afecta a una distancia de 15 metros

hacia ambos lados del río (aplicación de un buffer en SIG), influyendo en los taludes en ambos márgenes del cauce, abarcando en algunos sitios toda la vertiente donde se desencadenan los deslizamientos. La saturación del material con agua, provoca que se altere y debilite, ocasionando que esté propenso a cambiar sus condiciones naturales.

Con base en la descripción anterior, se realiza una descripción de acuerdo a la composición estructural en un evento que corresponde a una avalancha de escombros (Figura 23). Se identificaron la corona, márgenes superior e inferior, escarpe principal y secundario, cabecera, flancos, zona de hundimiento, pie, depósito y lóbulo frontal, presentándose en algunos deslizamientos todos estos componentes, mientras que en la mayoría, no se presentaban.

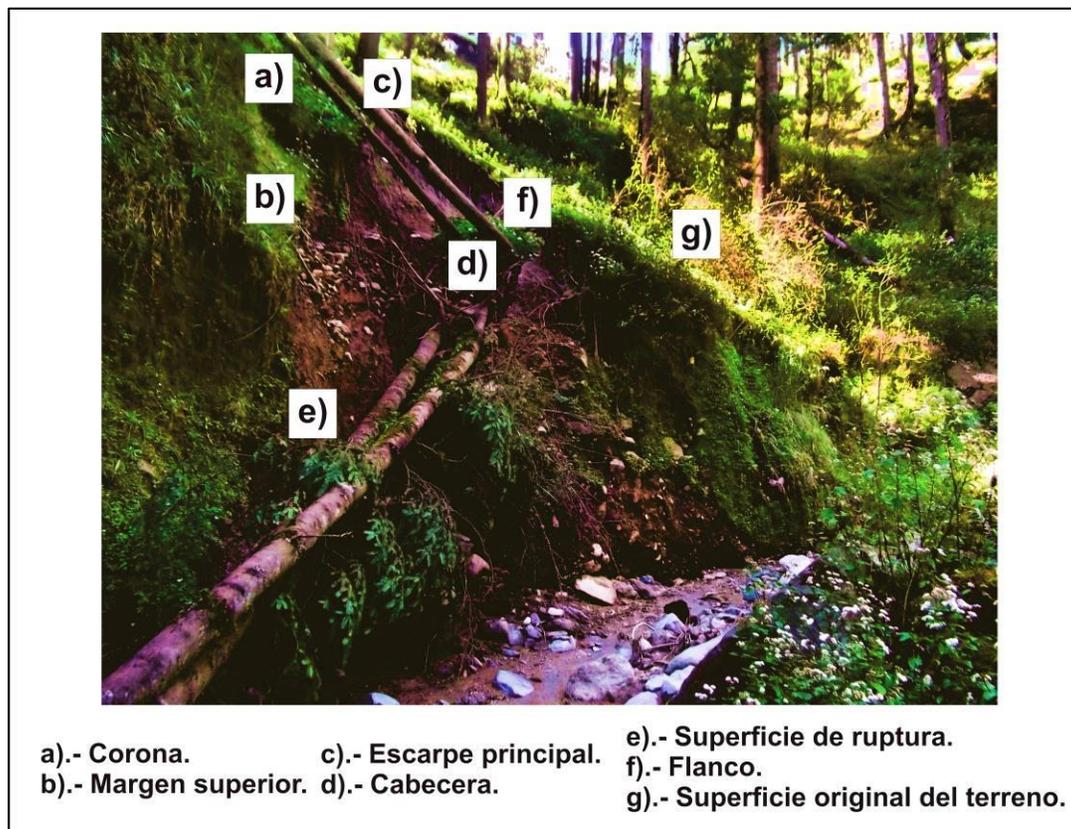


Figura 23. Avalancha de escombros y estructura.

Esta avalancha, ocurre en la parte alta del río, en el margen derecho, donde la vertiente se encuentra cubierta por vegetación, la cual, ha sido removida con el material evacuado, afectando y derribando árboles por el movimiento, encontrándose material retenido en las raíces. Se observan además clastos de diversos tamaños inmersos en el material fino. El material en el relieve se ve impactado por los factores ambientales y la geometría de las vertientes, que determinan la conformación del valle y el posterior fallo del suelo, incidiendo en:

- Pendiente: que en este movimiento es mayor a los 25°.
- Curvatura: observándose cóncava en toda la sección que se presenta en la sección.
- Orientación: donde la vertiente se encuentra ubicada nor-noroeste-sur-sureste, ya que se encuentra en un meandro.
- Geomorfológica: distinguiéndose los cortes de falla y el escarpe principal, donde el material se desprende por la superficie de corte y la zona evacuada, arrastra la vegetación que se desarrolla en el sitio.
- Geológica: observándose el material conformado por material volcánico, generando suelos y clastos, producto de la erosión fluvial y eólica en la subcuenca, material que presenta una distribución heterogénea.
- Antrópica: se observa que estas pendientes del río, son ideales para que se traslade y forrajeé el ganado, agregando preso extra al material. Además de aprovecharlas forestalmente con la extracción de árboles, actividad que se desarrolla en estas secciones, debilitando el material.
- Hidrológicas, donde la humedad satura el suelo cuando ocurren episodios climáticos habituales y extraordinarios.

Los escenarios donde se desarrollan los eventos, corresponden a que el valle mantiene un control estructural, a partir del influjo de las geoformas y materiales del volcán Pico de Orizaba, donde la evolución del paisaje está dominada por fenómenos ambientales (clima) que se desarrollan por la confluencia de los mismos en las vertientes. Una evidencia se presenta en los estratos del material ígneo, donde la erosión provoca la generación de suelo, que en algunos puntos de los taludes, superan los 7 metros de profundidad y que presenta la misma orientación de las unidades piroclásticas.

ANÁLISIS GEOTÉCNICOS (CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA): Con base en los análisis realizados (Apéndice 1), se observa que el material es muy permeable. En algunas de las cápsulas el paso del agua fue inmediato y no permitió que se registrara ningún periodo de tiempo en la saturación. Cabe también señalar que pocas cápsulas (o algunas) mostraron una alta impermeabilidad ya que el tiempo de saturación del suelo tuvo una variación de hasta 2 horas con 22 minutos.

La permeabilidad del suelo obedece a que las partículas del material se encuentran sueltas, correspondiendo de acuerdo con las pruebas granulométricas, a arena mal graduada suelta, donde los granos mantienen poca interacción entre las demás partículas, permitiendo que el material no tenga ningún grado de consolidación, lo que impide la resistencia ante esfuerzos externos a los que se somete (factores ambientales como lluvias abundantes, peso del ganado, deforestación, etc.). La conductividad hidráulica arroja valores superiores a 2.9 cm/h, lo que provoca que la infiltración en el material se mantenga de alta a muy alta. Lo anterior permite sugerir que no hay consolidación ni homogeneidad.

Los valores de conductividad hidráulica y granulometría, permiten corroborar que el material es heterogéneo y la permeabilidad es elevada, permitiendo que el agua de lluvias extraordinarias caiga en el suelo desnudo en áreas perturbadas por el hombre o con poca vegetación, golpeando las partículas superficiales e

introduciéndose rápidamente en los estratos inferiores, saturándolos y colmatando los poros rápidamente, además de ejercer presión por el peso de la sobrecarga del volumen extra de agua, lo que permite que el material quede propenso a moverse por perder las condiciones de estabilidad.

ANÁLISIS GEOTÉCNICOS (ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y COHESIÓN):

Los valores obtenidos en los análisis de corte directo, permitieron obtener datos máximos y mínimos en el ángulo de fricción interna y cohesión del material (Apéndice 2). Se observan valores en el ángulo de fricción interna extremos, donde el mínimo es de 6° y el máximo de 35° , muestran que el 84 % del total (16 muestras), mantiene el ángulo por arriba de 10° y 16 % (3 muestras) se encuentra por debajo de 10° , exhibiendo así el bajo grado de estabilidad del material en la pendiente. Con los datos anteriores se puede afirmar que casi todas las muestras sobrepasan el límite del ángulo a partir del cual el material fallará, que es de 10° , manteniéndose propenso a desplazarse.

Los valores en el ángulo de fricción se mantienen heterogéneos en los distintos tipos de deslizamientos (Figura 24); sin embargo, mantienen una similitud en deslizamientos similares. En deslizamientos de escombros se observa que mantienen valores de 6° , hasta 35° , donde se observan valores extremos, lo que indica que los deslizamiento de este tipo, pueden ocurrir con mayor frecuencia por la diversidad de valores en el ángulo de fricción en las pendientes del valle, corroborándose en el inventario. Por su parte, los deslizamientos de asentamiento profundo, mantienen valores entre 11° y 28° , al igual que los flujos de escombros, que mantiene valores de 13° a 25° , advirtiendo que estos tipos ocurren en sitios con características específicas en las vertientes, como pendientes con menor inclinación y espesores importantes de material, lo que también se confirma en el inventario.

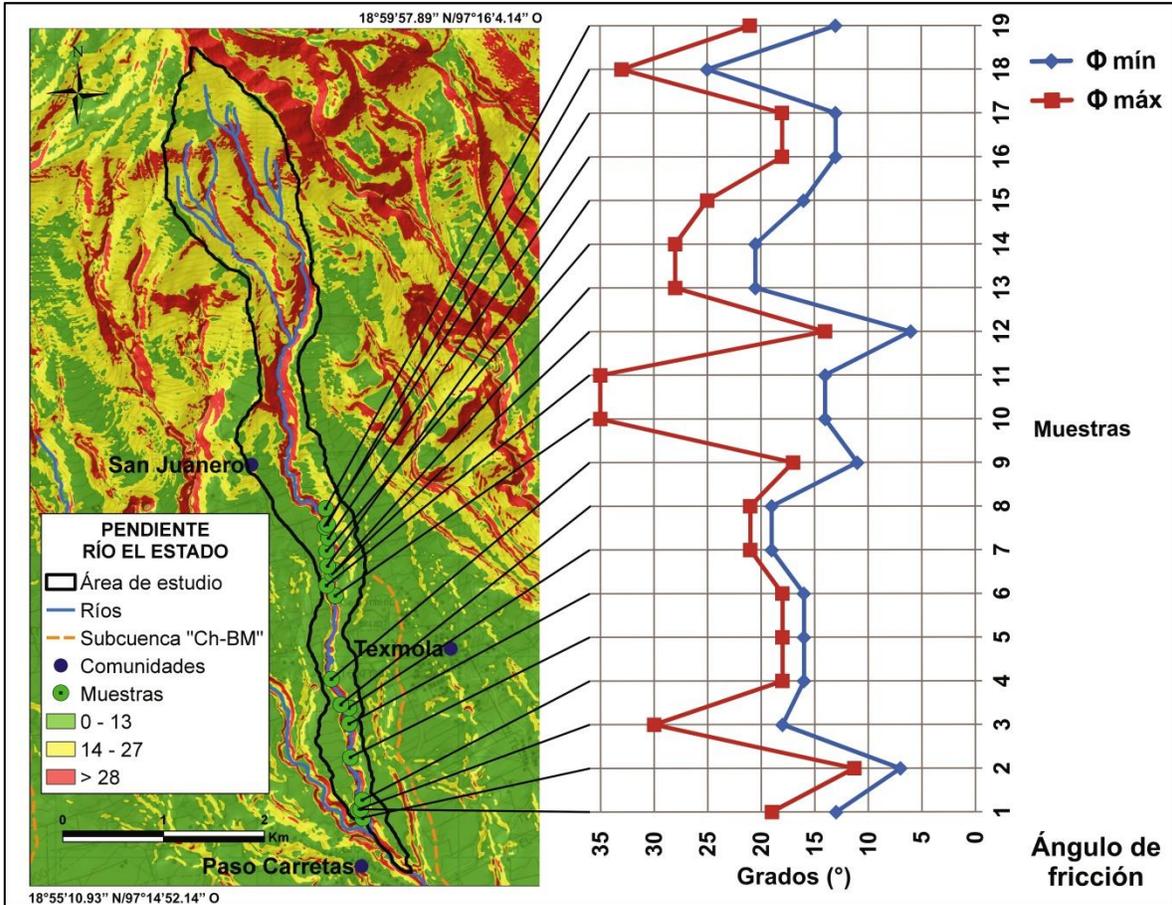


Figura 24. Gráfico de la distribución del ángulo de fricción interna.

Los valores de cohesión del material se presentan muy bajos, ubicándose desde 0, hasta 0.29 K/cm². La cohesión, obtenida en los sitios de muestreo, evidencia que el 79 % del total (15 muestras), tienen una cohesión de entre 0.001 y 0.29; mientras que 21 % (4 muestras) su valor es cero, correspondiendo de acuerdo al porcentaje obtenido, a que el material en la subcuenca es cohesivo. Sin embargo, los valores de cohesión efectiva que avalan detalladamente el comportamiento del material, indican valores de 89 % del total (17 muestras) que se encuentran por debajo de 0.1 K/cm² y 11 % (2 muestras) que se encuentra por arriba de este valor, manteniendo valores muy bajos de cohesión. Ambos resultados sugieren que el material es cohesivo, aunque las fuerzas en los enlaces entre las moléculas

son incipientes, lo que permite que el suelo sea susceptible a fallar bajo presiones externas.

Los valores en la cohesión (Figura 25), se mantienen más homogéneos entre todos los tipos de deslizamiento. Sin embargo se observa una discordancia entre los flujos de escombros, donde las fuerzas de unión entre las partículas se mantienen constantes (0.01 y 0.06 K/cm²) y, los deslizamientos de escombros y asentamiento profundo, donde se presenta un rango más amplio en la solidez entre las partículas (0 y 0.29 K/cm²).

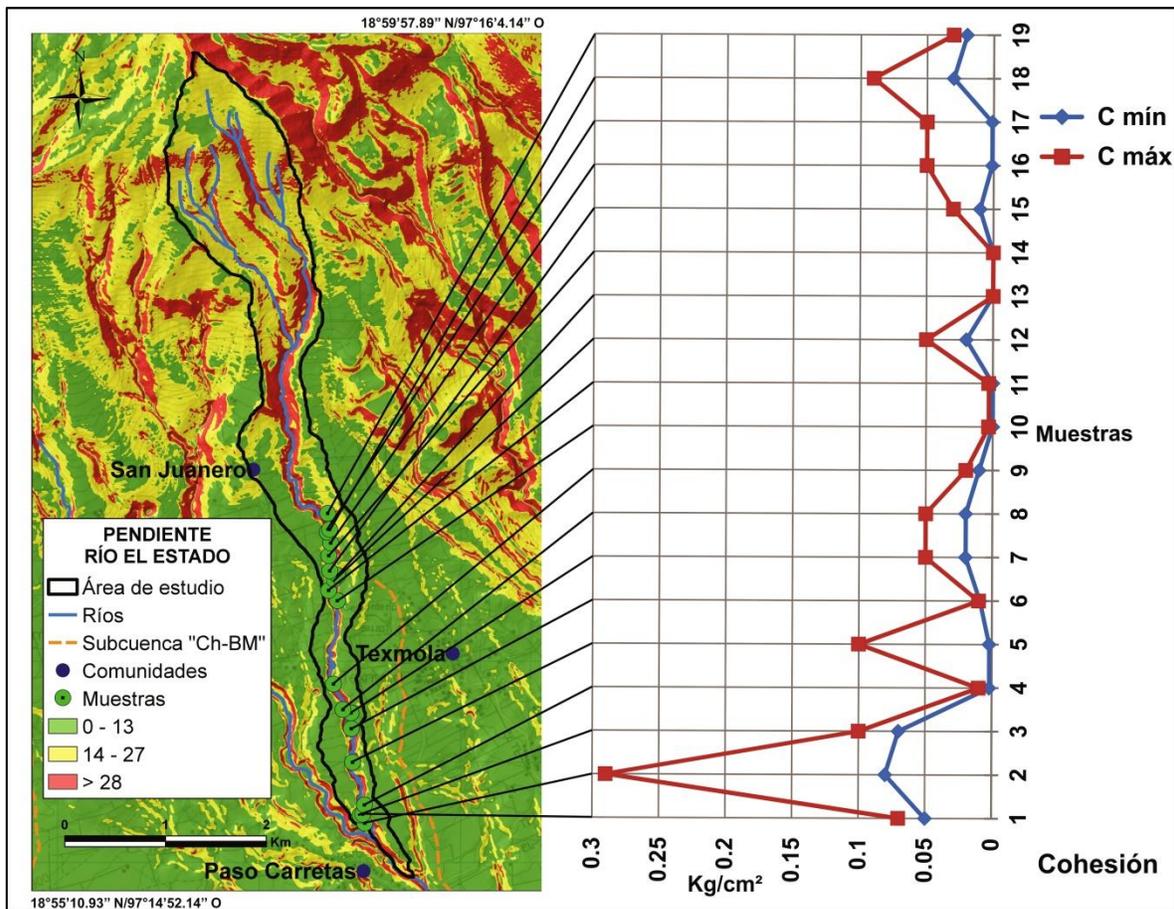


Figura 25. Gráfico de la distribución de la cohesión.

Con base en los gráficos de la distribución en los ángulos de fricción interna y cohesión, se comprueba que los deslizamientos de escombros ocurren en una amplitud de parámetros geotécnicos, mantenidos en las vertientes del valle que conservan ángulos de fricción elevados (35°) y, cohesión (0.29 K/cm^2) que mantiene fijas las partículas de material; a diferencia de los flujos de escombros y asentamiento profundo, los cuales, ocurren bajo condiciones del material más específicas como ángulos de fricción más bajos y cohesión incipiente.

Se ha detectado que en todos los deslizamientos se encuentra el mismo material, que corresponde a arena mal graduada suelta; además de que los valores en los parámetros geotécnicos, tiene una distribución específica en los distintos tipos de deslizamientos; escenarios que obedecen a la geometría de la pendiente, el nivel de erosión de los piroclastos y/o a la velocidad de movimiento del material evacuado. En seguida se menciona la composición detectada, de acuerdo al material en los distintos tipos de procesos:

- En deslizamientos de escombros, el material evacuado es predominantemente fino con algunos clastos de tamaño pequeño y se presenta suelto.
- En asentamiento profundo el material es fino con clastos y se presenta unido.
- En los flujos de escombros y avalanchas de escombros, el material involucrado es fino, con una cantidad considerable de clastos angulosos y sub angulosos de mayor tamaño.
- En las caídas de rocas, se observó la predominancia de clastos y bloques, angulosos.

Finalmente, se determina que los deslizamientos ocurren en la subcuenca “el Estado” por la convergencia de diversos factores que promueven el fallo del material y su posterior desplazamiento. La mezcla de factores permite detectar por un lado, las propiedades geotécnicas y por otro, los factores ambientales y antrópicos, que al confluir en una zona o en un punto, provocan que se generen los deslizamientos. Por lo tanto, la ocurrencia de deslizamientos en la subcuenca se debe principalmente a:

- 1) Cambio de uso de suelo (deforestación, agricultura, pastoreo, etc.).
- 2) Valores elevados en la precipitación (cerca de los 280 mm), durante la época de lluvias (abril-septiembre)
- 3) Pendientes que superan los 20° (36 %).
- 4) Tipo de material (arena mal graduada y suelta).
- 5) Baja cohesividad (por debajo de 0.29 K/cm²).
- 6) Fuerzas intermoleculares muy bajas de unión entre las partículas.
- 7) Ángulo de fallo que sobrepasa el límite de reposo (arriba de 20° (36 %)).

MODELADO CON SINMAP: Para realizar el modelo en SINMAP se utilizó el promedio de las 19 muestras (17 % del total), con base en los resultados de corte directo (ángulo de fricción interna y cohesión), ya que los valores geotécnicos permiten corroborar que el suelo está conformado por el mismo material, que consta de arena mal graduada suelta. El modelo se realizó mediante el tratamiento de capas ráster (MDE) y vectoriales (deslizamientos) en la extensión SINMAP. Para el comienzo del análisis deben ser definidos distintos parámetros, algunos vienen pre-establecidos y pueden ser modificados por el usuario. Estos son:

Constante de gravedad (9.81 m/s^2), Densidad del suelo ($2,000 \text{ k/m}^3$), Densidad del agua ($1,000 \text{ k/m}^3$).

Posteriormente se realizaron procesamientos al MDE como:

- Llenado de píxeles.
- Dirección de flujo.
- Pendiente.
- Área de contribución.

Después, fue seleccionada la capa vectorial de los deslizamientos.

En seguida deben ser calibrados los siguientes parámetros:

- Transmisividad (T/R), límites inferior y superior.
- Cohesión (C_0), límites inferior y superior.
- Ángulo de fricción interna (θ), límites inferior y superior.

Estos últimos parámetros, fueron modificados ya que se obtuvieron valores reales de las muestras sometidas a análisis geotécnicos. Después es creada la región de calibración con estos datos y el programa realiza el cálculo del índice de estabilidad, que es expresado en un mapa con zonas y colores. La zona estable (verde pistache), estable (azul), casi estable (amarillo), límite más bajo de estabilidad (rosa), límite más alto de estabilidad (rojo) e inestable (verde olivo), que expresa la estabilidad de la subcuenca. A continuación se muestra el modelo.

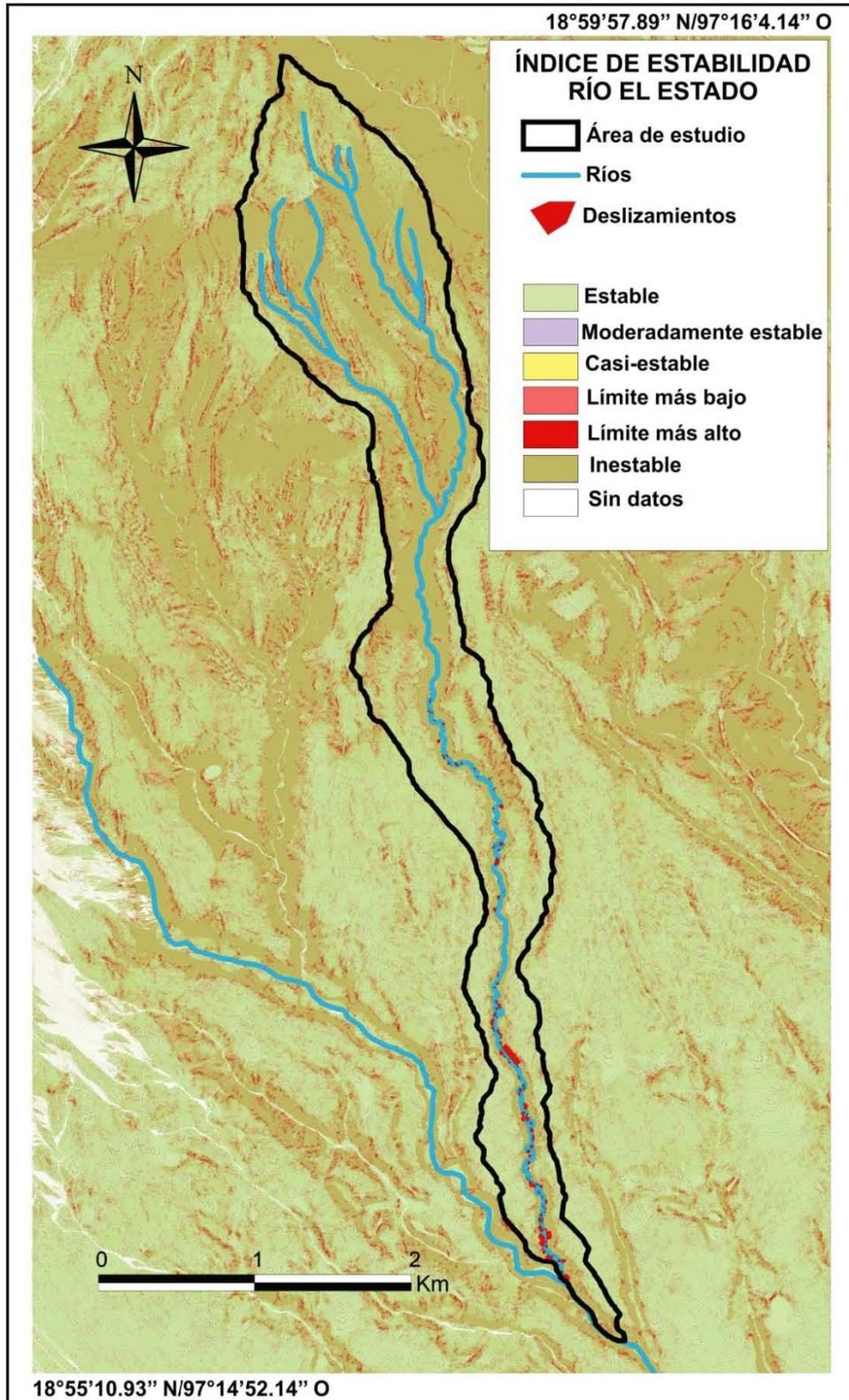


Figura 26. Cartografía del índice de estabilidad.

Cualitativamente la cartografía de la susceptibilidad (Figura 26) muestra gran parte de zonas estables en la parte baja de la subcuenca, en zonas planas donde se desarrolla la agricultura y ganadería principalmente, manteniéndose pequeñas áreas estables en la parte alta. Estas zonas se concentran principalmente en superficies alejadas del valle fluvial, donde el material descansa en pendientes planas y poco pronunciadas (menores a 10°).

En la cartografía no se presentan áreas correspondientes a zonas casi-estables, lo que ocurre debido a que los parámetros geotécnicos utilizados en el promedio de todas las muestras, se encuentran en el límite entre la zona moderadamente estable y la zona en el límite más bajo de estabilidad. Las zonas del umbral más bajo y más alto de estabilidad se ubica en pequeñas áreas distribuidas y dispersas en toda la subcuenca, principalmente en la parte alta. Estas zonas se presentan en pendientes que superan los 35° , donde el material puede fallar, producto de la deforestación, quedando el material propenso a ser alterado por diversos factores. Estas zonas se ubican de manera contigua a las zonas de estabilidad e inestabilidad.

La zona de inestabilidad se observa en gran parte de la subcuenca, predominando en la parte alta, que corresponde a la cabecera del río. En estos sitios la humedad escurre sobre la superficie y se encauza por pequeños riachuelos, hasta confluir con la corriente principal en el río "El Estado". Se observa que la cobertura vegetal es baja, compuesta por algunos pinos, herbáceas y pastos. La dinámica antrópica desarrollada en estos sitios, promueve en el suelo la exposición a factores externos que ejercen esfuerzos extras en el material, fomentando la inestabilidad.

En la parte baja de la subcuenca, las zonas inestables se concentran en las pendientes de los taludes del valle fluvial, donde la inclinación rebasa los 35° y el material es sometido a presiones por factores intrínsecos y extrínsecos, así como la humedad, que forma parte de la inestabilidad del mismo.

La subcuenca se mantiene inestable ante deslizamientos en todas las pendientes del valle, donde el material se encuentra sometido a esfuerzos que rompen la estabilidad. Se observa además que las zonas de inestabilidad abarcan superficies con vegetación escasa, lo que refleja la infiltración de la humedad en el material. La subcuenca es inestable en las pendientes del valle fluvial y en la parte alta principalmente, manteniéndose el material estable en laderas planas, ubicadas en la parte baja y en el cauce.

Además, se detecta que los valores en el ángulo de fricción interna y cohesión, no mantienen una relación directa con la profundidad, ya que se observa que se presentan valores elevados (35° máxima y 14° mínima, además de 0 y 0.003 K/cm² como cohesión máxima y mínima) en muestras tomadas muy cerca de la superficie (0.50 cm), mientras que en otras muestras a mayor profundidad (12 m), se obtuvieron valores distintos (18° máxima y 11° mínima y, 0.01 y 0.02 K/cm² como cohesión máxima y mínima), advirtiéndose que esta condición se mantiene en el material de todas las vertientes del valle.

VALIDACIÓN DEL MODELO: Para realizar la validación cuantitativa de la eficiencia en el SIG, del modelo SINMAP y del inventario de deslizamientos, fueron contabilizadas las concordancias y discordancias en áreas con y sin deslizamientos incluidos en la matriz de error (Tabla 6), para conocer la coherencia de la cartografía generada por el modelo.

	Inventario en áreas con deslizamientos	Inventarios en áreas sin deslizamiento	Total de píxeles
Modelo SINMAP en áreas con deslizamientos	6759	616142	622901
Modelo SINMAP en áreas sin deslizamientos	6226	615302	621528
Total	12985	1231444	1244429

Tabla 6. Matriz de error para estimar la coherencia del modelo.

La coherencia global ($6759+615302/1244429*100$) de mapas es de 49.99 %, que indica que la probabilidad de que se identifiquen áreas de deslizamientos o de no deslizamiento (comprobados en campo), es cercana al azar (baja).

La coherencia del productor ($6759/12985*100$), es de 52.05 %, este porcentaje es la probabilidad de que un píxel visitado en campo y marcado como deslizamiento, corresponda efectivamente a un píxel de deslizamiento en SINMAP. Esta probabilidad es arriba del azar (50 %) ya que el monto de píxeles correctamente clasificados por SINMAP, son arriba de 500 más que los incorrectamente clasificados.

La coherencia del usuario ($6759/616142*100$), es de 1.10 %, cifra que revela que el modelo SINMAP sobreestima por mucho las zonas de deslizamientos.

Con base en los resultados obtenidos, el modelo tiene mucha incertidumbre para evaluar la susceptibilidad de deslizamientos en el área de estudio, pero obtiene una coherencia arriba de la predicción aleatoria. La validación del modelo permite observar que hubo concordancia en eventos de deslizamientos por arriba de lo aleatorio entre el inventario y el modelo SINMAP (52.05 %), aunque exista una alta sobrepredicción en los eventos (1.10 %). Lo que indica que la evaluación de susceptibilidad con SINMAP no es aceptable, ya que crea escenarios erróneos en el aspecto de identificación de los deslizamientos en su sitio original (49.99 %), además de que implica un costo excesivo en el procesamiento de las muestras para la obtención de valores geotécnicos.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Esta investigación es realizada para probar un modelo que evalúe la susceptibilidad de deslizamientos y de esta forma, elegir una metodología adecuada en el río “El Estado”; ya que en México, no existen investigaciones sobre deslizamientos en terrenos volcánicos, siendo este estudio, parte de un proyecto donde se están generando datos y probando metodologías para elegir la mejor, permitiendo así, tomar decisiones referentes al ordenamientos territorial y ante una emergencia, a las autoridades encargadas de Protección Civil en las distintas localidades, municipios, ciudades y estados.

Este tema es reciente en México, ya que los deslizamientos son eventos naturales que mantienen en riesgo a la población que se asienta en sectores privilegiados de la geografía de nuestro país. Es por esto que, se están realizando esfuerzos para conocer la susceptibilidad de deslizamientos en este sector y que posteriormente, con una metodología robusta, puedan realizarse investigaciones en los terrenos volcánicos de México, que son sitios donde ocurren deslizamientos por las características particulares del material, además de las presiones que ejercen los factores ambientales y antrópicos; para salvaguardar la integridad del ser humano y sus actividades.

De esta forma, han sido probados métodos y técnicas en esta investigación, que incluyen: 1) el inventario de deslizamientos (cartas topográficas digitales e impresas, escala 1:50,000 y ortofotos de 2008, escala 1:10,000); 2) el trabajo de campo (técnicas de muestreo); 3) los análisis geotécnicos (conductividad hidráulica y corte directo), 4) la modelación con SINMAP y 5) la validación del modelo (comparación del inventario contra el modelo SINMAP).

La construcción del inventario se realiza con base en datos establecidos que se emplean para identificar y clasificar los deslizamientos en el área de estudio, así

como para la creación del inventario. Los datos establecidos comprenden clasificaciones que han sido utilizadas en estudios de deslizamientos en México y otros países, donde han sido identificados los distintos tipos, como deslizamientos de escombros, flujos de escombros, caídas de rocas, asentamiento profundo y avalanchas de escombros. En este estudio, el inventario no fue multitemporal, debido a algunos factores como: 1) las ortofotos digitales que se utilizaron para construirlo, fueron solamente un juego de una fecha (2008) y 2) ausencia de datos de esta área de estudio (archivos históricos). Además, los deslizamientos marcados en la cartografía del inventario, comprenden solamente la cabecera del evento, debido a que en la mayoría de los deslizamientos, esta fue la única estructura que se encontró en ellos, habiendo desaparecido al momento de la visita al campo el material de la zona de evacuación por la corriente del río. De esta forma, los datos sobre esta subcuenca aún están en construcción, siendo esta investigación parte de estas nuevas referencias.

Las técnicas empleadas en la recolección de muestras tienen como finalidad la adquisición de material de los escarpes principales de los distintos tipos de deslizamientos que mantengan los valores geotécnicos intactos, ya que es en esta parte del deslizamiento donde estos valores se mantienen. Tomando 1 K de material. Fue a partir de estas muestras, que se realizaron los distintos análisis para conocer los parámetros geotécnicos y obtener los valores reales del suelo en el área de estudio.

Los análisis geotécnicos efectuados a las distintas muestras, se realizaron mediante el uso de técnicas y equipos especiales, con metodologías establecidas, realizando cada uno de los pasos de manera detallada, con el fin de evitar errores en los resultados, para conocer cada uno de los parámetros y de esta forma, poder introducir en SINMAP, valores geotécnicos naturales del material del área de estudio, manteniendo de esta forma la investigación con datos reales, evitando

el uso de datos ficticios que apartaran los resultados del objetivo de esta investigación.

Se observa además que la generación y uso del MDE a 2 metros, no tuvo los resultados esperados, ya que no se obtuvo una coherencia aceptable entre el inventario y el modelo SINMAP. Sin embargo, con esta resolución se permitió la ubicación de los deslizamientos en el SIG, reconociéndose dentro del declive de la vertiente, superficies donde se pudieron trazar los polígonos que correspondieron a la cabecera de los deslizamientos. La omisión probablemente obedezca a que, durante el procesamiento de los datos, hubo algún paso que se excluyó y que deberá ser identificado y abordado en estudios posteriores.

El uso del modelo SINMAP en esta investigación, radica en que a partir de la teoría del software, aparentemente se puede utilizar en cualquier tipo de material edáfico donde existan deslizamientos traslacionales, detallando de manera cualitativa el comportamiento de la estabilidad en la subcuenca por medio de la asignación de colores a las distintas clases de estabilidad que establece el modelo. Sin embargo, al someter la cartografía a una validación de la coherencia entre el modelo y el inventario (matriz de error), el modelo resultó deficiente en los resultados de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en la subcuenca. Lo que indica que: 1) debe ser modificada la metodología donde se utilice SINMAP, 2) interfiera la experiencia del investigador o 3) el modelo no es apto para correrlo en este tipo de material, con estos parámetros geotécnicos.

Por lo tanto, la hipótesis de esta investigación ha sido disprobada, ya que se confirma que la aplicación de esta metodología en la evaluación de deslizamientos en el río El Estado, no es confiable para realizarse en terrenos volcánicos en México, debido a que el modelo SINMAP, sobreestima las zonas de deslizamientos en el área de estudio, además de resultar costosa en la realización de las pruebas geotécnicas. Lo que permite sugerir que la aplicación de otras

metodologías en el tema de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos pueden seguir siendo probadas, corrigiéndolas en las técnicas o métodos que se utilicen, para que se construya una metodología robusta donde se aborden estos fenómenos y que ayude a las autoridades a salvaguardar la integridad de la población que desarrolla sus actividades en zonas de riesgo de deslizamientos.

Es importante mencionar que estos datos, como se ha mencionado en párrafos anteriores, forman parte de los antecedentes que se están construyendo en esta área de estudio, referentes al fenómeno de la evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en terrenos volcánicos en México, que servirá como base para posteriores estudios y que brindarán fundamentos teóricos y metodológicos en futuras investigaciones en este tema en el país.

Se concluye que el uso del inventario de deslizamientos, el análisis de datos geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión y conductividad hidráulica), la modelación con SINMAP y la evaluación del modelo, permite examinar ventajas y desventajas del uso del modelo SINMAP para su empleo de manera eficiente en terrenos volcánicos en México.

En esta investigación se establece con base en los resultados obtenidos que:

- 1) Cualitativamente, se observa que la zona de inestabilidad comprende una amplia superficie en la parte alta de la subcuenca, mientras que para la parte baja, esta zona se ubica en los taludes del valle fluvial.
- 2) Cuantitativamente, se obtiene a partir de la matriz de error, una correspondencia deficiente (cercana al azar) entre el inventario y el modelo, y una sobreestimación del área susceptible a deslizamientos.
- 3) Los datos geotécnicos permitieron que el modelado se realizara de forma adecuada.

- 4) Se encuentra relación entre el tipo material y el tipo de deslizamiento.
- 5) Se presentan más deslizamientos en la parte baja del río, provocado por el control estructural de los taludes, como espesores en el material, grado en la pendiente y geotécnica del material.
- 6) El costo es elevado para realizar los análisis geotécnicos y el trabajo de campo, resultando inviable por la confiabilidad baja obtenida entre el inventario y el modelo SINMAP.
- 7) Por lo tanto, no se recomienda este modelo en trabajo de evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en terrenos volcánicos de México.

Es sugerido entonces el mejoramiento en algunos procedimientos en investigaciones futuras, en particular, en lugar de un valor booleano (“deslizamiento” o “no deslizamiento”), el modelo SINMAP podría resultar más robusto si arrojara valores de probabilidad de ocurrencia o intervalos de probabilidad, lo que daría resultados más confiables.

Es importante mencionar que es necesario que se desarrollen más estudios similares a esta investigación en la zona, con el objetivo de contar con más datos y comparar los resultados y, de esta forma, estandarizar metodologías que puedan ser utilizadas en otros sectores del país. Integrando de esta forma una metodología fortalecida en el estudio de deslizamientos en terrenos volcánicos del país, para que puedan ser tomadas de manera correcta, decisiones en el ordenamiento territorial.

El escenario en la subcuenca permite detectar por un lado los parámetros geotécnicos y por otro los factores ambientales. Factores que al confluir, desencadenan escenarios de riesgo, ante la generación de deslizamientos,

considerando a la subcuenca como inestable. Esto permite referir que el material es susceptible a fallar cuando las presiones se acumulan en un punto. Lo anterior, deja ver que los deslizamientos en esta subcuenca continuarán ocurriendo, removilizando grandes cantidades de material de las pendientes, representando un peligro a la población y a sus actividades en terrenos aguas abajo de este y otros sistemas fluviales contiguos.

En investigaciones futuras, el empleo de técnicas adecuadas y la creación de una metodología estandarizada, servirá para proporcionar a las autoridades encargadas del tema, como Direcciones Municipales y Estatales de Protección Civil correspondientes, medidas adecuadas para mitigar y prevenir los riesgos que los deslizamientos representan a la población y a sus actividades. De esta forma se busca la integridad de la población en cualquier sitio donde puedan ocurrir estos eventos.

ANEXO 1.

TABLAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

CLASE TEXTURAL	Ks (cm h ⁻¹)
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

Valores orientados en suelos con diferente textura, tomado de Flores y Alcalá, (2012).

KS (cm/hr)	INTERPRETACIÓN
< 0.0036	Muy baja
0.00360-0.036	Baja
0.0360-3.60	Moderadamente baja
0.360-3.60	Moderadamente alta
3.60-36.0	Alta
> 36.0	Muy alta

Rangos de conductividad y su interpretación, tomado de USDA, Schoeneberger et al., (1998).

APÉNDICE.

1. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

ANÁLISIS: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A FLUJO CONSTANTE Muestra de Pico de Orizaba Fecha 26 Feb 2013

Muestra No.	Núcleo No.	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Volumén
✓ Pnto4	18	3:46:00	3:47:41	3:49:07	3:51:33	3:53:32	3:55:31	
20 ml	18	4:00:60	4:01:31	4:03:29	4:05:21	4:07:18	4:09:25	
	124	-	-	-	-	-	-	
✓ Puntos material muy grueso (grava)	112	-	-	-	-	-	-	
✓ Puntos Material muy grueso (grava)	41	-	-	-	-	-	-	
	54	-	-	-	-	-	-	
✓ Puntos	99	2:52:00	3:12:26	3:41:26	3:55:06	4:15:18	4:30:51	
20ml	100	4:40:30	5:01:31	5:13:26	5:33:01	5:46:11	5:58:12	

LABORATORIO DE FÍSICA DE SUELOS
Responsable: Jorge René Alcalá Martínez

ANÁLISIS: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A FLUJO CONSTANTE Muestra de Pico de Orizaba Fecha 01 Marzo 2013

Muestra No.	Núcleo No.	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Volumén
✓ VMS WP46	36	10:10:00	10:11:03	10:12:00	10:13:07	10:15:03	10:16:17	
20ml	38	10:20:00	10:20:58	10:22:11	10:23:12	10:24:21	10:25:29	
✓ GH7-3	180	10:38:30	10:41:01	10:43:32	10:46:12	10:48:55	10:51:33	cada 3 minutos
20ml	182	11:00:00	11:03:50	11:07:06	11:10:05	11:13:23	11:17:36	
✓ DELP3	115	10:58:00	10:59:15	11:00:35	11:02:01	11:03:34	11:05:07	cada 2 minutos
20ml	116	11:10:00	11:12:23	11:14:41	11:17:03	11:19:31	11:22:04	
✓ JSD-05	5	11:10:00	11:11:50	11:14:09	11:16:59	11:20:11	11:23:34	cada 2 min
20ml	14	11:30:30	11:33:06	11:35:18	11:37:46	11:39:19	11:41:32	

LABORATORIO DE FÍSICA DE SUELOS
Responsable: Jorge René Alcalá Martínez

Tablas para flujo de conductividad hidráulica.

ANÁLISIS:
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A FLUJO CONSTANTE

Muestra de Pico de Orizaba
Fecha 6 Marzo 2013

Muestra No.	Núcleo No.	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Volumén
✓ WPS2 RMS 20ml ceniza	64	2:09:00	2:15:11	2:22:04	2:28:28	2:35:18	2:42:14	cada 6 minutos
	65	2:50:00	2:56:14	3:03:29	3:09:17	3:16:03	3:21:01	3:27:31
✓ GHY-2 capa 3 20 ml	176	5:28:30	5:29:30	5:30:04	5:31:17	5:32:51	5:33:59	
	176	5:37:00	5:37:44	5:38:34	5:39:38	5:40:31	5:41:29	
✓ WPS3 RMS 20ml	158	3:02:00	3:02:48	3:03:34	3:04:22	3:05:11	3:06:00	
	167	3:17:30	3:18:12	3:19:02	3:19:52	3:20:40	3:21:38	
✓ WP44 VMS 20ml	18	4:02:00	4:02:56	4:04:00	4:05:06	4:06:19	4:07:34	
	18	4:14:00	4:16:10	4:18:42	4:21:19	4:24:04		
✓ DRLP1	99	3:35:00	3:35:38	3:36:14	3:36:45	3:37:30	3:38:09	
	100	3:49:00	3:49:28	3:49:59	3:50:32	3:51:06	3:51:41	
✓ DRLP2	16	4:31:00	4:33:23	4:36:05	4:38:55	4:41:46	4:44:35	

LABORATORIO DE FÍSICA DE SUELOS
Responsable: Jorge René Alcalá Martínez

16 4:52:00 4:55:20 4:58:55 5:02:09 5:06:00 5:09:22

ANÁLISIS:
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A FLUJO CONSTANTE

Muestra de Pico de Orizaba
Fecha 13 Marzo 2013

Muestra No.	Núcleo No.	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	Volumén
✓ GHY-1 capa 1 20ml	186	1:19:00	1:21:03	1:23:41	1:26:12	1:28:39	1:31:11	
	186	1:35:00	1:37:04	1:39:17	1:41:34	1:43:50	1:46:07	
JSD-02 20ml	137							
	139							
✓ GHY-01 20ml	86	1:49:30	1:50:55	1:52:28	1:54:00	1:55:26	1:56:57	
	88	2:00:00	2:01:03	2:02:09	2:03:11	2:04:16	2:05:20	
✓ JSD-01 10ml	128	2:09:03	2:20:35	2:33:07	2:49:48	3:00:15	3:14:23	cada 12 min
	129	3:20:00	3:33:04	3:45:46	3:57:51	4:09:16	4:21:23	
✓ WP48 VMS 20ml	195	2:20:00	2:21:40	2:23:06	2:25:01	2:26:53	2:27:48	
	197	2:33:30	2:34:16	2:35:18	2:36:42	2:38:11	2:39:36	cada 1 min.

GHY-02
capa 24
144
153

LABORATORIO DE FÍSICA DE SUELOS

Responsable: Jorge René Alcalá Martínez

✓ WPSO
RMS
107 2:44:00 2:44:58 2:45:56 2:46:52 2:47:50 2:48:52
110 2:53:00 2:53:35 2:54:12 2:54:51 2:55:31 2:56:13

Tablas para flujo de conductividad hidráulica.

Muestra N°	Ks (cm/h)	Criterio
DRLP1	93.00	MUY ALTO
(20 ml)	109.00	MUY ALTO
WP44VMS	53.00	ALTO
(20 ml)	22.11	ALTO
DRLP2	21.00	ALTO
(20 ml)	17.00	ALTO
GHY-1	24.00	ALTO
(20 ml)	26.29	ALTO
WP46 VMS	47.00	MUY ALTO
(20 ml)	53.30	MUY ALTO
GHY-2	53.04	ALTO
(20 ml)	65.19	MUY ALTO
DRLP3	41.07	MUY ALTO
(20 ml)	24.22	ALTO
WP48-VMS	37.47	MUY ALTO
	48.00	MUY ALTO
GHY-3	22.39	ALTO
(20 ml)	17.00	ALTO
P 4-DLV	31.00	ALTO
	31.03	ALTO
JSD-01	4.47	ALTO
	6.04	ALTO
WP50 RMS	60.05	MUY ALTO
(20 ml)	91.00	MUY ALTO
JSD-02	S/D	S/D
	S/D	S/D
GHY-01	39.23	MUY ALTO
(20 ml)	55.00	MUY ALTO
WP52 RMS	9.42	ALTO
(20 ml) Ceniza	9.00	ALTO
GHY-02	S/D	S/D
	S/D	S/D
WP53RMS	73.07	MUY ALTO
(20 ml)	71.00	MUY ALTO
JSD-03	22.00	ALTO
(20 ml)	26.00	ALTO
P 5-DVL	3.00	MEDIO ALTO
(20 ml)	4.00	ALTO

Valores y criterios de conductividad hidráulica.

2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS.

MUESTRA 1.

Punto de Muestra DRL-P1	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	2
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	93.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	109.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.05
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.07
Phi Mínima (°)	13
Phi Máxima (°)	19
Espesor del suelo (cm)	200
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

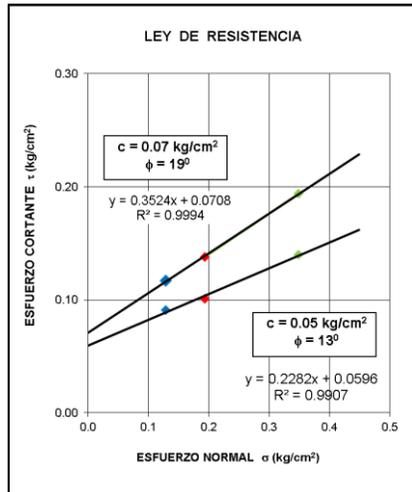
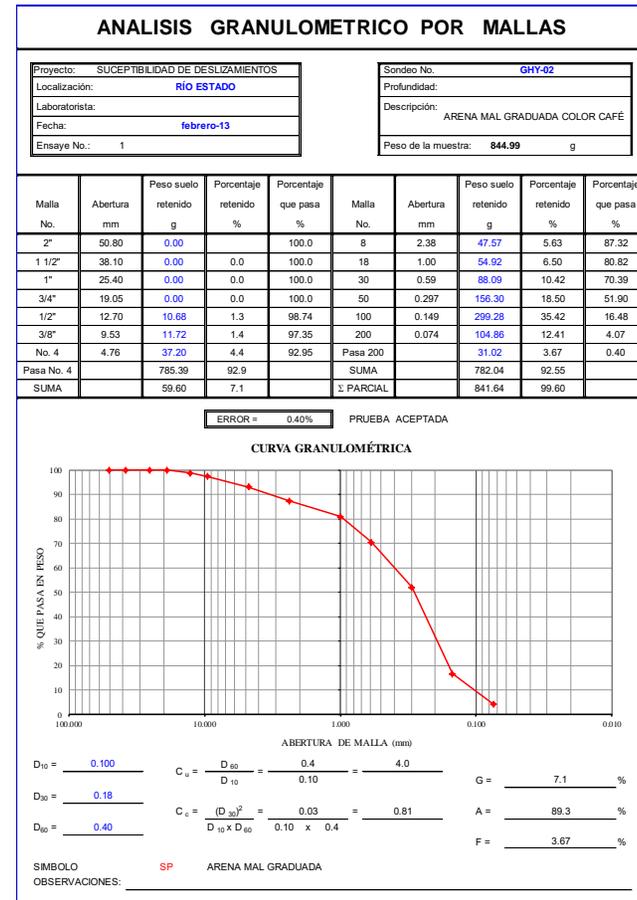


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre, muy suelta y cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 2.

Punto de Muestra WP44-VMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	7
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	53.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	22.11
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.08
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.29
Phi Mínima (°)	7
Phi Máxima (°)	11.3
Espesor del suelo (cm)	700
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

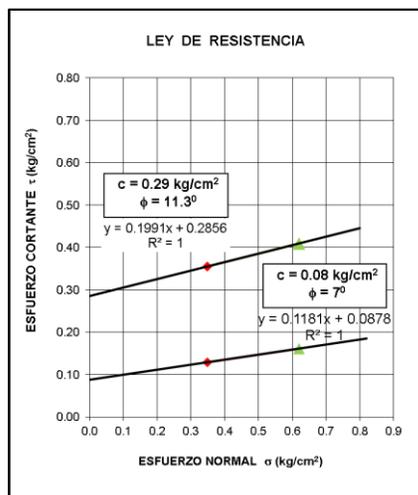
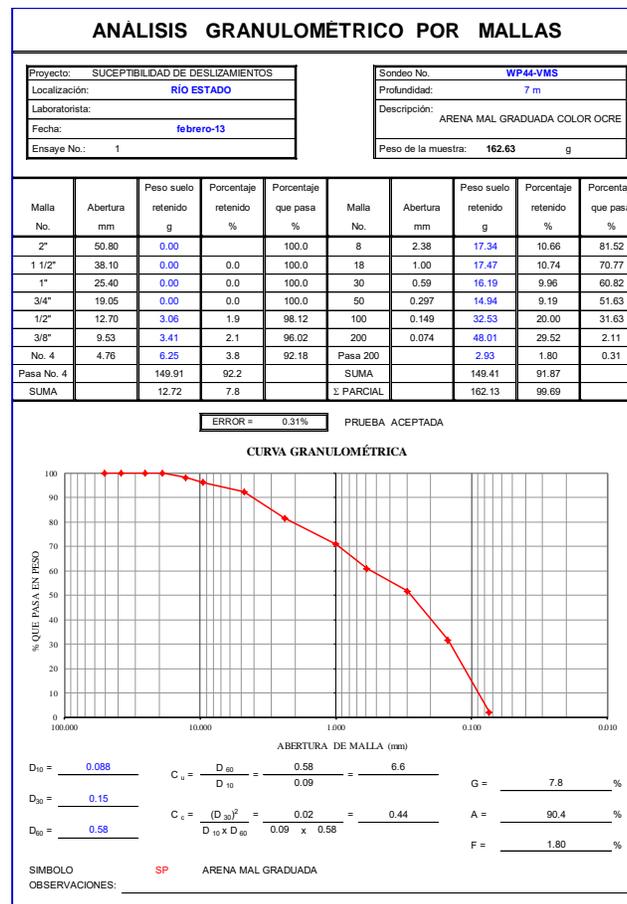


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre muy suelta, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 3.

Punto de Muestro DRL-P2	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	1.5
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	21.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	17.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.07
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.1
Phi Mínima (°)	18
Phi Máxima (°)	30
Espesor del suelo (cm)	150
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

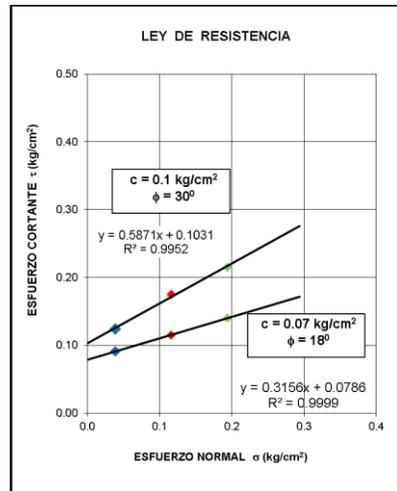
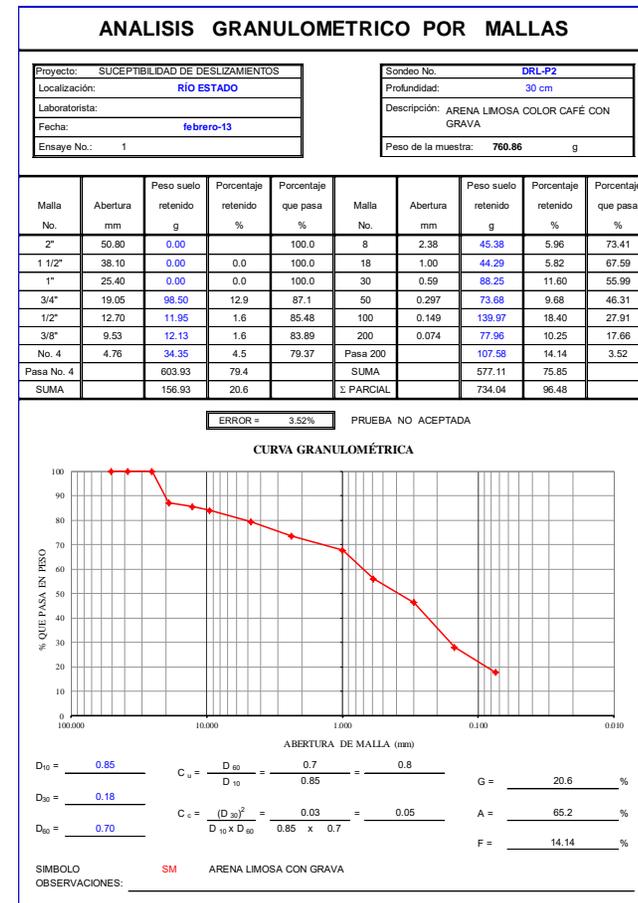


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena limosa color café con grava poco compacta, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 4.

Punto de Muestra GHY-1	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	0.40
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	24.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	26.29
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.002
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.01
Phi Mínima (°)	16
Phi Máxima (°)	18
Espesor del suelo (cm)	40
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

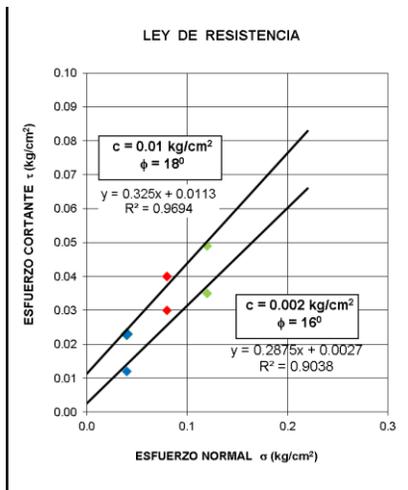
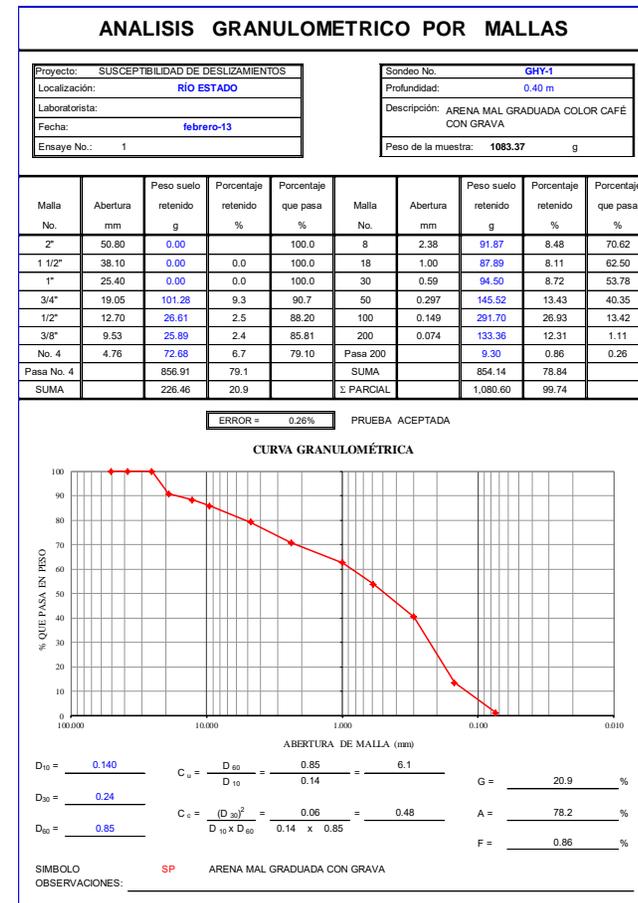


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café con grava, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 5.

Punto de Muestra WP46-VMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	5
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	47.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	53.30
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.002
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.01
Phi Mínima (°)	16
Phi Máxima (°)	18
Espesor del suelo (cm)	500
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

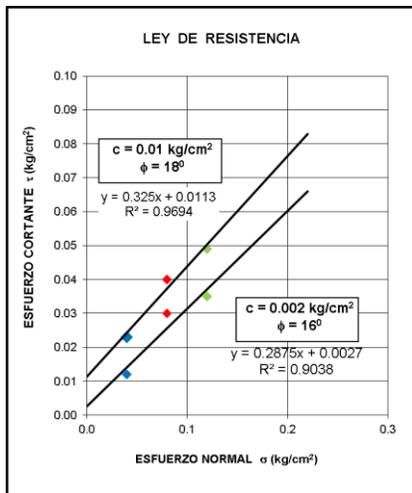
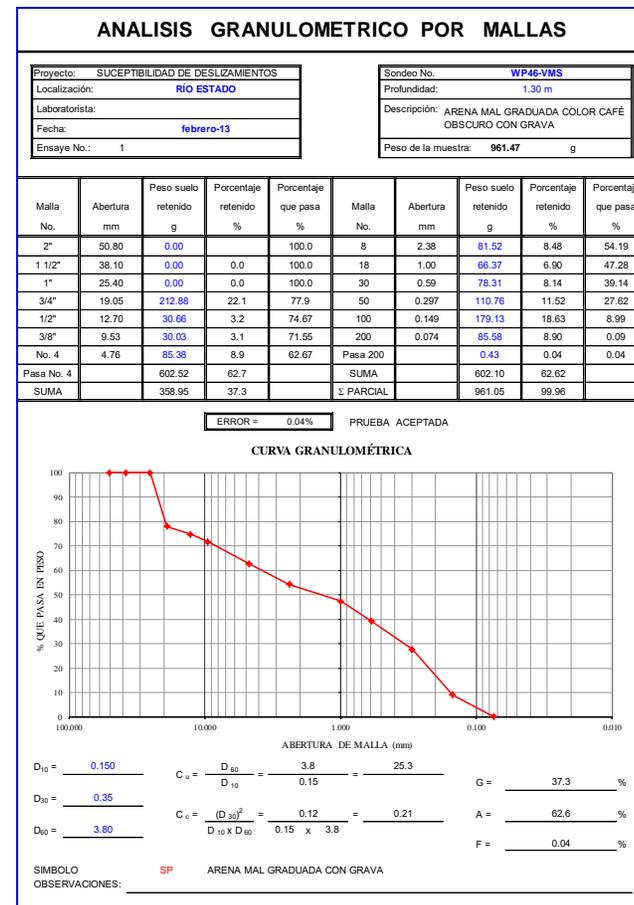


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café oscuro con grava, compactada suelta, cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 6.

Punto de Muestra GHY-2	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	3
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	53.04
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	65.19
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.009
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.01
Phi Mínima (°)	16
Phi Máxima (°)	18
Espesor del suelo (cm)	300
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

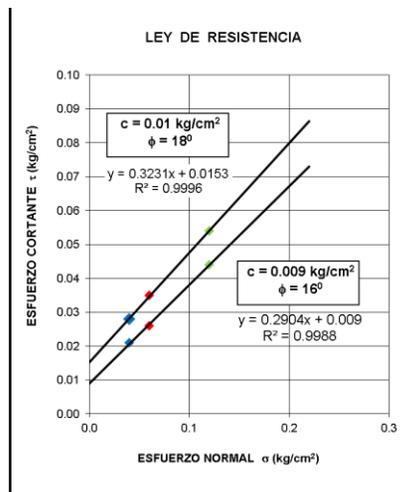
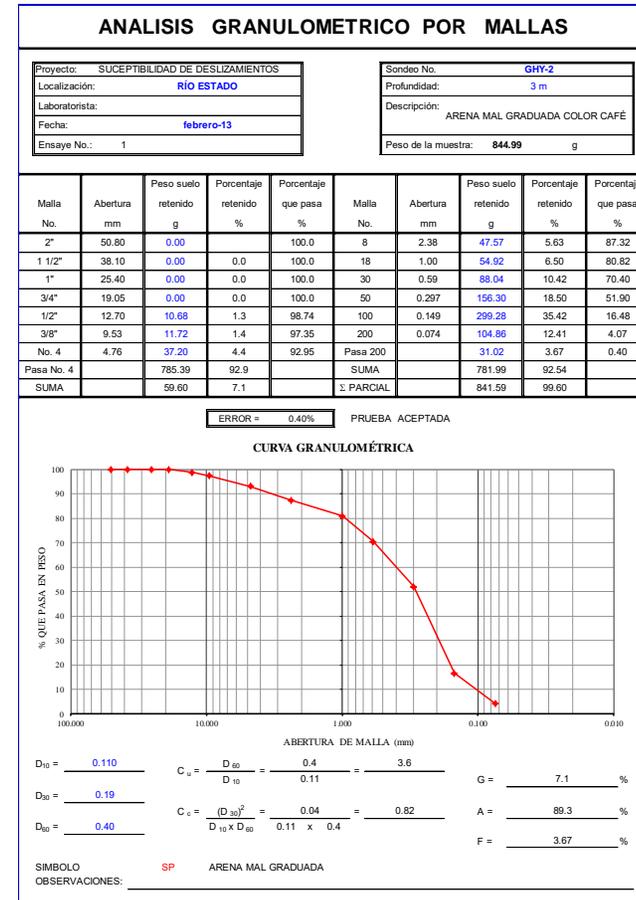


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café, compacidad suelta, cohesiva; con permeabilidad alta y muy alta.

MUESTRA 7.

Punto de Muestra DRL-P3	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	2
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	41.07
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	24.22
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.02
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.05
Phi Mínima (°)	19
Phi Máxima (°)	21
Espesor del suelo (cm)	200
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

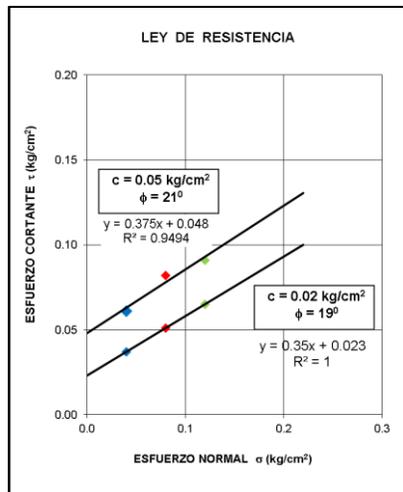
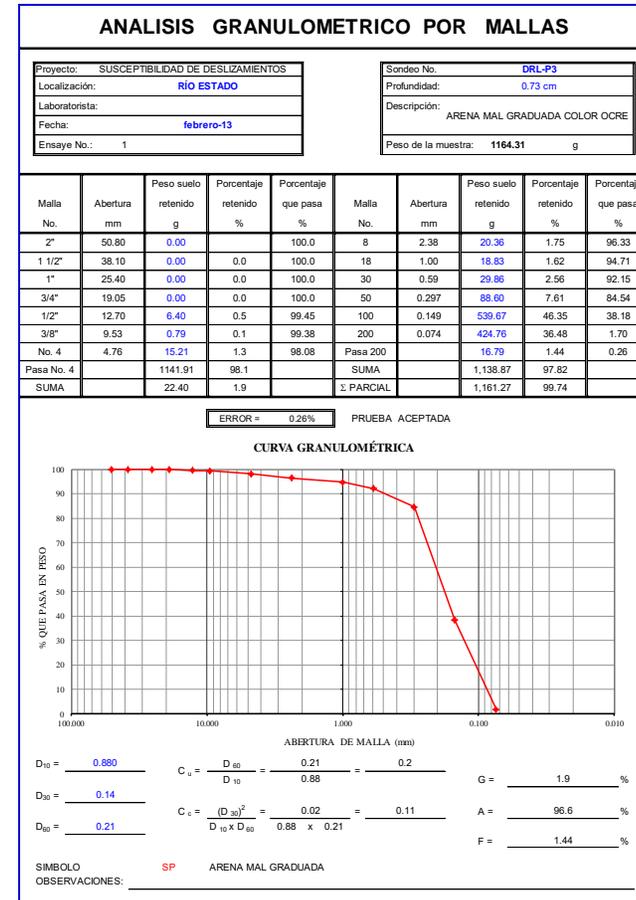


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre poco compacta, cohesiva; con permeabilidad muy alta y alta.

MUESTRA 8.

Punto de Muestra WP48-VMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	5
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	37.47
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	48.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.02
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.05
Phi Mínima (°)	19
Phi Máxima (°)	21
Espesor del suelo (cm)	500
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

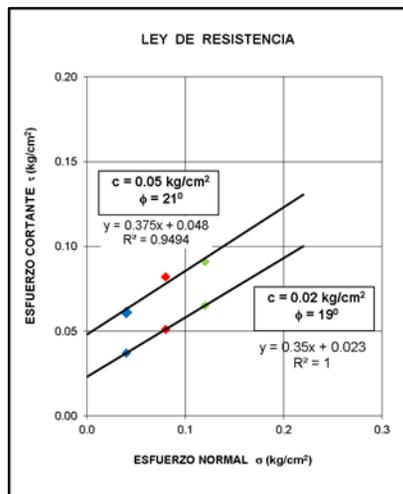
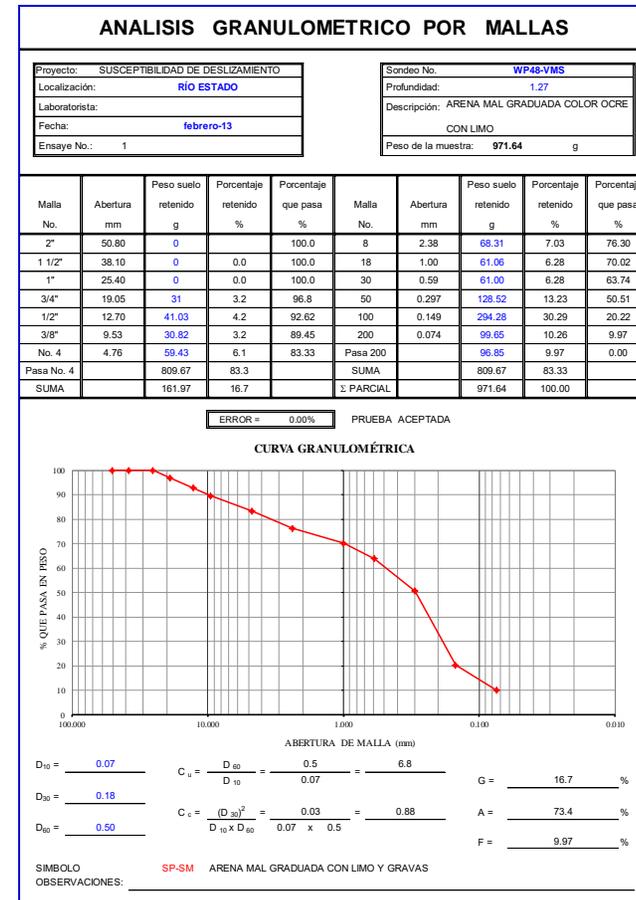


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre con limo, cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 9.

Punto de Muestra GHY-3	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	12
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	22.39
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	17.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.01
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.02
Phi Mínima (°)	11
Phi Máxima (°)	17
Espesor del suelo (cm)	1200
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

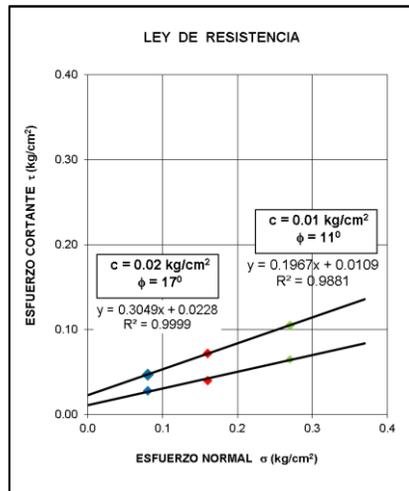
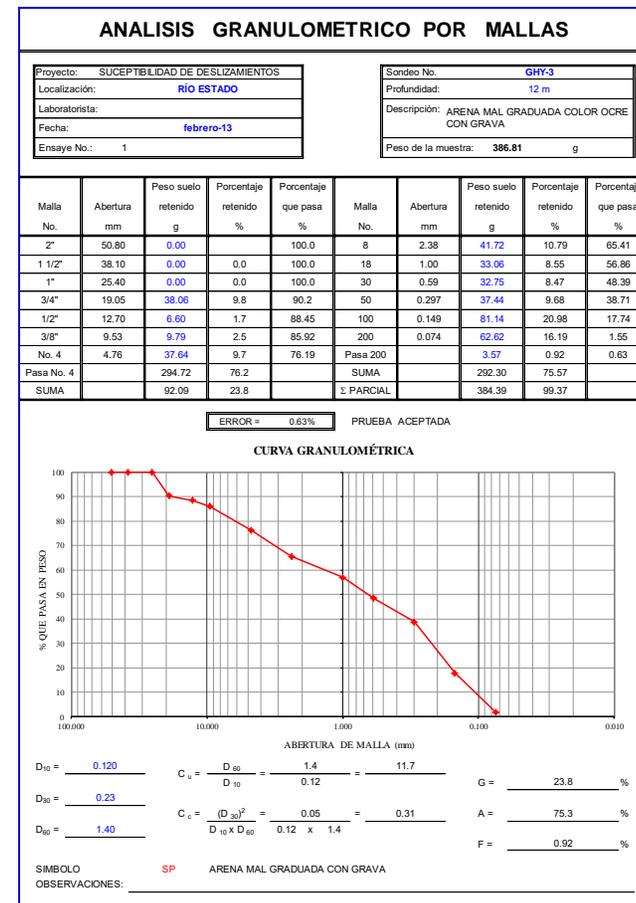


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre con grava poco compacta, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 10.

Punto de Muestra PUNTO 4-DVL	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	0.50
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	31.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	31.03
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.003
Phi Mínima (°)	14
Phi Máxima (°)	35
Espesor del suelo (cm)	50
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

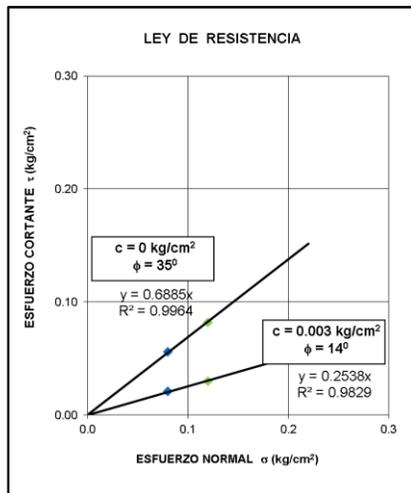
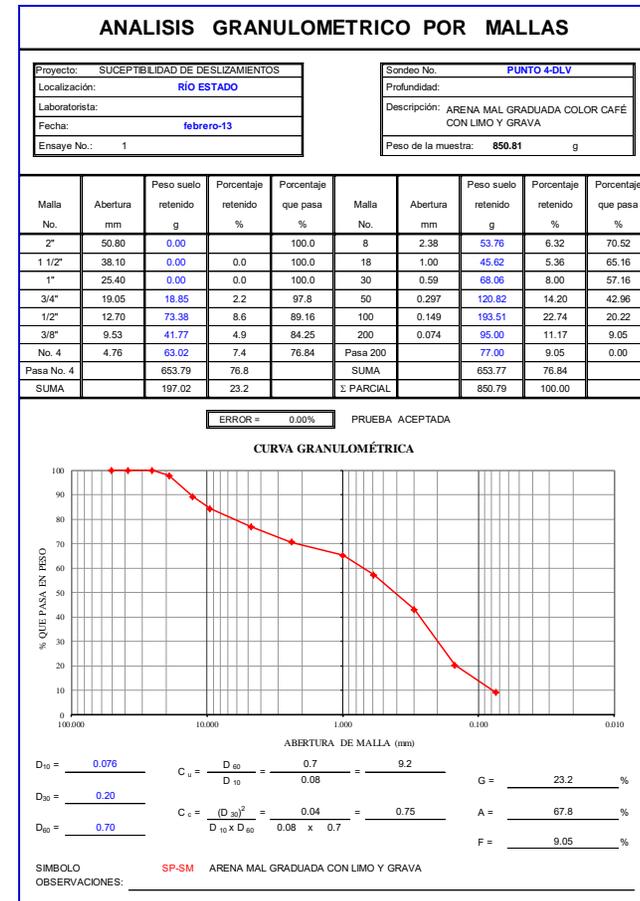


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café con limo y grava, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 11.

Punto de Muestra JSD-01	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	0.73
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	4.47
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	6.04
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.003
Phi Mínima (°)	14
Phi Máxima (°)	35
Espesor del suelo (cm)	73
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

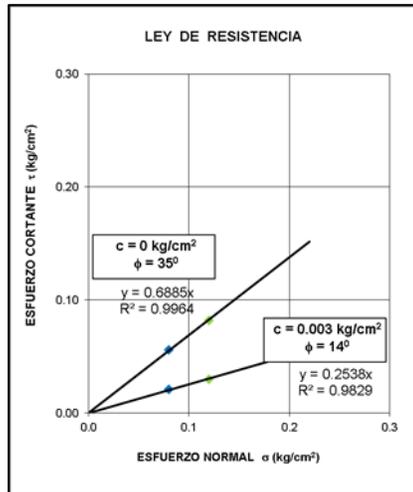
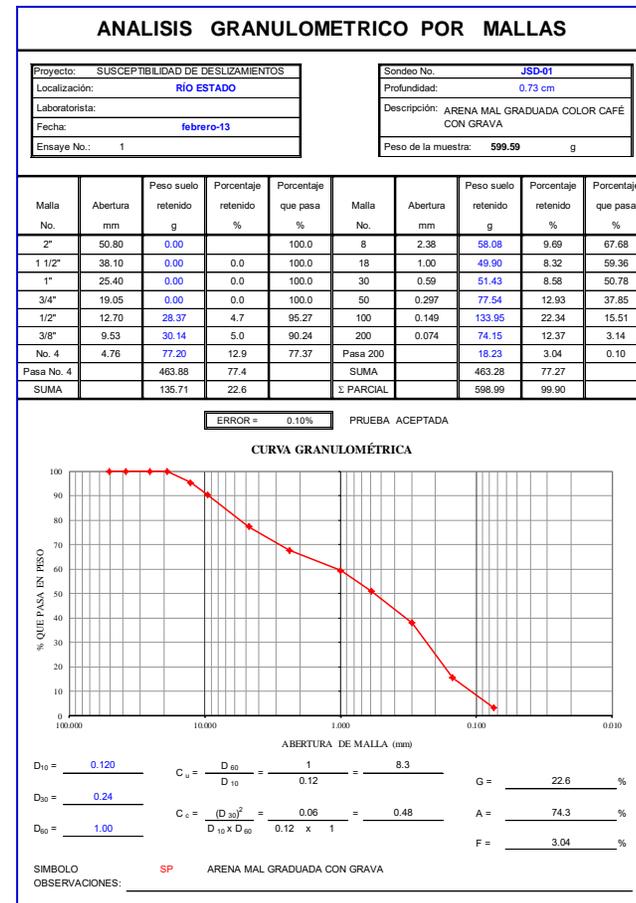


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café con grava compacta, no cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 12.

Punto de Muestra WP50-RMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	3
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	60.05
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	91.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.02
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.05
Phi Mínima (°)	6
Phi Máxima (°)	14
Espesor del suelo (cm)	300
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

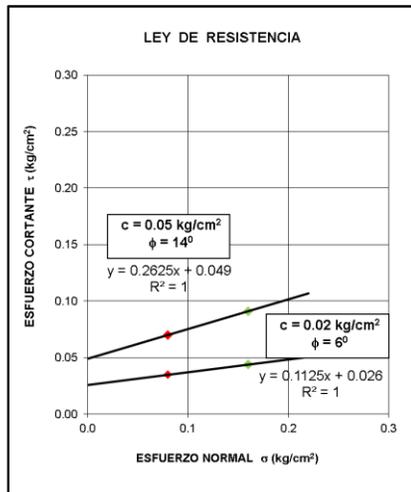
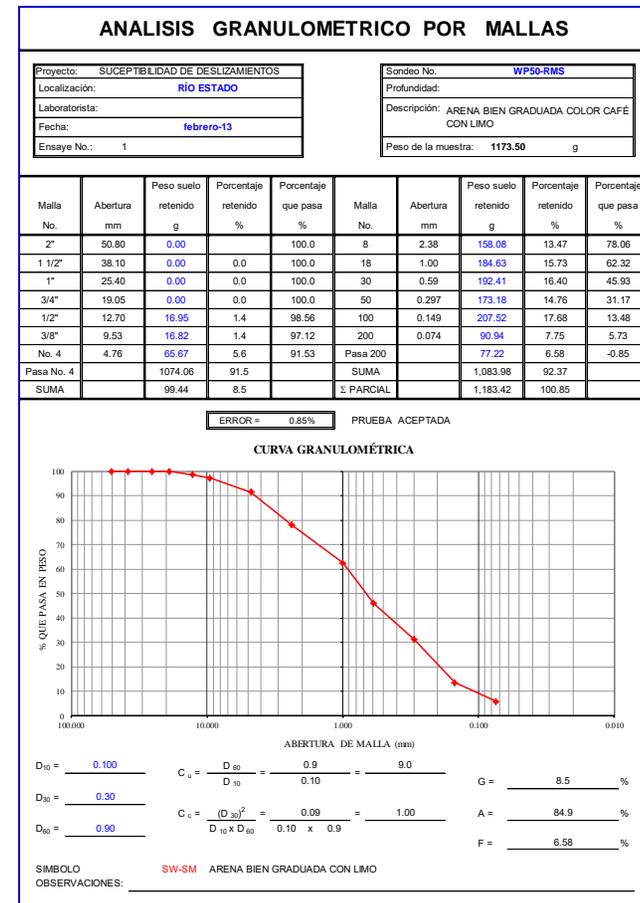


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena bien graduada color café con limo, en estado suelto, cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 13.

Punto de Muestra JSD-02	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	1.68
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	S/D
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	S/D
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0
Phi Mínima (°)	20.5
Phi Máxima (°)	28
Espesor del suelo (cm)	168
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

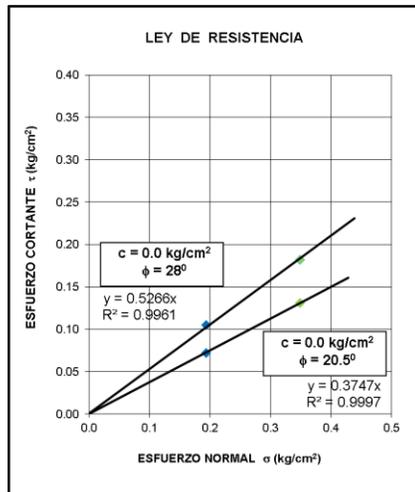
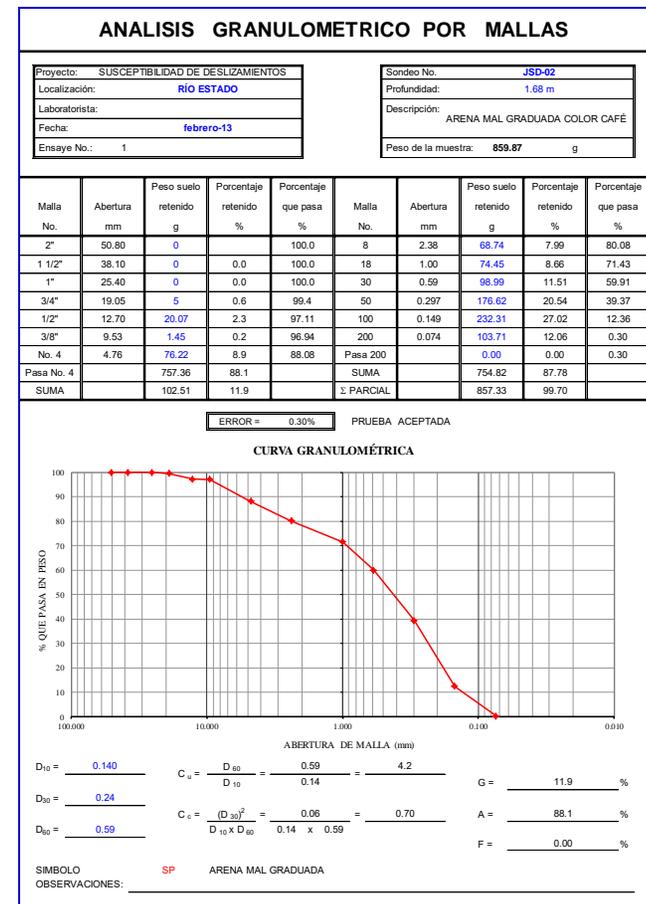


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café, medianamente compacta, no cohesiva; sin datos para permeabilidad.

MUESTRA 14.

Punto de Muestra GHY-01	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	4
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	39.23
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	55.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0
Phi Mínima (°)	20.5
Phi Máxima (°)	28
Espesor del suelo (cm)	400
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

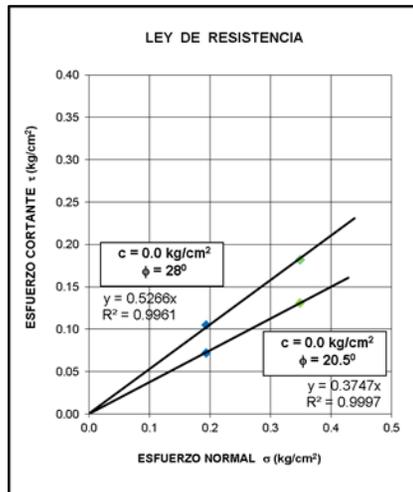
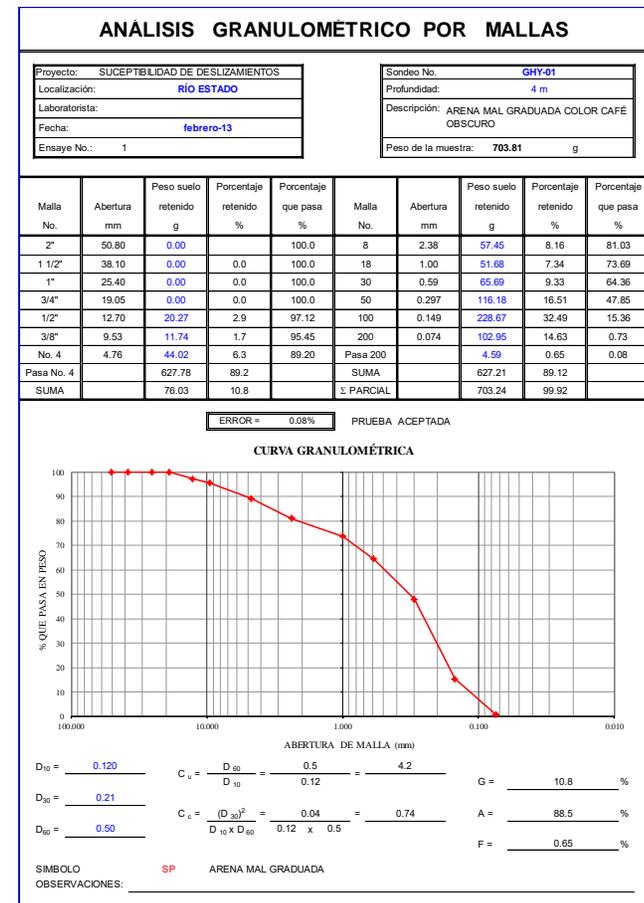


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café oscuro, no cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 15.

Punto de Muestra WP52-VMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	4
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	9.42
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	9.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.01
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.03
Phi Mínima (°)	16
Phi Máxima (°)	25
Espesor del suelo (cm)	400
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

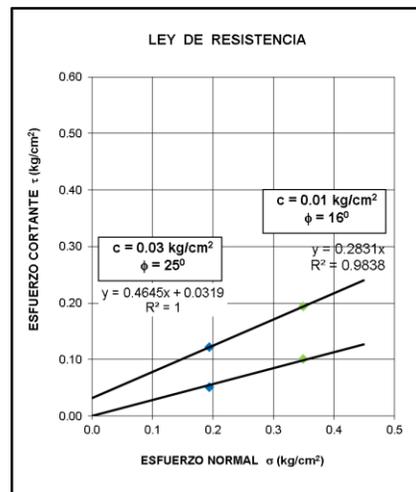
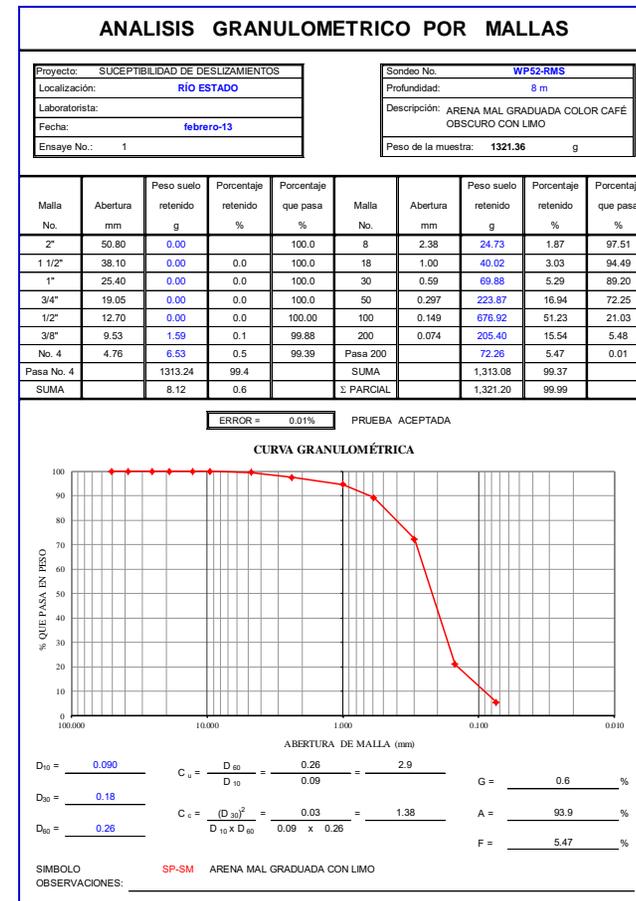


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café oscuro con limo, medianamente compacta, medianamente cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 16.

Punto de Muestra GHY-02	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	4
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	S/D
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	S/D
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.001
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.05
Phi Mínima (°)	13
Phi Máxima (°)	18
Espesor del suelo (cm)	400
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

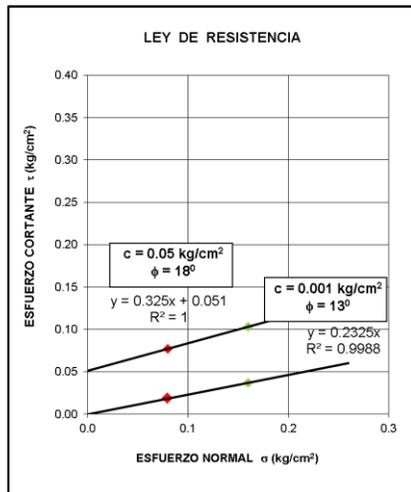
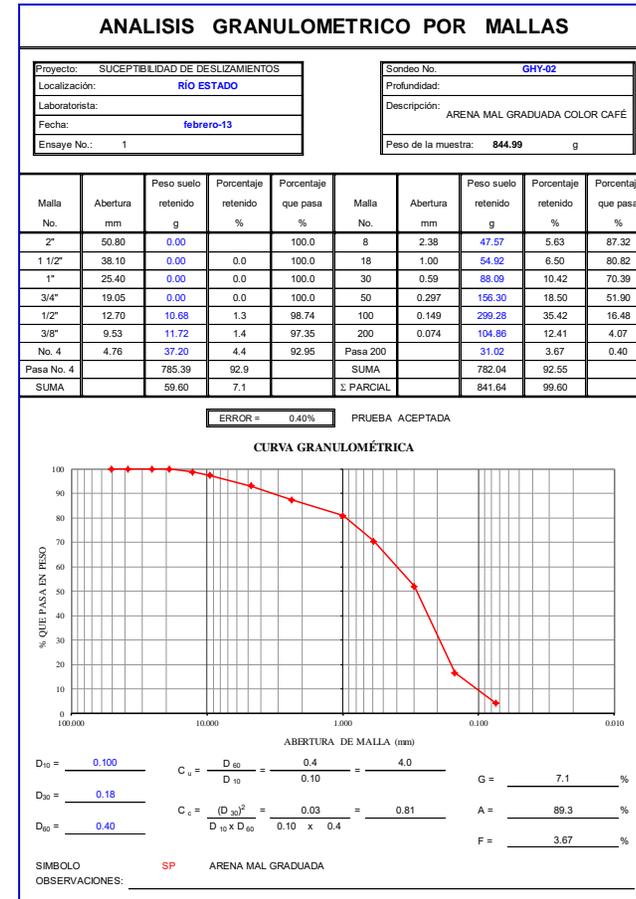


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café, medianamente cohesiva; sin datos para permeabilidad.

MUESTRA 17.

Punto de Muestra WP53-RMS	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	2
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	73.07
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	71.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.001
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.05
Phi Mínima (°)	13
Phi Máxima (°)	18
Espesor del suelo (cm)	200
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

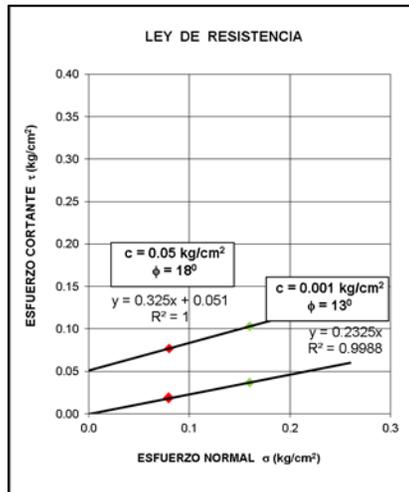
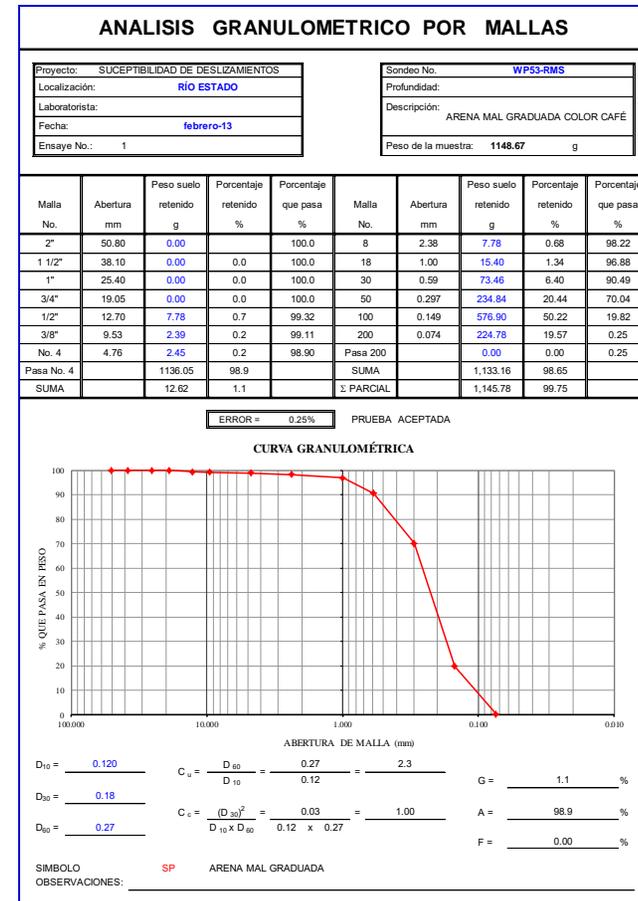


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color café, poco suelta, medianamente cohesiva; con permeabilidad muy alta.

MUESTRA 18.

Punto de Muestra JSD-03	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	19.8
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	22.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	26.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.03
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.09
Phi Mínima (°)	25
Phi Máxima (°)	33
Espesor del suelo (cm)	198
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos empleados en SINMAP.

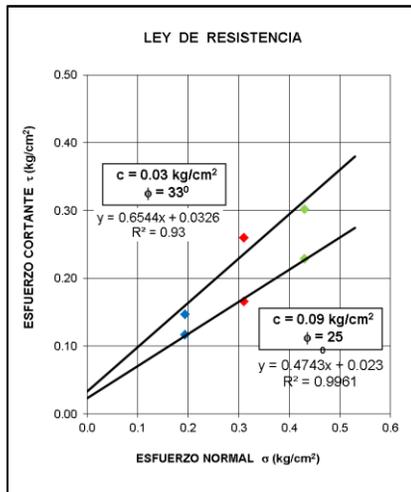
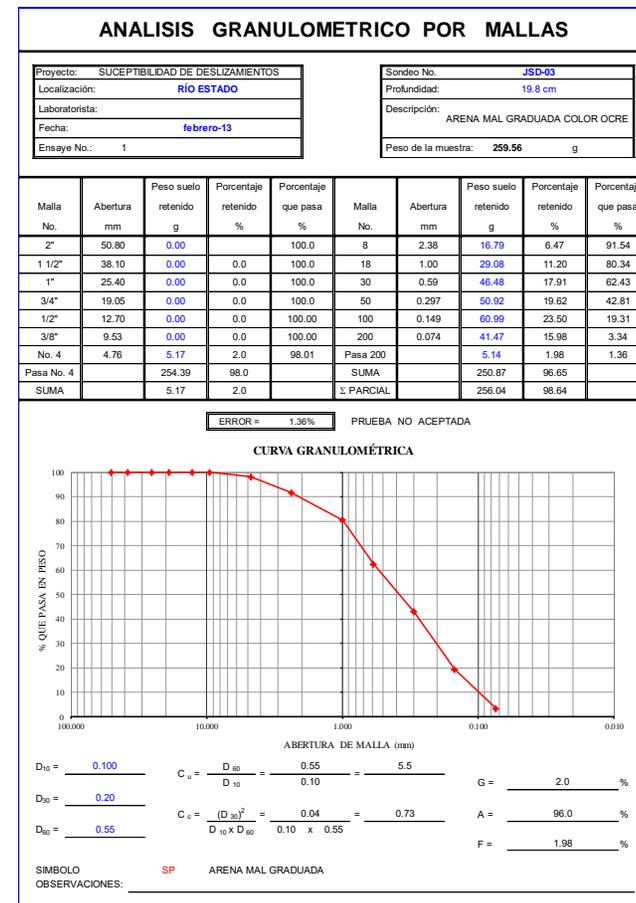


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre, compacta, cohesiva; con permeabilidad alta.

MUESTRA 19.

Punto de Muestra PUNTO 5-DVL	Parámetros
MDE (m)	2
Capa de suelo (m)	2
Gravedad (m/s ²)	9.81
Densidad del agua (kg/m ³)	1000
Densidad del suelo (kg/m ³)	1850
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	3.00
Conductividad hidráulica (Ks) (cm/h)	4.00
T/R Mínimo (m)	141.36
T/R Máximo (m)	335.63
Cohesión Mínima (kg/cm ²)	0.02
Cohesión Máxima (kg/cm ²)	0.03
Phi Mínima (°)	13
Phi Máxima (°)	21
Espesor del suelo (cm)	200
Ponderación del usuario	1

Parámetros geotécnicos
empleados en SINMAP.

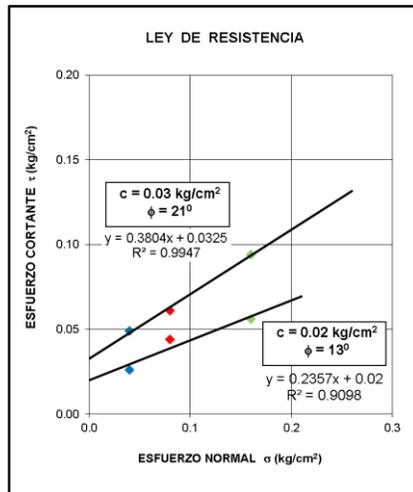
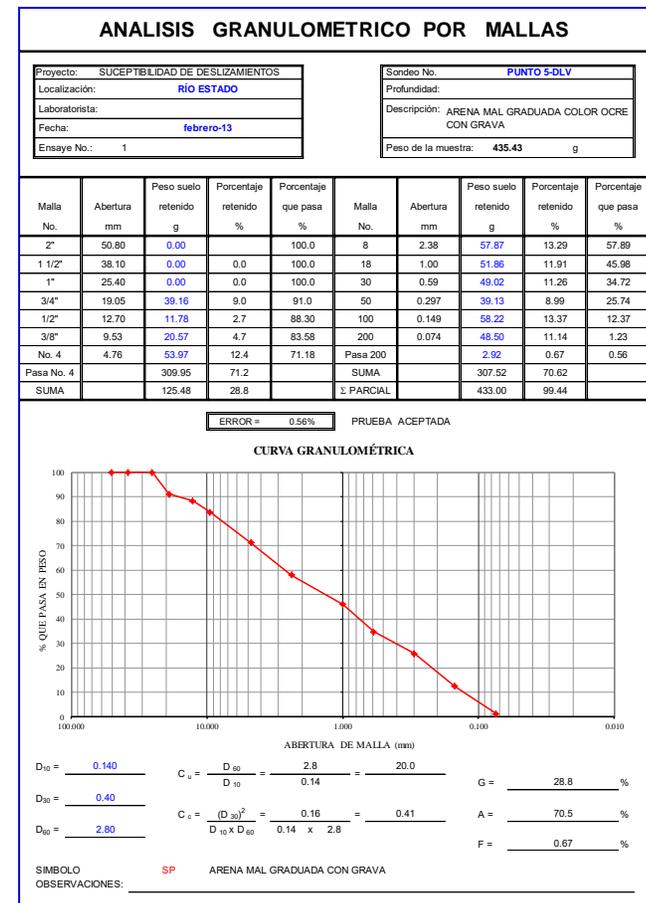


Gráfico de corte directo.



Análisis granulométrico.

Arena mal graduada color ocre con grava, poco suelta, cohesiva; con permeabilidad media alta y alta.

3. INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS DEL RÍO “EL ESTADO”.

SITIO	LATITUD (Norte)	LONGITUD (Oeste)	ALTITUD (m.s.n.m.)	TIPO DE DESLIZAMIENTO	TIPO	MARGEN
1	18°55'24.00"	97°15'5.04"	2718	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
2	18°55'25.41"	97°15'5.58"	2722	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
3	18°55'27.89"	97°15'5.86"	2738	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
4	18°55'27.82"	97°15'6.08"	2737	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
5	18°55'27.76"	97°15'6.34"	2738	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
6	18°55'28.83"	97°15'7.45"	2741	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
7	18°55'28.80"	97°15'8.21"	2743	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
8	18°55'30.22"	97°15'9.12"	2747	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
9	18°55'30.22"	97°15'9.12"	2747	flujo de escombros	Translacional	Derecho
10	18°55'31.40"	97°15'9.52"	2752	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
11	18°55'32.01"	97°15'9.28"	2753	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
12	18°55'33.19"	97°15'9.32"	2755	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
13	18°55'33.43"	97°15'9.49"	2755	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
14	18°55'33.72"	97°15'9.74"	2756	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
15	18°55'34.72"	97°15'9.79"	2759	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
16	18°55'34.53"	97°15'9.89"	2758	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
17	18°55'36.25"	97°15'10.29"	2760	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
18	18°55'36.54"	97°15'10.43"	2760	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho

19	18°55'37.43"	97°15'9.71"	2763	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
20	18°55'37.43"	97°15'9.71"	2763	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
21	18°55'37.97"	97°15'9.61"	2765	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
22	18°55'38.74"	97°15'9.63"	2767	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
23	18°55'39.17"	97°15'8.99"	2769	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
24	18°55'39.90"	97°15'10.33"	2770	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
25	18°55'41.03"	97°15'9.80"	2777	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
26	18°55'42.34"	97°15'10.87"	2776	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
27	18°55'42.57"	97°15'20.00"	2778	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
28	18°55'42.77"	97°15'10.76"	2778	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
29	18°55'43.43"	97°15'11.16"	2779	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
30	18°55'43.43"	97°15'11.16"	2779	Deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
31	18°55'43.43"	97°15'11.16"	2779	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
32	18°55'44.88"	97°15'12.65"	2784	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
33	18°55'47.07"	97°15'13.51"	2788	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
34	18°55'47.99"	97°15'13.06"	2789	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
35	18°55'49.33"	97°15'11.95"	2792	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
36	18°55'49.33"	97°15'11.95"	2792	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
37	18°55'50.64"	97°15'11.74"	2796	Posible deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
38	18°55'51.12"	97°15'12.84"	2799	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
39	18°55'53.40"	97°15'11.75"	2807	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
40	18°55'54.92"	97°15'12.20"	2810	Deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo

41	18°55'56.63"	97°15'12.11"	2813	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
42	18°55'56.58"	97°15'12.79"	2813	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
43	18°55'57.17"	97°15'13.07"	2814	Posible deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
44	18°55'57.68"	97°15'13.20"	2815	Posible deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
45	18°55'58.16"	97°15'13.09"	2816	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
46	18°55'59.56"	97°15'13.87"	2820	Posible deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
47	18°55'59.79"	97°15'13.94"	2821	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
48	18°56'2.23"	97°15'14.42"	2828	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
49	18°56'3.16"	97°15'13.63"	2830	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
50	18°56'3.16"	97°15'13.63"	2830	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
51	18°56'3.45"	97°15'14.23"	2830	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
52	18°56'4.12"	97°15'13.60"	2832	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
53	18°56'4.80"	97°15'13.72"	2834	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
54	18°56'7.57"	97°15'15.69"	2842	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
55	18°56'8.83"	97°15'15.83"	2846	Caída de rocas	Desplome	Izquierdo
56	18°56'9.21"	97°15'16.79"	2847	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
57	18°56'9.72"	97°15'16.41"	2850	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
58	18°56'10.32"	97°15'17.48"	2850	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
50	18°56'11.09"	97°15'18.11"	2851	Deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
60	18°56'12.06"	97°15'18.55"	2854	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
61	18°56'12.78"	97°15'18.97"	2857	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
62	18°56'14.09"	97°15'18.78"	2860	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo

63	18°56'14.35"	97°15'18.55"	2861	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
64	18°56'15.00"	97°15'19.36"	2863	Deslizamiento de asentamiento profundo	Rotacional	Izquierdo
65	18°56'14.97"	97°15'19.49"	2862	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
66	18°56'15.67"	97°15'19.44"	2864	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
67	18°56'16.25"	97°15'19.14"	2866	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
68	18°56'17.31"	97°15'19.87"	2868	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
69	18°56'18.53"	97°15'19.35"	2872	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
70	18°56'19.69"	97°15'18.22"	2876	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
71	18°56'20.20"	97°15'19.57"	2875	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
72	18°56'20.59"	97°15'19.21"	2877	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
73	18°56'21.43"	97°15'19.59"	2878	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
74	18°56'24.50"	97°15'19.85"	2885	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
75	18°56'25.41"	97°15'19.13"	2889	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
76	18°56'27.03"	97°15'18.87"	2894	Caída de rocas	Desplome	Derecho
77	18°56'40.60"	97°15'16.06"	2935	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
78	18°56'43.05"	97°15'18.45"	2942	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
79	18°56'44.20"	97°15'17.55"	2944	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
80	18°56'46.46"	97°15'18.70"	2951	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
81	18°56'50.76"	97°15'19.01"	2964	Deslizamiento antiguo de asentamiento profundo	Rotacional	Derecho
82	18°56'53.03"	97°15'18.50"	2974	Avalancha de escombros	Translacional	Izquierdo
83	18°56'53.44"	97°15'17.02"	2982	Avalancha de escombros	Translacional	Izquierdo
84	18°56'53.69"	97°15'19.17"	2974	Flujo de escombros	Translacional	Derecho

85	18°56'53.83"	97°15'19.40"	2973	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
86	18°56'53.97"	97°15'19.72"	2975	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
87	18°56'58.38"	97°15'18.80"	2992	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
88	18°56'58.74"	97°15'19.25"	2993	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
89	18°57'1.56"	97°15'19.52"	3003	Avalancha de escombros	Translacional	Derecho
90	18°57'2.31"	97°15'17.98"	3010	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
91	18°57'5.13"	97°15'19.77"	3017	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
92	18°57'7.32"	97°15'20.46"	3022	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
93	18°57'7.36"	97°15'20.85"	3020	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
94	18°57'8.16"	97°15'22.87"	3028	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
95	18°57'9.78"	97°15'23.61"	3034	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
96	18°57'11.08"	97°15'26.51"	3042	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
97	18°57'10.66"	97°15'27.34"	3042	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
98	18°57'10.85"	97°15'27.65"	3043	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
99	18°57'11.12"	97°15'29.02"	3044	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
100	18°57'12.25"	97°15'30.09"	3046	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
101	18°57'12.54"	97°15'29.68"	3046	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
102	18°57'12.63"	97°15'30.31"	3047	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
103	18°57'12.63"	97°15'30.31"	3047	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
104	18°57'16.00"	97°15'30.63"	3065	Flujo de escombros	Translacional	Derecho
105	18°57'17.97"	97°15'30.87"	3073	Flujo de escombros	Translacional	Izquierdo
106	18°57'17.97"	97°15'30.87"	3085	Caída de rocas	Translacional	Izquierdo

107	18°57'20.07"	97°15'33.77"	3078	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
108	18°57'20.07"	97°15'33.77"	3078	Caída de rocas	Translacional	Izquierdo
109	18°57'21.48"	97°15'33.61"	3083	Deslizamiento de escombros	Translacional	Derecho
110	18°57'21.48"	97°15'33.61"	3083	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
111	18°57'22.06"	97°15'33.47"	3084	Avalancha de escombros	Translacional	Derecho
112	18°57'24.24"	97°15'33.03"	3093	Deslizamiento de escombros	Translacional	Izquierdo
113	18°57'24.28"	97°15'32.90"	3094	Avalancha de escombros	Translacional	Derecho

- El inventario de deslizamiento fue realizado en el otoño de 2011 (2 y 3 de Diciembre), con apoyo del Dr. Gabriel Legorreta, Mtra. Rocío Alanís y Geóf. Daniela Romero.

- La obtención de muestras de los deslizamientos se desarrolló en la primavera de 2012 (30 de Abril y 1 de Mayo), con apoyo del Dr. Gabriel Legorreta, Dr. Michael Bursik, Dr. José Juan Zamorano, Dra. Lilia Arana, Mtro. Sergio Salinas, Mtra. Pouget Solene, Mtra. Rocío Alanís, Geóf. Daniela Romero y Geóf. Yarummy Álvarez.

BIBLIOGRAFÍA.

Aceves, Q.J.F., Legorreta, P.G., Lugo, H.J., Umaña, J.R., Legorreta, C.H.A., 2016, Sistemas de Información Geográfica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de la susceptibilidad en la cuenca del río “El Estado”, Pico de Orizaba, México. Investigaciones Geográficas, Núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 43-55, [dx.doi.org/10.14350/rig.46503](https://doi.org/10.14350/rig.46503).

Alcántara, A.I., 2000, Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, México, 41, 9-25.

Arriaga, L., Espinoza J.M., Aguilar C., Martínez, E., Gómez L., Loa E., 2000, Regiones terrestres prioritarias de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), CONABIO, <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tlistado.html>, (11 de Mayo de 2012).

Badillo, J.E., 1985, Mecánica de suelos Tomo I, Editorial Limusa, México, 97-119.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979, A Physically Based Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology, Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), 43-69.

Capra, L., Macías, J.L., Scott, K.M., Abrams, M., Garduño, M.V.H., 2002, Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico behavior, and implications for hazard assessment, Volcanology and Geothermal Research, 113, 81 - 110.

Carrara A, Merenda, L., 1976, Landslide inventory in northern Calabria, southern Italy. Geological Society of America Bulletin, 87, 1153–1162.

Carrasco, N.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: Mexico D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras, (9), 1 mapa, texto explicativo.

Carrasco, N.G., Rose, W.I., 1995, Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5-9.0 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69 (3/4), 197-215.

Comisión Nacional del Agua (CNA)., 2014, Registro nacional de datos climatológicos por municipio, México, CNA.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)., 2014, Anteproyecto del Programa de Manejo Parque Nacional Pico de Orizaba. México, D. F., pp. 21.

Congalton, R.G., 1994, Accuracy assessment of remotely sensed data: future needs and directions, In: *Proceedings of Pecora 12 land information from space-based systems*, 383– 388, Bethesda: ASPRS.

Congalton, R., Green, K., 1999, *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*, (CRC/Lewis Press: Boca Raton), 137.

Congalton, R.G., 2001, Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information, *International Journal of Wildland Fire*, 2001, 321– 328.

Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslides types and processes *en* Turner, A.K. y Schuster, R.L. (eds), *Landslides: Investigations and mitigations*, Transportations,

Research Board. Special Report 247, National Academy Press, Washington. D.C., 36-75.

Dikau, R., Brunsten, D., Stchrott, R., Ibsen, M., 1996, *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*, Edit. Wiley, England, 1, 2.

EPOCH (European Community Programe)., 1993, *Temporal occurrence and forecasting of landslides in European Community*, Flageollet, J.C. (ed.), 3 volumes, contract, no. 900025.

FAO Grupo de Trabajo ISSS., ISRIC., SICS., 1999, *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, Informe Sobre Recursos Mundiales de Suelo*, Italia, pp. 98.

Flores, D.L., Alcalá, M.J.R., 2012, *Manual de Procedimientos Analíticos*, Laboratorio de Física de Suelos, Departamento de Edafología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Galli, M., Ardizzone, F., Cardinalli, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2008, *Comparing landslide inventory maps*, *Geomorphology*, 94, 268-289.

García, E., 1998, *Mapa temático (climatología)*, en *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)*, Escala: 1:1,000,000, México, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, (20 de Octubre de 2012).

Gavande, S.A., 1976, *Física de los suelos*, Editorial Limusa, México, 179-232.

Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J., 2004, *Landslides Hazard and Risk*, John Wiley & Sons, Ltd., 1-40.

Grignon, A., Bobrowsky, P., Coultish, T., 2004, Landslide Database Management Philosophy in the Geological Survey of Canada, Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, 24–28th October, Quebec City, Canada, 5.

Guzzetti, F., 2000, Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy, *Engineering Geology*, Vol. 58, Issue 2, 89–107.

Hammond, C., Hall, D., Miller, S., Swetik, P., 1992, Level I Stability Analysis (LISA) Documentation for Version 2.0, General Technical Report INT-285, USDA, Forest Service Intermountain Research Station.

Hervás, J., y Bobrowsky, P., 2009, Ver Sassa, K., Canuti, P., 2009, Landslides: Disaster Risk Reduction, *en: Capítulo 19, Mapping: Inventories, Scusceptibility, Hazard and Risk*, Springer, 321-349.

Hillel, D., 1998, *Enviromental soil physics*, Academyc press, E.U.A., 173-202.

Hoskuldsson, A., 1992, Le complexe volcanique Pico de Orizaba-Sierra Negra-Cerro Las Cumbres (sud-est mexicain): structure, dymamismes eruptifs et evaluations del areas: Clermont-Ferrand, Francia, Université Blaise Pascal, Tesis doctoral, 210 pp.

Hubbard, B.E., Zimbelman, D.R., Crowley, J.K., Sheridan, M.F., Carrasco-Nuñez, G., 1999, A comparison of two spectral analysis methods for identifying and Mapping hydrothermal alteration zone, *EOS Trans.*, AGU, F1173.

Hutchinson, J.N., 1988, General report, morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hidrogeology, *In* Bonnard, C., (ed.9, Proceedings of the Earth International Symposium on Landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, 3-35 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)., 1994, Carta temática (geológica), Escala 1:250,000, México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)., 2010, México en cifras, Información nacional por entidad y municipios. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), <http://www.inegi.org.mx/>, (15 de Octubre de 2012).

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)., 1995, mapa temático (edafología), *en* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Escala 1:1,000,000, México, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>, (15 de Octubre de 2012).

IUSS Grupo de Trabajo WRB., 2007, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103.

JACS Inc., 1991, Software Paint Shop Pro, Versión 4.12, Windows NT, USA.

Jian, W., Xiang-guo, P., 2009. GIS-based landslide hazard zonation model and its application, Elsevier, *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 1,198-1,204.

Jiménez, S.J.A., De Justo, A.J.L., 1975, Geotécnia y cimientos 1: Propiedades de los suelos y las rocas, Editorial Rueda, España, 29-40.

Lambe., T.W., Whitman., R.V., 1979, Mecánica de suelos, Editorial Limusa. México.

Legorreta, P.G., Bursik, M., 2009, Logisnet: A tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis, *Computers & Geosciences*, 35, 1007–1016.

Legorreta, C.H.A., 2010, Apuntes para la asignatura de Mecánica de Suelos, Departamento de Geotécnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 116 pp.

Legorreta, P.G., Bursik, M., Aceves, Q.F., Paredes, M.L.M., Lugo H.J., Alcántara, A.I., López, G.J., 2012, Evaluación Práctica y teórica de los modelos de regresión logística múltiple y cartográfica-hidrológica para la predicción de deslizamientos de tierra, *En Temas Selectos de Geomática: Métodos y aplicaciones*, México, D.F., UNAM, 47-76.

Legorreta, P.G., Bursik, M., Ramírez, H.T., Lugo, H. J.I., Zamorano, O. J.J., Alcántara, A. I., 2013, Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in the Río Chiquito-Barranca Del Muerto Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 19, 279-289.

Legorreta, P.G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, H.J., Paredes, M.L.M., Aceves, M.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*, Volumen 66, núm. 2, 343-354.

Lillesand, T.M., Kieffer, R.W., 2000, Remote sensing and image interpretation. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Lugo, H.J., 1989, Elementos de Geomorfología aplicada, Instituto de Geografía, UNAM, México, 128 pp.

Lunnetta, R.S., Lyon, J.C., 2000, Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment, CRC Press, USA, 1-4.

Monroe, J.S., Wincander, R., Pozos, M., 2008, Geología, dinámica y evolución de la tierra, Cuarta edición, Paraninfo Cengagelearning, España, 347 pp.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1994, A Physically Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding, Water Resources Research, 30 (4), 1153-1171.

Mora, O.R.S., Rojas, G.E., 2012, Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad de San Juan de Grijalva, Chiapas, Ingeniería, Investigación y Tecnología, UNAM, México, Vol. XIII, Núm. 1, 55-68.

Ochoa, T.V., 2004, Propuesta metodológica para el estudio de la inestabilidad de laderas a partir de los MDT y la percepción remota, Tesis de maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 12.

Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., Prasad, A., 2005, SINMAP User's manual, A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, SINMAP User's Manual, Utah State University, <http://www.cwr.utexas.edu/gis/gishydro99/uwrl/sinmap.htm>, (12 de Septiembre de 2011).

Parrot, J.F., 2011, Extract_V2, Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Parrot, J.F., 2011, Dem_ascii, Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Parrot, J.F., 2012, Transf_dxf_jfp (Vector to raster format transfer), Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Parrot, J.F., 2012, Brod4_mx (Transfer of a gray tone 8 bits image of the contour lines in an integer 4 image with hypsometric values) (nueva versión “mexicana”), Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Parrot, J.F., 2012, Miel4_mx (Multi-directional interpolation applied to the image provided by the module Brod4_Mx), Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Parrot, J.F., 2013, Tlaloc (Tridimensional Landscape Analysis. Local Operating Computation), Versión 1.0, Módulo ejecutable MS-DOS, Inédito.

Rodgers, K.P., 1993, Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado, Departamento de Desarrollo regional y Medio Ambiente, Organización de estados Americanos (OEA), USA, <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/begin.htm#Contents>, (15 de Mayo de 2017).

Rodríguez, S.R., Mora, I.G., Murrieta, J.L.H., 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, Tomo LVIII, 2, 223-236.

Sánchez, T.E., 2005, Vulnerabilidad, deforestación e inestabilidad de laderas: Una zonificación de riesgo en Zacatlán, Puebla. Tesis de maestría, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 203 pp.

Sanjit, K.D., Aly, I.E.K., 2009, Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events, *Geomorphology*, 108, 219–233.

Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Broderson, W.D., 1998, Field book for describing and sampling soils, Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2015, Programa de Manejo Parque Nacional Pico de Orizaba, México, http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2015/Pico_de_Orizaba.pdf, (8 de Abril de 2017).

Selby, M.J., 1982, Hillslope materials and processes, Oxford University Press, Gran Bretaña, 264 pp.

Siebe, C. Abrams, M., Sheridan, M.F., 1993, Major Holocene block-and-ash fan at the western slope of ice-capped Pico de Orizaba volcano, México: Implications for future hazards, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.59, 1-33.

Strahler, A., N., 1957, Dimensional analysis in geomorphology, Of. Nav. Res. Proj. NR 389-042, Ted, Rep., 7, Dept. Geol., Columbia Univ., N. Y., 43.

Tangestani, M.H., 2009, A comparative study of Dempster–Shafer and fuzzy models for landslides susceptibility mapping using a GIS: An experience from Zagros Mountains, SW Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 35, 66–73.

Taud, H., Parrot, J.F., Alvarez, R., 1999, DEM generation by contour line dilation, Computers and Geosciences, 25(7), 775-783.

Van Zuidam, R.A., 1985, Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping, International Institute for Aerospace Survey and earth Sciences (ITC), Smiths Publishes, The Hague, Holanda, 6-9.

Varnes, D.J., 1958, Landslides types and processes, *in* Eckel, E.B. (ed.), Landslides and Engineering Practice, Highway Res. Board Special Report, 29, 20-47.

Varnes, D.J., 1978, Slopes movements, types and processes, Landslides: Analysis and control, transportation research board, National Academy of Science, Washington, Spec. Rep., 176, 11-33.