



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN  
MASA MEDIANTE MÉTODOS DETERMINÍSTICOS EN ANGANGUEO,  
MICHOACÁN**

TESIS:

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

CON ESPECIALIDAD EN

**GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

PRESENTA

**Ing. José Israel Bocanegra Torres**

ASESOR:

Dr. Jesús Arturo Muñoz Jauregui

CO-ASESOR:

Dra. M. Lourdes González Arqueros

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, NOVIEMBRE 2020.

## Dedicatoria

Éste trabajo va dedicado a mi familia, la cual siempre me ha impulsado a mejorar en la vida y a ser una mejor persona.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CONACyt por el apoyo económico otorgado durante el transcurso de la maestría.

A mi madre, Ma. de Lourdes Torres Cárdenas y a mi abuelita Victoria Cárdenas Mandujano por brindarme una mano siempre que la he necesitado, y por corregirme cuando ha sido necesario, son las mujeres que más admiro en mi vida, las amo.

A mi amigo Luis Oregel, que fue un apoyo a lo largo de cada semestre.

A mis asesores, por tener la paciencia y apoyo a lo largo del curso de la maestría.

Al laboratorio de materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil por abrirme las puertas para realizar las pruebas necesarias para elaborar mi tesis.

A los técnicos y amigos de la sección de mecánica de suelos por brindarme toda la ayuda que necesité.

A Michelle Moreno, por siempre estar cuando lo he necesitado, gracias por todo.

Gracias a todas las personas que han coincidido en mi vida hasta el día de hoy, por ustedes es que soy lo que soy hasta este momento.

“No se trata de cambiar el mundo. Se trata de hacer nuestro mejor esfuerzo antes de partir de éste mundo.. tal y como es. Se trata de respetar la voluntad de los demás, y creer en la tuya”

-The Boss (Metal Gear Solid III)

## Índice de contenido

RESUMEN.....	11
Abstract .....	12
Capítulo 1. Introducción.....	13
1.1 Estructura de la tesis.....	14
1.2 Objetivo.....	14
1.3. Hipótesis.....	14
Capítulo 2. Marco teórico.....	15
2.1 Procesos de Remoción en Masa.....	15
2.1.1 Desprendimientos o caídas.....	16
2.1.2 Vuelcos o desplomes:.....	16
2.1.3 Deslizamientos: .....	17
2.1.4. Flujos:.....	17
2.1.5. Movimientos complejos: .....	18
2.2. Zonificación .....	18
2.3. Susceptibilidad .....	19
2.4 Aspectos generales de los modelos de evaluación de la susceptibilidad.....	20
2.4.1 Inventario de deslizamientos .....	20
2.4.2 Enfoque Heurístico.....	20
2.4.3 Enfoque estadístico .....	20
2.4.4 Enfoque determinístico .....	20
2.4.5 Factor de seguridad .....	22
2.5 Uso de software para zonificación de la susceptibilidad a PRM y Fs.....	23
2.5.1 Modelo de estabilidad de talud infinito.....	23
2.5.2 Modelo hidrológico estático.....	25
2.5.3 Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB) .....	26
2.6 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	29
2.6.1 Consolidación de los suelos .....	29
2.6.2 Propiedades índices del suelo.....	29
2.6.3 Propiedades mecánicas de los suelos .....	33
2.7 Criterios de falla de Mohr-Coulomb .....	36
Capítulo 3. Antecedentes.....	39
Capítulo 4. Área de estudio.....	43
4.1 Localización .....	43
4.2 Hidrografía .....	45

4.3	Clima.....	45
4.4	Principales tipos de vegetación y uso de suelo.....	47
4.5	Principales actividades económicas .....	47
4.6	Geología .....	48
4.7	Edafología .....	49
	Capítulo 5. Procesos de remoción en masa en Angangueo, Michoacán .....	51
5.1	Desastres por PRM.....	51
5.2	Mapa inventario de PRM .....	51
	Capítulo 6.- Metodología .....	53
6.1	Fotointerpretación .....	53
6.2	Obtención de muestras en campo.....	54
6.3	Obtención de parámetros físicos de los suelos.....	57
6.3.1	Humedad de campo.....	57
6.3.2	Peso volumétrico húmedo del lugar (PVHL) .....	58
6.3.3	Límites de consistencia de suelos.....	60
6.3.4	Determinación de la composición granular .....	63
6.3.5	Reconstrucción de muestra.....	63
6.3.6	Prueba triaxial rápida no consolidada no drenada (U.U.) .....	66
6.3.7	Obtención de la permeabilidad mediante la prueba de consolidación unidimensional ...	68
6.3	Uso de SHALSTAB .....	71
6.4	Validación del mapa empleando la curva ROC .....	72
	Capítulo 7. Resultados de análisis de laboratorio.....	73
7.1	Datos obtenidos de campo.....	73
7.1.1	Valores de Humedad de Campo.....	76
7.1.2	Valores de Peso volumétrico húmedo del lugar (PVHL).....	76
7.2	Valores obtenidos de la prueba de límites de consistencia de suelos .....	78
7.3	Valores de la determinación de la composición granular.....	81
7.4	Valores obtenidos de la prueba triaxial rápida .....	82
7.5	Valores obtenidos de Permeabilidad .....	86
8.	Resultados generales y discusión .....	89
8.1	Verificación de resultados del mapa de susceptibilidad.....	91
8.1.1	Comparación con modelo elaborado anteriormente.....	95
8.1.2	Validación del mapa empleando la curva ROC .....	95
	Capítulo 9. Conclusiones.....	98
	Referencias.....	99
	ANEXOS.....	102

## Índice de tablas

Tabla 1.- Clasificación de movimientos de PRM.....	16
Tabla 2.- Análisis de técnicas con relación a la escala de mapas.....	21
Tabla 3.- Ventajas y desventajas relevantes de cada enfoque.....	22
Tabla 4.- Clases de estabilidad.....	28
Tabla 5.- Escala sugerida de amenaza en laderas para deslizamientos (De la Luz, y adaptada para la microcuenca "El Ventilador", Angangueo, Michoacán). ....	40
Tabla 6.- Parámetros utilizados.....	71
Tabla 7.- Espesores, ubicación y consistencia natural del terreno. ....	74
Tabla 8.- Espesores, ubicación y consistencia natural del terreno. ....	75
Tabla 9.- Humedades de campo.....	76
Tabla 10.- PVHL.....	77
Tabla 11.- PVHL.....	78
Tabla 12.-Resultados de Límites de plasticidad del PCA #4 ESTRATO #1 .....	79
Tabla 13.- Clasificación del suelo fino con base al SUCS.....	80
Tabla 14.- Clasificación del suelo fino con base al SUCS.....	81
Tabla 15.- Distribución granulométrica del PCA #7 ESTRATO #4.....	82
Tabla 16.- Clasificación de finos.....	82
Tabla 17.- Resultados de la prueba de compresión simple .....	83
Tabla 18.- Resultados de la prueba triaxial con confinamiento de 0.9 kg/cm <sup>2</sup> .....	84
Tabla 19.- Valores de ángulo de fricción y cohesión .....	86
Tabla 20.- Variación de pesos y alturas de la muestra al inicio y final de la prueba. ....	87
Tabla 21.- Cálculo de permeabilidad con base a los parámetros obtenidos.....	87
Tabla 22.- Clasificación y propiedades físico-mecánicas de los suelos analizados .....	88
Tabla 23.- Distribución de porcentajes de categorías de susceptibilidad.....	90
Tabla 24.- PRM registrados por categoría.....	92
Tabla 25.- Número de PRM en cuenca El Ventilador.....	93
Tabla 26.- Variables resultado de contraste: p.....	97
Tabla 27.- Clasificación de suelos en la zona de estudio con base al SUCS. ....	102
Tabla 28.- Descripción previa de los materiales .....	103

## Índice de figuras

Figura 1.- Representación del modelo de estabilidad de talud infinito. P representa el peso del bloque del suelo.....	24
Figura 2.- Representación del modelo hidrológico (Hutchinson, 1988) .....	25
Figura 3.- Frontera de estados del suelo en base a su contenido de agua.....	32
Figura 4.- Envoltente de falla y círculo de Mohr. Fuente: Suárez, (1998).....	36
Figura 5.- Envoltente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb. Fuente: Das, (2001) .....	37
Figura 6.- Mapa de localización de la cuenca en estudio, coordenadas WGS_1984. ....	43
Figura 7.- Microlocalización área de estudio, coordenadas WGS_1984. ....	44
Figura 8.- Red de drenaje de la cuenca en estudio .....	45
Figura 9.- Tipos de clima zona de estudio, basado en el mapa de unidades climáticas nacional de INEGI, 2018, coordenadas WGS_1984. ....	46
Figura 10.- Mapa de uso de suelo, elaboración propia con base en la interpretación en pantalla de una imagen Digital Globe del 04/08/2017, coordenadas WGS_1984.....	47
Figura 11.- Mapa geológico, coordenadas WGS_1984. ....	49
Figura 12.- Mapa de suelos, coordenadas WGS_1984. ....	50
Figura 13.- Mapa inventario de deslizamientos, coordenadas WGS_1984.....	52
Figura 14.- Proceso de fotointerpretación .....	54
Figura 15.- Morfología de la ladera, coordenadas WGS_1984.....	55
Figura 16.- Ubicación de los PCA en campo, coordenadas WGS_1984. ....	56
Figura 17.- Extracción de material del PCA #4 para su análisis en laboratorio.....	57
Figura 18.- Secado del material para cada estrato.....	58
Figura 19.- Obtención de pastillas para PVHL. ....	59
Figura 20.- Mercurio desalojado al momento de sumergir la pastilla de suelo.....	60
Figura 21.- Momento en el que el suelo llega a su LL.....	61
Figura 22.- Límites de consistencia Húmedos y secos.....	62
Figura 23.- Metodología de clasificación de suelos S.U.C.S .....	63
Figura 24.- Homogenización del material y confinamiento.....	65
Figura 25.- Muestra obtenida una vez efectuado el confinamiento y labrado de especímenes.....	66
Figura 26.- Suelo probado en compresión simple, en la parte izquierda se muestra sin carga aplicada y en la derecha se muestra el espécimen probado.....	67
Figura 27.- En la parte izquierda preparación de la muestra para su ensayo triaxial y parte derecha muestra montada para la ejecución de la prueba. ....	68
Figura 28.- Anillo sobre la muestra reconstituida (Izquierda) y labrado de éste (Derecha).....	69
Figura 29.- Grupos para consolidación. En el eje horizontal se encuentran los rangos del límite líquido de las agrupaciones de los suelos y en el eje vertical el número de muestras que se consideraron de cada rango .....	70
Figura 30.- Anillo enrasado y montado.....	70
Figura 31.- Se muestra el esquema metodológico seguido para obtener el mapa de susceptibilidad. En los recuadros de color naranja se muestra los datos requeridos de entrada de SHALSTAB y, en amarillo, la ecuación con la cual trabaja. ....	72
Figura 32.- Extracción de material del PCA #4 para su análisis en laboratorio.....	73
Figura 33.- Carta de plasticidad en la que se clasifica el suelo del PCA #4 Estrato #1. ....	80

Figura 33.- Envolvente de falla del PCA #3 Estrato #2 .....	85
Figura 34.- Mapa de susceptibilidad general, coordenadas WGS_1984.....	89
Figura 36.- Inventario de deslizamientos sobrepuesto a el mapa de susceptibilidad. ....	91
Figura 37.- Mapa de susceptibilidad en la cuenca El Ventilador (cuenca en estudio principal).....	92
Figura 38.- Inventario de deslizamientos sobrepuesto sobre mapa de susceptibilidad. ....	94
Figura 39.- Mapa de susceptibilidad De la Luz (2011).....	95
Figura 40.- Curva ROC .....	96

## Índice de ecuaciones

Ecuación 1.- Factor de seguridad .....	22
Ecuación 2.- Modelo del talud infinito.....	24
Ecuación 3.- Factor de seguridad con el modelo de estabilidad de talud infinito .....	24
Ecuación 4.- Modelo hidrológico estático.....	26
Ecuación 5.- Transmisibilidad del suelo .....	26
Ecuación 6.- Capa saturada del suelo.....	27
Ecuación 7.- Desestabilización debido a la pendiente .....	27
Ecuación 8.- Desestabilización producto del suelo saturado afectado por la pendiente .....	27
Ecuación 9.- Igualación de ecuaciones.....	28
Ecuación 10.- Ecuación de criterios de susceptibilidad SHALSTAB.....	28
Ecuación 11.- Cálculo del contenido de humedad .....	30
Ecuación 12.- Cálculo del peso volumétrico natural.....	30
Ecuación 13.- Cálculo del grado de saturación del suelo.....	30
Ecuación 14.- Cálculo de la densidad de sólidos .....	31
Ecuación 15.- Cálculo de la relación de vacíos de los suelos .....	32
Ecuación 16.- Cálculo de la porosidad de los suelos .....	32
Ecuación 17.- Cálculo del esfuerzo cortante para suelos saturados .....	33
Ecuación 18.- Cálculo del esfuerzo cortante para suelos parcialmente saturados.....	33
Ecuación 19.- Coeficiente de rozamiento.....	34
Ecuación 20.- Criterio de falla Mohr-Coulomb .....	36
Ecuación 21.- Cálculo de la humedad de campo.....	57
Ecuación 22.- Cálculo del PVHL.....	60
Ecuación 23.- Cálculo del material requerido para reconstruir una muestra representativa de campo .....	64
Ecuación 24.- Cálculo del agua necesaria para reconstruir una muestra representativa de campo... 64	64

## RESUMEN

Los procesos de remoción en masa en la cuenca de Angangueo, Michoacán, son frecuentes y es un peligro latente para la población que ahí habita. Los días 3 y 4 de febrero del año 2010, precipitaciones desencadenaron una serie de procesos de remoción en masa (PRM), mismos que provocaron la pérdida de 35 personas, dejó más de 20,000 damnificados, y ocasionó cuantiosas pérdidas materiales y económicas. Se cree que la acción de las propiedades físicas de los suelos es clave para explicar y prevenir los PRM en la cuenca de estudio.

Se realizó la zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa utilizando la extensión de la herramienta Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB) en Arc Gis 10.6, la cual modela el Factor de Seguridad (FS). El modelo fue alimentado con las propiedades mecánicas: ángulo de fricción, cohesión y peso volumétrico húmedo del lugar, además del modelo digital de elevación y dirección de flujo en infinitas direcciones. Estos parámetros se obtuvieron a través del análisis de laboratorio. Para ello se analizaron 24 estratos, clasificados con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, Guerra, 2018). Los puntos de muestreo se identificaron con base en la morfología de las laderas de la cuenca El Ventilador, Angangueo, Michoacán. Los resultados indicaron que las clases fueron: incondicionalmente inestable (10.9%),  $\log q/T < -3.1$  (8.2%),  $-3.1 < \log q/T < -2.8$  (15.9%),  $-2.8 < \log q/T < -2.2$  (10.4%),  $-2.5 < \log q/T < -2.2$  (0.6%),  $\log q/T > -2.2$  (2.7%) e incondicionalmente estable (51.3%), en función de la relación del área de drenaje y la transmisibilidad del suelo. Los resultados del mapa se validaron a través de la curva ROC, teniendo un área bajo la curva de 0.718 y un error estándar estimado de 0.36. El rango de valores de la curva ROC para un buen ajuste es de 0.5 a 1, mientras que valores por debajo de 0.5 representan un ajuste aleatorio, por lo que modelo se considera aceptable. Los resultados sugieren que las características de los suelos son un indicador para explicar la ocurrencia de PRM en la cuenca de Angangueo.

**Palabras Clave:** Susceptibilidad a PRM, S.U.C.S, SHALSTAB, esfuerzo cortante, ángulo de fricción.

## **Abstract**

Mass removal processes in the Angangueo basin, Michoacán are frequent and it is a latent danger for the population that lives there. On February 3 and 4, 2010, rainfall triggered a series of mass removal processes (PRM), which caused the loss of 35 people, left more than 20,000 victims, and caused significant material and economic losses. The action of the physical properties of the soils is believed to be key to explain and prevent the PRM in the study basin.

Zoning of the susceptibility to mass removal processes were performed using the Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB) tool extension in Arc Gis 10.6, which models the Safety Factor (FS): The model was fed with the mechanical properties: angle of friction, cohesion and wet volumetric weight of the place, in addition to the digital model of elevation and flow direction in infinite directions. These parameters were obtained through laboratory analysis. For this, 24 strata were analyzed, classified based on the Unified Soil Classification System (SUCS, Guerra, 2018). The sampling points were identified based on the morphology of the slopes of the El Ventilador basin, Angangueo, Michoacán. The results indicated that for class they were: unconditionally unstable (10.9%),  $\log q / T < -3.1$  (8.2%),  $-3.1 < \log q / T < -2.8$  (15.9%),  $-2.8 < \log q / T < -2.2$  (10.4%),  $-2.5 < \log q / T < -2.2$  (0.6%),  $\log q / T > -2.2$  (2.7%) and unconditionally stable (51.3%), depending on the relationship of the drainage area and soil transmissibility. The map results were validated through the ROC curve, having an area under the curve of 0.718 and an estimated standard error of 0.36. The range of values of the ROC curve is 0.5 to 1 for a good fit, while that values below 0.5 represent a random adjustment, so the model is considered acceptable since it presented more than 0.5 validation. The results suggest that the characteristics of the soils are an indicator to explain the occurrence of PRM in the Angangueo basin.

## **Capítulo 1. Introducción**

En México y diversas partes del mundo los desastres asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos en el ámbito socio-económico y ambiental. Además de las pérdidas de vidas humanas, generan afectaciones a las viviendas y a la infraestructura (Galindo & Alcántara , 2015).

En la cuenca del río Angangueo ocurren de manera frecuente procesos de remoción en masa debido a la morfología de las laderas, geología, uso de suelo, y régimen de precipitación, por lo que es aconsejable realizar una adecuada planeación urbana sustentada en estudios de susceptibilidad a los PRM. En el presente estudio se evaluó la susceptibilidad a los PRM por medio del análisis de parámetros físicos del suelo como el ángulo de fricción, la cohesión, la inclinación de la pendiente y el peso volumétrico de los suelos. Este estudio pretende generar información que ayude a la población a establecerse en zonas seguras o bien, a estar preparados ante un posible evento. Cabe señalar que existe un atlas de riesgos naturales del municipio de Angangueo, Michoacán, publicado por la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL) en el año 2012 sin embargo, no existe un mapa que indique la evaluación de la susceptibilidad en la región.

Para poder definir la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa se utilizó Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB), el cual requiere información de los suelos en campo, tales como el ángulo de fricción del suelo, cohesión, peso volumétrico de campo y espesores.

## **1.1 Estructura de la tesis**

El presente documento se estructuró en 9 capítulos. En el capítulo 2 se describen los conceptos más relevantes que enmarcan el estudio de los procesos de remoción en masa y que fueron la base teórica de este trabajo. En el capítulo 3 se mencionan los principales trabajos que se han hecho en la zona de estudio, donde se resaltó las metodologías empleadas y sus principales resultados. En el capítulo 4 se resumen las principales características físico-ambientales de la zona de estudio. El capítulo 5 presenta el contexto de los procesos de remoción en masa de la zona de estudio. En el capítulo 6 se presenta la metodología empleada para obtener los datos necesarios para el uso de SIG SHALSTAB. En el capítulo 7 se presenta el análisis y los resultados que permiten conocer las propiedades mecánicas de suelo relacionadas con la inestabilidad de laderas la metodología y los resultados de la evaluación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa mediante una metodología determinística aplicando la herramienta SIG SHALSTAB. El capítulo 8 está dedicado a la presentación de las principales conclusiones de este estudio.

## **1.2 Objetivo**

Realizar un mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en Angangueo, Michoacán, a través del análisis de las propiedades mecánicas de los suelos.

## **1.3. Hipótesis**

El factor principal que condiciona la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en la cuenca de Palo Amarillo, en municipio de Anganguero es el comportamiento mecánico de los suelos.

## **Capítulo 2. Marco teórico**

### **2.1 Procesos de Remoción en Masa**

Los procesos de remoción en masa (PRM) son el movimiento de los materiales formadores de las laderas, que son las rocas y el suelo bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia de algún agente de transporte fluido (Brunsden, 1973). De acuerdo con Alcántara Ayala (2000) los términos como “procesos gravitacionales”, “procesos de ladera y “movimientos de ladera” son empleados ampliamente como sinónimo de los procesos de remoción en masa.

Alcántara Ayala (2000) definió a los PRM como el movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento. Según Das (1999), los PRM son un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de una ladera, en el cual el centro de gravedad de la masa que se desplaza se mueve hacia abajo y hacia el exterior.

Los procesos de remoción en masa o movimientos del terreno ocurren debido a dos causas fundamentales, que pueden ser de tipo externo o de tipo interno (Das, 1999). Las causas externas son todas aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales. Y las causas internas son las que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o los esfuerzos (Alcántara Ayala, 2000).

Existe una clasificación elaborada por el *European Commuty Programme* (EPOCH, 1993) que considera los aspectos del movimiento. La cual presenta la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) que elaboran una diferenciación entre el tipo de movimiento y los materiales involucrados (Tabla 1).

Tabla 1.- Clasificación de movimientos de PRM.

MECANISMO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL INVOLUCRADO		
	Roca ( <i>rock</i> )	Derrubios ( <i>debris</i> )	Suelo ( <i>Soil</i> )
<b>Desprendimientos (<i>Fall</i>)</b>	Caída o desprendimiento de rocas ( <i>rockfall</i> )	Caída o desprendimiento de derrubios ( <i>debris fall</i> )	Caída o desprendimiento de suelos ( <i>Soil fail</i> )
<b>Vuelco o desplome (<i>Topple</i>)</b>	Vuelco o desplome de rocas ( <i>rock topple</i> )	Vuelco o desplome de derrubios ( <i>debris topple</i> )	Vuelco o desplome de suelos ( <i>soil topple</i> )
<b>Desplazamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)</b>	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> )
<b>Desplazamiento translacional o de bloques no rotacional (<i>Translational slide, non rotational</i>)</b>	Deslizamiento de roca en bloque ( <i>block slide</i> )	Deslizamiento de derrubios en bloque ( <i>block slide</i> )	Deslizamiento de translacional de suelos ( <i>slab slide</i> )
<b>Deslizamiento planar</b>	Deslizamiento de rocas ( <i>rock slide</i> )	Deslizamiento de derrubios ( <i>debris slide</i> )	Coladas de barro ( <i>mudslide</i> )
<b>Flujos (<i>flow</i>)</b>	Flujo de rocas ( <i>rock flow</i> )	Corrientes de derrubios ( <i>debris flow</i> )	Flujos de tierra, arena o suelo ( <i>soil flow</i> )
<b>Expansión lateral (<i>Lateral spreading</i>)</b>	Expansiones laterales en rocas ( <i>rock spreading</i> )	Expansiones laterales en derrubios ( <i>debris spread</i> )	Expansiones laterales en suelos ( <i>Soil spreading</i> )
<b>Complejo (<i>complex</i>)</b>	Ejemplo: Alud de rocas ( <i>rock avalanche</i> )	Ejemplo: Flujo deslizante ( <i>flow slide</i> )	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras ( <i>Slump earthflow</i> )

Fuente: Alcántara (2000), basado en Epoch (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).

A continuación, se definen los principales mecanismos de movimiento.

### 2.1.1 Desprendimientos o caídas:

Son aquellos movimientos de caída libre en laderas formadas por detritos o suelos (Alcántara, 2000).

### 2.1.2 Vuelcos o desplomes:

Consisten en la rotación hacia delante de unidades de material, donde el centro de giro se encuentra por debajo del centro de gravedad de la unidad. Ocurren principalmente en

formaciones rocosas, aunque pueden presentarse también en suelos cohesivos secos y suelos residuales (Suárez, 2009).

### **2.1.3 Deslizamientos:**

Son movimientos ladera abajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, cuando la superficie es cóncava se clasifica como deslizamientos rotacionales, las superficies de ruptura semi planas u onduladas como traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos. Con base en las etapas del movimiento, los deslizamientos rotacionales se clasifican en simples, múltiples y sucesivos, clasificación que también se aplica a las variantes resultantes del tipo de material (Ejemplo: deslizamiento rotacional de roca, de debris, de suelo, por ende, deslizamiento de roca individual, múltiple, sucesivo, etc.) Los deslizamientos traslacionales se dividen en deslizamiento de roca en bloque (*block slide*), deslizamientos de derrubio de en bloque (*block slide*) y deslizamientos traslacionales de suelos (*slab slide*). Los deslizamientos planos se clasifican en términos a partir del material involucrado, los principales tipos son los deslizamientos de rocas (*rock slide*), deslizamientos de derrubios (*debris slide*) y las coladas de barro (*mudslides*,) (Alcántara, 2000).

### **2.1.4. Flujos:**

Son movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimiento dentro de la masa que se mueve sobre una superficie de falla. Los flujos recubren todos los tipos de materiales

disponibles y se clasifican con base en su contenido, por lo tanto, se dividen en flujos de rocas (*rock flows*), flujos o corrientes de derrubios (*debris flows*) y flujos de arena o suelo (*soil flows*) (Alcántara, 2000).

### **2.1.5. Movimientos complejos:**

Son aquellos que suceden producto de la evolución o transformación de un movimiento original al irse desplazando ladera abajo.

## **2.2. Zonificación**

La zonificación consiste en la división del terreno en áreas homogéneas y la clasificación de cada una de estas áreas, de acuerdo con un grado real o potencial de amenaza o de riesgo (Suárez, 2009).

Carrera (1983) y Hartlen & Viberg (1988) diferenciaron las técnicas de zonificación de la susceptibilidad en tres tipos (Suárez, 2009) y Hartlen & Viberg (1988)):

- Modelos de caja blanca ("*White box model*"), los cuales se basan en los modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos; a éstos se les conocen como modelos determinísticos.
- Modelos de caja negra ("*Black box model*"), los cuales se basan en los análisis estadísticos.
- Modelos de caja gris ("*Gray box model*"), basados parcialmente en los modelos físicos y parcialmente en los análisis estadísticos.

De acuerdo con Suárez (2009), los modelos de caja negra o estadísticos reproducen el funcionamiento del sistema razonablemente bien, pero no permiten saber por qué el sistema funciona así, no permiten descubrir el funcionamiento interno del sistema. Los

modelos físicos o de caja blanca son modelos en los que las transferencias de materia y energía entre sus componentes se rigen mediante ecuaciones físicas y que además cumplen las leyes de conservación de la materia y la energía, tanto para el conjunto del modelo como para cada uno de los submodelos). Los modelos de caja gris son aquellos en el que el sistema se descompone en una serie de elementos que se resuelven como modelos empíricos, pero cuya integración se basa en principios físicos o al menos en cierto conocimiento a priori de cómo funciona el sistema.

### **2.3. Susceptibilidad**

La susceptibilidad a los PRM se define como “la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, expresada en términos cualitativos y relativos” (González, Mercedes , Luis, & Carlos Oteo, 2002). Suárez (2009) indicó que “expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno”. Ayala-Carcedo (2001) definió la susceptibilidad como “propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización o alcance, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativo o cuantitativo, con las áreas movidas o alcanzadas, análisis que se materializa normalmente en forma de mapa de susceptibilidad y suele presuponer que el comportamiento futuro de la ladera seguirá las mismas pautas que hasta el presente”.

Por lo cual podemos decir que la susceptibilidad es el grado de probabilidad que suceda un evento con base en condiciones que se pueden medir en la zona, y establecer su grado de susceptibilidad.

## **2.4 Aspectos generales de los modelos de evaluación de la susceptibilidad**

Los principales tipos de metodologías para la evaluación de la susceptibilidad (Suárez, 2009):

**2.4.1 Inventario de deslizamientos.** Es un método directo basado en fotografías aéreas, fotointerpretación y la información de ocurrencias históricas de deslizamientos en la zona. El producto final da una distribución espacial de deslizamientos, lo cual puede ser representado en un mapa o bien como puntos en áreas afectadas (Suárez, 2009).

**2.4.2 Enfoque Heurístico.** Requiere la opinión de un experto para la clasificación de la amenaza, estos métodos combinan el mapeo de movimientos en masa y la geomorfología como los principales factores para la determinación de peligros. Existen dos tipos de análisis heurísticos: análisis geomorfológico y una combinación de mapas cualitativo (Suárez, 2009).

**2.4.3 Enfoque estadístico.** Calculan la densidad de deslizamientos registrados para cada unidad geomorfológica homogénea existente en la zona de interés. La densidad de los deslizamientos es el porcentaje del área total que estos ocupan.

Los modelos estadísticos están basados en la suposición, infiriendo que en un área donde han ocurrido deslizamientos, sigue teniendo un ambiente susceptible para que pudieran ocurrir nuevos deslizamientos. Se tienen dos enfoques estadísticos, bivariado y multivariado (Suárez, 2009).

**2.4.4 Enfoque determinístico.** A pesar de los problemas para la colección de información creíble y suficiente, el uso de modelos determinísticos puede usarse en amplias superficies, especialmente con la adición de las técnicas de SIG, lo cual permite hacer un gran número

de cálculos para la determinación de factores de seguridad. Los modelos determinísticos son únicamente aplicables cuando las condiciones geomorfológicas y geológicas suficientemente homogéneas por toda el área de estudio y las laderas son simples (Suárez, 2009). La ventaja de estos modelos de caja blanca es que están basados en modelos de estabilidad de laderas, permitiendo el cálculo cuantitativo de valores de estabilidad (factores de seguridad). El problema principal con estos modelos es su alta generalización. En la tabla 2 (Suárez, 2009) se muestra la comparativa de las metodologías mencionadas anteriormente.

Tabla 2.- Análisis de técnicas con relación a la escala de mapas

Tipo de análisis	Técnica	Características	Escala de uso recomendada		
			Regional (1: 100,000)	Media (1:25,000)	Grande (1:10,000)
Inventario de deslizamientos	Análisis de distribución de deslizamientos	Analiza la distribución y clasificación de deslizamientos	SI	SI	SI
	Análisis de actividad de deslizamientos	Analiza los cambios temporales en los patrones de deslizamientos	NO	SI	SI
	Análisis de densidad de deslizamientos	Calcula la densidad de deslizamientos en las unidades del terreno	SI	NO	NO
Enfoque Heurístico	Análisis geomorfológico	Opinión para la zonificación de un experto en campo	SI	SI	SI
	Mapa de combinaciones cualitativas	Uso de valores de expertos en la base de parámetros	SI	SI	NO
Enfoque Estadístico	Análisis estadístico bivariado	Calcula la importancia de un factor de contribución	NO	SI	NO
	Análisis estadístico multivariado	Calcula una fórmula de predicción de matriz de datos	NO	SI	NO
<b>Enfoque Determinístico</b>	Análisis de un factor de seguridad	Aplica modelos hidrogeológicos y de estabilidad de laderas	NO	NO	SI

Fuente: Suárez, (2009).

En la tabla 3 (Suárez, 2009), destaca el enfoque determinístico ya que analiza la estabilidad de las laderas con parámetros físicos relacionados a la resistencia al corte de los suelos.

Tabla 3.- Ventajas y desventajas relevantes de cada enfoque.

Enfoque	Ventajas	Desventajas
Determinístico	Analiza la estabilidad de la ladera	Baja idoneidad para zonificaciones rápidas
	Tienen una base física	∴ Mayor tiempo para zonificar
	Datos de laboratorio	No aplica adecuadamente en áreas extensas
Heurístico	Factor de seguridad	
	Permiten la regionalización	El conocimiento de factores ambientales es inadecuado y subjetivo Depende de la experiencia del experto
	Puede extrapolar zonas	El grado de subjetividad no permite comparar con otros autores.
Inventario de deslizamientos	Detalle de análisis	Alto grado de subjetividad
	Mapas resultantes, en caso de estar realizados por un experto	Depende de la experiencia del autor
Estadístico	Son objetivos	Dependen de la cantidad de datos
	Analizan deslizamientos actuales y pasados	Dependen de la calidad de datos El costo de adquisición de factores

Fuente: Suárez, 2009.

### 2.4.5 Factor de seguridad

El coeficiente o factor de seguridad (Fs) se define como el cociente entre la resistencia al corte disponible y la tensión de corte (Suárez, 2009):

Ecuación 1.- Factor de seguridad

$$F_s = \tau_f / \tau$$

El cálculo del  $F_s$  involucra parámetros físicos del suelo y el relieve de la ladera, como la cohesión, el ángulo de fricción, el peso volumétrico del suelo, el espesor del suelo, la pendiente, la presión de poro y el nivel de aguas freáticas.

## **2.5 Uso de software para zonificación de la susceptibilidad a PRM y $F_s$**

Como se especificó anteriormente, los modelos determinísticos tienen como característica principal la determinación de un factor de seguridad, siempre y cuando se tengan parámetros físicos del suelo obtenidos por medio de análisis geotécnicos.

Los parámetros del suelo que se requieren para el modelado del factor de seguridad son el espesor del suelo ( $h$ ), la cohesión ( $c$ ), el ángulo de fricción interno ( $\phi$ ) y la conductividad hidráulica ( $k$ ), dichos parámetros serán obtenidos en laboratorio mediante la prueba triaxial rápida (ONNCCE, 2002) y la consolidación unidimensional (AASHTO T 216), siguiendo los lineamientos que demarquen las normas para su elaboración, los espesores del suelo serán aquellos obtenidos de campo directamente (ONNCCE, 2013).

### **2.5.1 Modelo de estabilidad de talud infinito**

Se utiliza cuando existen condiciones tales que al presentarse una falla del terreno de forma paralela a la superficie del talud a una profundidad superficial y la longitud de la falla es larga comparada con el espesor (Suárez, 2009). En el municipio de Angangueo, los deslizamientos tuvieron apenas unos espesores de 1 m hasta 2.5 m (Alcántara-Ayala, López-García, & J. Garnica, 2012). La representación del modelo del talud infinito se observa en la figura 1 y está basado en la teoría de Mohr-Coulumb.

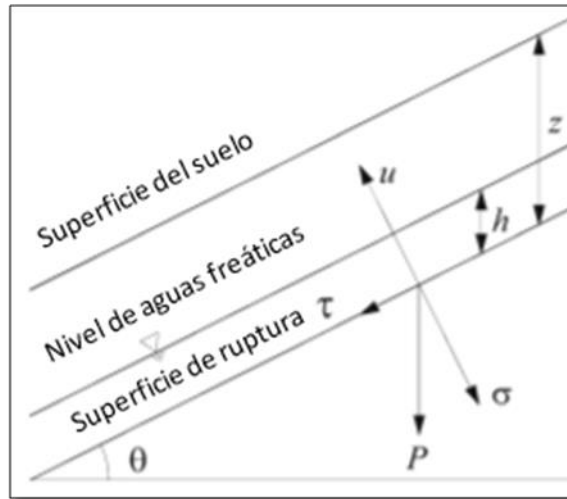


Figura 1.- Representación del modelo de estabilidad de talud infinito. P representa el peso del bloque del suelo.

Shelby (1993) propuso una modificación de la ecuación para ser aplicada al modelo del talud infinito:

Ecuación 2.- Modelo del talud infinito

$$\rho_s * g * z * \sin\theta * \cos\theta = C_r + C_s + (\rho_s * g * z * \cos^2\theta - \rho_w * g * h * \cos^2\theta) * \tan\Phi$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del suelo húmedo ( $\text{kg/m}^3$ ),  $z$  es la profundidad del suelo (m),  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la pendiente (en grados),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ),  $h$  son los niveles del agua (m),  $C_r$  es la cohesión aportada por las raíces ( $\text{N/m}^2$ ) y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Dividiendo la ecuación entre los componentes que aportan resistencia al suelo y aquellos que se desestabilizan, se puede obtener un factor de seguridad, el cual queda denotado de la siguiente manera.

Ecuación 3.- Factor de seguridad con el modelo de estabilidad de talud infinito

$$FS = \frac{C_r + C_s + (\rho_s * g * z * \cos^2\theta) * \tan\Phi}{\rho_s * g * z * \sin\theta * \cos\theta}$$

De esta manera se pueden tener tres posibles casos:

- 1.-  $FS=1$ , teniendo un estado balanceado, donde la falla podría ser inminente.
- 2.-  $FS<1$ , la falla ya tendría que haber sucedido.
- 3.-  $FS>1$ , donde la ladera estaría estable, sin riesgo a falla.

La disminución del FS ocurre cuando la columna de agua incrementa ya que, de ser así, el esfuerzo efectivo del suelo disminuye.

### 2.5.2 Modelo hidrológico estático

La estabilidad o inestabilidad de una ladera está relacionada directamente con los factores hidrológicos, por lo que es esencial utilizar un modelo hidrológico para poder estimar la humedad de un suelo. Montgomery & Dietrich (1994) definieron que al asumir un estado de recarga uniforme que simule la variación espacial del nivel de aguas freáticas durante un evento de lluvia. Esto se puede observar en la figura 2, donde  $a$  ( $m^2$ ),  $b$  (m) y  $q$  ( $m d^{-1}$ ) representa el área de drenaje en la parte superior de la pendiente, la longitud de contorno y la tasa de recarga, respectivamente.

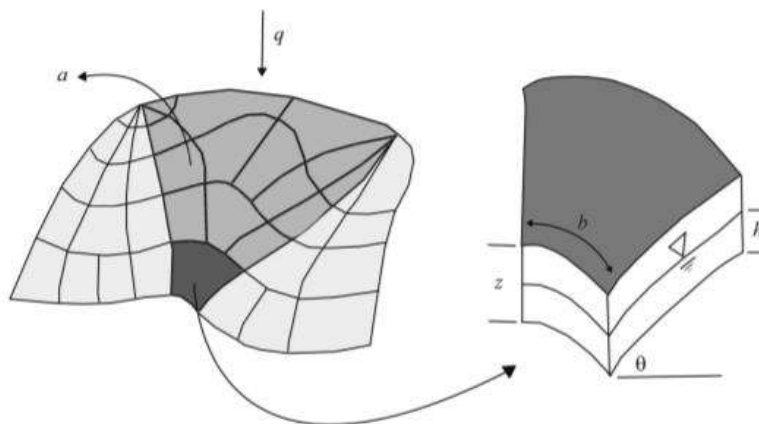


Figura 2.- Representación del modelo hidrológico (Hutchinson, 1988)

O'Loughlin (1986) definió a la humedad como la porción del suelo saturado sometida a un estado de recarga uniforme y propone que está dada por la relación entre la entrada de agua en forma de recarga uniforme y la salida del agua que existe a lo largo de la capa del suelo saturado. En la ecuación 4 se muestra la fórmula general para un modelo hidrológico estático.

Ecuación 4.- Modelo hidrológico estático

$$W = \frac{q * a}{b * T * \sin \theta} = \frac{h}{z}$$

Despejando  $T$

Ecuación 5.- Transmisibilidad del suelo

$$T = K_s * z * \cos \theta$$

Donde,  $W$  es la humedad ( $m m^{-1}$ ),  $T$  es la transmisibilidad del suelo ( $m^{-2}d^{-1}$ ) y  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada ( $m d^{-1}$ ), considerada homogénea a lo largo de la profundidad del suelo.

### **2.5.3 Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB)**

SHALSTAB es una herramienta SIG basada en un modelo determinístico que combina el talud infinito y modelos hidrológicos estáticos (Montgomery & Dietrich, 1994). Está integrado a Arcmap a través de un arctoolbox de nombre *Automatic Shalstab Analysis ASA* creada por Regiane Mara Sbroglia, Pedro Henrique Machado Porath, Rafael Augusto dos Reis Higashi y Francisco Henrique de Oliveira (2007), los cuales adaptaron el modelo de

Mogomery & Dietrich (1994) utilizando las ecuaciones del modelo hidrológico estático y el modelo de estabilidad de talud infinito.

Para conocer el momento en el que podría suceder un deslizamiento, Regiane Mara Sbroglia, Pedro Henrique Machado Porath, Rafael Augusto dos Reis Higashi resolvieron la ecuación 4 en términos de  $h/z$ , lo cual representa la capa saturada del suelo, quedando de la siguiente manera (Ecuación 6).

Ecuación 6.- Capa saturada del suelo

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} * \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\Phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta * \tan\Phi * \rho_w * g * z}$$

Al establecer la ecuación 6 a la ladera, se generan dos condiciones: incondicionalmente inestable e incondicionalmente estable, definidas de la misma manera que Montgomery & Dietrich (1994). La primera sucede cuando  $h/z$  tiene un valor de 0 (no hay presencia de agua), y la relación entre los parámetros del suelo no pueden compensar el efecto de desestabilización provocado por la pendiente pronunciada (ecuación 7). La segunda condición ocurre cuando  $h/z$  tiende a 1, generando un estado totalmente saturado, y la relación entre los parámetros del suelo supera el efecto de la pendiente (ecuación 8).

Ecuación 7.- Desestabilización debido a la pendiente

$$\tan\theta \geq \tan\phi + \frac{c}{\cos^2\theta * \rho_s * g * z}$$

Ecuación 8.- Desestabilización producto del suelo saturado afectado por la pendiente

$$\tan\theta \leq \tan\Phi * \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta * \rho_s * g * z}$$

Es necesario igualar las ecuaciones 4 y 6 correspondientes. Teniendo de esta manera:

Ecuación 9.- Igualación de ecuaciones

$$\frac{q * a}{T * b * \sin\theta} = \frac{\rho_s}{\rho_w} * \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta * \tan\phi * \rho_w * g * z}$$

Con base a las ecuaciones anteriores, SHALSTAB utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 10.- Ecuación de criterios de susceptibilidad SHALSTAB

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} * \sin\theta * \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} * \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta * \tan\phi * \rho_w * g * z} \right\}$$

Dietrich & Montgomery (1994), establecieron siete clases de estabilidad, las cuales están basadas en la relación que existe entre la función hidrológica en la ecuación 10, destacando la antes mencionadas en las ecuaciones 7 y 8, las cinco restantes quedan demarcadas en la tabla 4.

Tabla 4.- Clases de estabilidad

CLASES
INCONDICIONALMENTE INESTABLE
$\log q/T < -3.1$
$-3.1 < \log q/T < -2.8$
$-2.8 < \log q/T < -2.5$
$-2.5 < \log q/T < -2.2$
$\log q/T > -2.2$
INCONDICIONALMENTE ESTABLE

Considerando las ecuaciones anteriores, los parámetros requeridos para la herramienta ASA, son la cohesión del suelo (c (N/m<sup>2</sup>)), cohesión de las raíces (cr (N/m<sup>2</sup>)), peso específico del suelo (rs (kg/m<sup>3</sup>)), ángulo de fricción del suelo (f (grados)), peso de la vegetación (w ((N/m<sup>2</sup>)) y la profundidad de análisis ( z (m)).

## **2.6 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) divide a los suelos en dos grupos, un grupo de partículas finas y otro de partículas gruesas. La parte fina es aquella que pasa la malla No. 200 (0.074 mm) y, la fracción gruesa corresponde a partículas mayores que la malla No. 200 y menores que la malla de 3" (7.62 cm).

La fracción fina se subdivide en subgrupos basados en la plasticidad, las cuales están directamente relacionadas con las propiedades hidráulicas y mecánicas del material. Estas características son importantes ya que ayudan a obtener parámetros del suelo como lo son las propiedades de deformación, resistencia y permeabilidad ente otros.

La parte gruesa cuenta con dos subgrupos, que son las gravas y arenas y éstas están divididas por su tamaño límite forzado por la malla No. 4 (4.76 mm). Las gravas y arenas pueden variar su clasificación dependiendo de la cantidad y tipo de finos que éstas tengan (Badillo, 2005).

### **2.6.1 Consolidación de los suelos**

La consolidación es un fenómeno que sucede por la aplicación de una carga en suelos saturados, disminuyendo su relación de vacíos a lo largo del tiempo (Badillo, 2005).

El estudio de la consolidación del suelo es importante debido a que con ésta se podrá obtener la permeabilidad de los suelos a estudiar, el proceso de la prueba que se llevará a cabo se describirá posteriormente.

### **2.6.2 Propiedades índices del suelo**

Para deducir adecuadamente las características de un suelo, debe realizarse un análisis en laboratorio para así conocer las propiedades índices de los suelos las cuales sirven para conocer cualitativamente el comportamiento mecánico de los suelos (Badillo, 2005).

Las propiedades índices según Badillo (2005) son:

#### **I. Contenido natural de Agua ( $\omega$ ):**

El contenido de agua es la relación entre las masas del agua ( $M_w$ ), que contiene el suelo y la del suelo seco ( $M_s$ ):

Ecuación 11.- Cálculo del contenido de humedad

$$\omega\% = (M_w/M_s) * 100$$

#### **II. Peso Volumétrico natural ( $Y$ ):**

Es la relación entre el peso del suelo ( $W_t$ ), y el volumen que el mismo ocupa, ( $V_t$ ):

Ecuación 12.- Cálculo del peso volumétrico natural

$$Y = W_t/V_t$$

#### **III. Grado de Saturación ( $G_w$ ):**

En esta propiedad se relacionan los volúmenes del agua que llenan total o parcialmente los vacíos del suelo, con este volumen. También se expresa en porcentaje:

Ecuación 13.- Cálculo del grado de saturación del suelo

$$G_w \% = S \% = (V_w/V_v)*100$$

#### **IV. Densidad de los sólidos, ( $S_s$ ):**

Se relaciona el peso volumétrico de los sólidos con el peso volumétrico del agua a 4°C de temperatura y a una atmósfera de presión:

Ecuación 14.- Cálculo de la densidad de sólidos

$$G_s = \gamma_s / \gamma_0 \text{ donde } \gamma_s = W_s / V_s \text{ y } \gamma_0 = W_w / V_w$$

#### V. **Granulometría:**

Es la separación por tamaño de las partículas del suelo a través de tamices.

#### VI. **Plasticidad o Límites de Atterberg (LL, LP, Ip, CL)**

Se definen cinco estados de consistencia que pueden presentar los suelos finos dependiendo su contenido de agua. En la figura 3 se explica la variación de la consistencia con el contenido de agua. Dependiendo del contenido de agua se puede dividir en cuatro estados la consistencia de los suelos, los cuales son estado sólido, semi sólido, plástico y semi líquido-líquido. Las características de éstos estos estados se describen a continuación.

Estado Sólido. Es aquel en el cual el suelo se comporta como un sólido. Estado Semi-sólido. En este estado el suelo se comporta como un sólido, pero al perder humedad disminuye su volumen de manera apreciable.

Estado Plástico. Para esta condición el suelo se comporta plásticamente, es decir, al ser cargado se deforma inmediatamente y, al ser descargado queda deformado. No hay rebote elástico.

Estado Semi-Líquido y Líquido. Los contenidos de agua son tales que el suelo exhibe la consistencia de una crema y de un licuado, respectivamente.

El Índice Plástico, define el rango el cual el suelo presenta un comportamiento plástico. Es importante notar que los límites son contenidos de agua, al igual que su índice plástico.

Contracción lineal, CL. Consiste en determinar la contracción que sufre el suelo saturado al secarse, en un molde rectangular de 1cm<sup>2</sup> de sección transversal por 10 cm de longitud. La expresión que define la contracción lineal:

$$CL \% = (\text{Longitud final del suelo seco} / \text{Longitud inicial del suelo saturado}) * 100$$

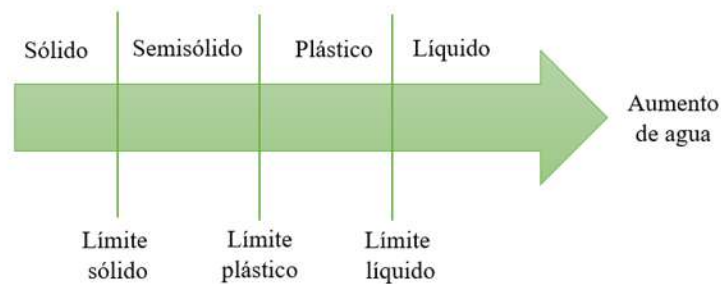


Figura 3.- Frontera de estados del suelo en base a su contenido de agua.

### VII. Relación de vacíos u oquedad (e):

Está definida como el cociente entre el volumen de vacíos (V<sub>v</sub>) y el volumen de sólidos (V<sub>s</sub>):

Ecuación 15.- Cálculo de la relación de vacíos de los suelos

$$E = V_v / V_s$$

### VIII. Porosidad (n):

La porosidad es la relación entre el volumen de vacíos (V<sub>v</sub>) y el volumen total (V<sub>t</sub>), esta se expresa en porcentaje:

Ecuación 16.- Cálculo de la porosidad de los suelos

$$n \% = (V_v/V_t) * 100$$

### 2.6.3 Propiedades mecánicas de los suelos

Estas propiedades están relacionadas con la reacción que tienen los suelos ante una carga. La resistencia al corte es la característica en la que fue enfocada la investigación, entendiendo la resistencia al corte de una masa de suelo como la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir a la falla o bien, al deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él (Badillo, 2005). La resistencia al corte se obtiene a través de la prueba triaxial no consolidada no drenada (UU). Una vez probado el material se obtiene el esfuerzo máximo que pudo soportar el suelo al corte, con el cual se trazan los círculos de Mohr para obtener la envolvente de falla del suelo y así, obtener de manera gráfica el ángulo de fricción y la cohesión.

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando la teoría de la resistencia de materiales (Suárez, 2009). Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo con las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulumb (Suárez, 2009):

Ecuación 17.- Cálculo del esfuerzo cortante para suelos saturados

$$T = c' + (\sigma - \mu) \tan \Phi'$$

Ecuación 18.- Cálculo del esfuerzo cortante para suelos parcialmente saturados

$$T = c' + (\sigma - \mu) \tan \Phi' + (\mu - \mu_a) \tan \Phi'' \text{ (Para suelos parcialmente saturados)}$$

Donde:

T = Esfuerzo de resistencia al corte

$C'$  = Cohesión o cementación efectiva

$\sigma$  = Esfuerzo normal total

$\mu$  = Presión del agua intersticial o de poros

$\mu_a$  = Presión del aire intersticial

$\Phi'$  = Ángulo de fricción interna del material

$\Phi''$  = Ángulo de fricción del material no saturado.

### **2.6.3.1. Ángulo de fricción**

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento

(Suárez, 2009):

Ecuación 19.- Coeficiente de rozamiento

$$\tan \Phi$$

El ángulo de fricción depende de varios factores, entre ellos algunos de los más importantes

son:

- a) Tamaño de los granos
- b) Forma de los granos
- c) Distribución de los tamaños de los granos
- d) Densidad

### **2.6.3.2 Cohesión**

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al corte producida por la cementación (Suárez, 2009).

En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión es igual a 0, a estos suelos se les denomina suelos no cohesivos.

### **2.6.3.3 Círculo de Mohr**

En un análisis en dos dimensiones, los esfuerzos en un punto pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , y  $\tau_{xy}$ . Si estos esfuerzos se dibujan en unas coordenadas  $\tau - \sigma$ , se puede trazar el círculo de Esfuerzos de Mohr. En este círculo se definen los valores de  $\sigma$  máximo ( $\sigma_1$ ) y  $\sigma$  mínimo ( $\sigma_3$ ), conocidos como esfuerzos principales (Suárez, 2009).

### **2.6.3.4 Envolvente de falla del Círculo de Mohr**

El círculo de Mohr se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, en la cual se muestra de manera gráfica, una serie de círculos, los cuales son trazados por el esfuerzo desviador, que es aquel punto máximo de resistencia que soporta el suelo antes de fallar por cortante, en la figura 4 se muestra las partes de la envolvente de falla (Suárez, 2009).

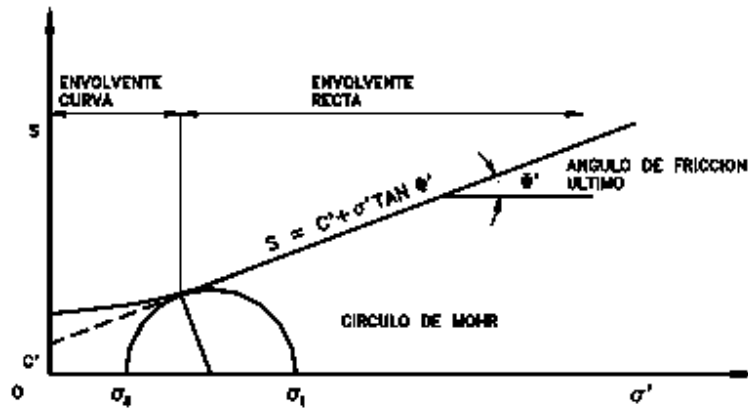


Figura 4.- Envolvente de falla y círculo de Mohr. Fuente: Suárez, (1998).

Dónde:  $c'$  = Intercepto del eje de resistencia (Cohesión) y

$\Phi$  = Pendiente de la envolvente (ángulo de fricción)

## 2.7 Criterios de falla de Mohr-Coulomb

Das (1999) presentó una teoría sobre la ruptura de materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante. El llamado criterio de falla de Mohr-Coulomb es la relación funcional entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla que se expresa en la siguiente forma:

Ecuación 20.- Criterio de falla Mohr-Coulomb

$$T_f = c + \sigma \tan \Phi$$

Dónde:  $c$  = cohesión

$\Phi$  = ángulo de fricción interna

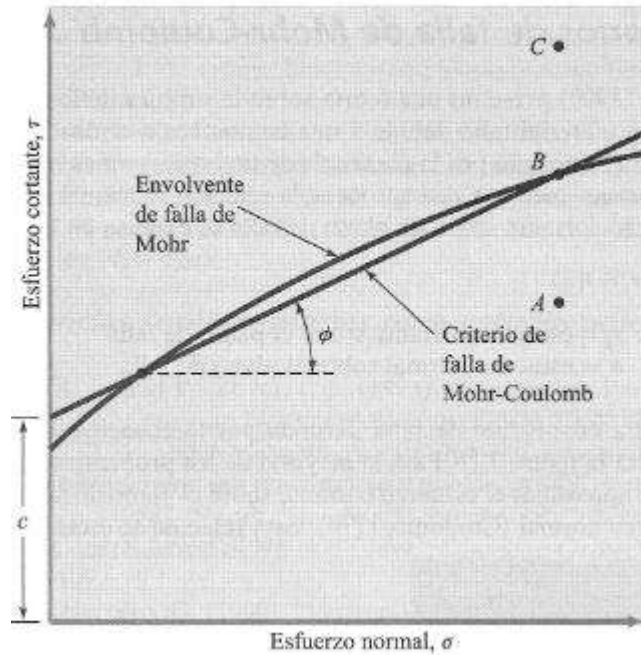


Figura 5.- Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb. Fuente: Das, (2001)

El significado de la envolvente de falla (Figura 5) se explica como sigue: si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A, entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto B (que se encuentra sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla cortante a lo largo de este plano. Un estado de esfuerzo sobre un plano representado por el punto C no existe porque éste queda por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habrá ocurrido en el suelo.

Como se mencionó anteriormente, la obtención de la cohesión y ángulo de fricción son los principales parámetros que se quieren obtener del suelo, y éste dependerá del tipo de

material y de su contenido de agua. El contenido de agua incrementará o disminuirá el valor de dichos parámetros.

### **Capítulo 3. Antecedentes**

El municipio de Mineral de Angangueo y los eventos ocurridos en febrero del 2010 han sido estudiados en diversas ocasiones y mediante distintos enfoques, todos con la finalidad de definir los factores que desencadenaron el fenómeno, e identificar el peligro de la población que aun reside ahí.

De la Luz (2011) dividió la micro cuenca el Ventilador en cinco categorías de susceptibilidad: muy alta, alta, media baja y muy baja (Tabla 5). Para definir dichas categorías utilizó factores condicionantes que fueron plasmados en mapas temáticos tales como: inventario de remociones en masa, geología, uso de suelo, densidad de drenaje, pendiente, orientación de laderas, edafología, y cercanía a escurrimientos. Utilizando el software KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion) identificó que gran parte de la población se encuentra dentro de las clases de vulnerabilidad muy alta, alta y mediana. El método utilizado por De la Luz para evaluar el mapa final se basó en sobreponer el mapa inventario e identificar cuales puntos resultaron en áreas con algún grado de susceptibilidad.

Tabla 5.- Escala sugerida de amenaza en laderas para deslizamientos (De la Luz, y adaptada para la microcuenca "El Ventilador", Angangueo, Michoacán).

<b>Muy alta</b>	Laderas con agrietamientos, escarpas o salientes. Suelos muy alterados, sueltos y / o saturados. Presencia de discontinuidades desfavorables. Antecedentes de deslizamientos en el área o sitio. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
<b>Alta</b>	Laderas que exhiben zonas de falla. Meteorización de moderada a alta. Pose discontinuidades desfavorables, donde han ocurrido deslizamientos. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
<b>Media</b>	Laderas con algunas zonas de fallas. Formaciones rocosas con alteración y agrietamientos moderados. Con antecedentes menores de deslizamientos. Laderas menos alteradas. Pendientes muy inclinadas y fuertemente inclinada.
<b>Baja</b>	Laderas en formaciones rocosas con alteración de baja a moderada. Planos de discontinuidades pocos favorables al deslizamiento. Con antecedentes escasos o nulos de deslizamientos. Laderas poco perturbadas. Capa de suelos compactos de poco espesor. Pendientes Ligeramente inclinadas o planas.
<b>Muy baja</b>	Laderas en formaciones rocosas no alteradas, poco agrietadas o fisuradas. Sin planos de discontinuidad que favorezcan el deslizamiento. Sin antecedentes de deslizamientos. Ladera sin perturbación. Pendientes ligeramente inclinadas o planas.

Fuente: De la Luz, (2011).

Alcántara-Ayala, López-García, & J. Garnica (2012) hicieron una descripción de los eventos ocurridos en Angangueo ocurridos en febrero del 2010, donde a través de la estación pluvial Laguna del Fresno se registraron 204 mm de lluvia del 1 al 5 de febrero. Debido a esto, encontraron que el incremento en la presión de los poros del suelo disminuyeron la resistencia al corte de los suelos. La resistencia de los suelos se determinó a través de un penetrómetro de cono dinámico. Además, realizaron la ubicación y clasificación de 4 PRM que afectaron al centro urbano de Angangueo clasificandolos como flujo de detritos. Nuñez-Solorio (2012) analizó los flujos de detritos con base a fenómenos geológicos e hidrológicos, para así poder llevar a cabo la identificación y conteo de los deslizamientos presentados en la zona y poder establecer el nivel de peligrosidad de los

deslizamientos. Realizó mapas temáticos como el modelo digital de elevación, uso de suelo, geología, escurrimiento, pendientes, carreteras, calles, caminos y precipitación media anual, a escala 1: 50000. Bermúdez (2012) realizó la caracterización de los deslizamientos utilizando un método geomorfológico a través de un levantamiento topográfico, cartografía de los PRM y trabajo de campo.

Garduño (2014) analizó 157 árboles de especies de *Pinus pseudostrobus*, *Pinus michoacana* y *Abies religiosa* a través de la dendropirocronología y dataciones por  $^{14}\text{C}$ , y generó una cronología de los incendios. Utilizando el equipo Velmex observó la distribución del crecimiento de los anillos de los árboles, puntualmente en la forma del anillo, y determinó si en el pasado existió un deslizamiento, ya que los deslizamientos tienden a deformar la manera en la que se desarrolla el crecimiento del árbol.

Figuroa (2013) a través de modelaciones mediante el programa numérico FLO-2D reveló tres zonas de conflicto para el flujo netamente líquido como para el flujo de detritos, ubicando la primera zona en la entrada de la ciudad, la segunda zona en el puente que intercepta a la calle Libertad y que conduce al Monumento del Minero y, la tercera zona en la intersección de la calle Melchor Ocampo con el canal del río San Pedro. En la simulación realizada en dichas zonas se identificó con base a los modelos realizados un incremento en los tirantes de agua, velocidades, fuerza de impacto y presiones estáticas. Con base a los resultados elaboró un mapa preliminar de peligro por inundaciones y flujo de detritos indicando que las zonas a los márgenes del río San Pedro son las de mayor peligro.

Cortes (2013) clasificó el área de estudio con base en las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos (Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos,

1995). Además, clasificó los suelos con base en el Sistema de Clasificación WRB (Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo, 2007). Los suelos identificados fueron: Andosoles (Andosoles silándico úmbricos y Andosoles vítrico úmbricos), Leptosoles Vítricos. Además de su clasificación, determinó la estabilidad de los agregados con base en el diámetro medio ponderado (Yoder, 1936), clasificándolos en:

- I. Muy estables (mayores a 2 mm)
- II. Estables (1.3 a 2.0 mm)
- III. Moderadamente estables (0.8 a 1.3 mm)

Torres (2014) identificó que las zonas donde ocurrieron los deslizamientos en el año 2010 se encontraban con un uso de suelo forestal de pino-encino, además de mencionar que las zonas con ignimbrita eran las zonas con mayor estabilidad, y las zonas con andesita, tienen menor estabilidad. Además, con base en análisis probabilísticos para factores condicionantes en su modelo, observó que las pendientes entre 20° y 45° son las que presentan mayores desprendimientos de materiales, además, que la mayoría de los deslizamientos superficiales fueron detonados por la erosión y factores antropogénicos.

Alanis (2016) analizó la repelencia de agua en el suelo con las pruebas de tiempo de penetración de la gota de agua y la prueba de etanol respectivamente. Sus resultados indicaron que la repelencia del agua no tiene relación con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de éste, sin embargo observó una relación con los diferentes tipos de cobertura vegetal. Además, encontró que la intensidad de la repelencia del agua es inversamente proporcional con la distancia a los troncos de los árboles, lo cual contribuye a crear un patrón irregular de distribución de la repelencia del agua del suelo.

## Capítulo 4. Área de estudio

### 4.1 Localización

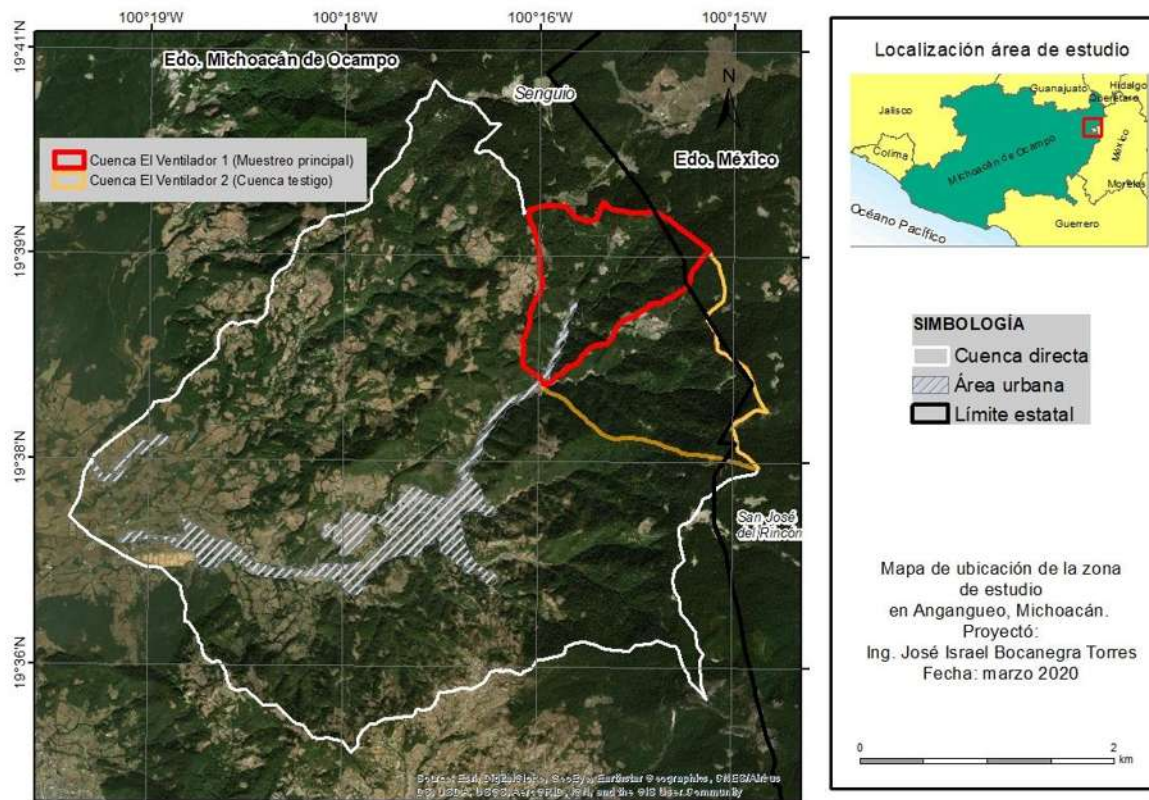


Figura 6.- Mapa de localización de la cuenca en estudio, coordenadas WGS\_1984.

El área de estudio se compone de dos microcuencas que pertenecen a la cuenca del río Angangueo, la cuenca el Ventilador 1 (Muestreo Principal) y la segunda como la Cuenca El Ventilador 2 (Cuenca testigo) donde se obtuvieron muestras para corroborar que los suelos existentes eran similares a la cuenca principal. Ambas cuencas se localizan en el oeste del Estado de Michoacán, México, entre los paralelos  $19^{\circ}35'$  y  $19^{\circ}41'$  de latitud norte y entre los meridianos  $100^{\circ}14'$  y  $100^{\circ}22'$  de longitud Oeste, y presentan altitudes de entre 2,300 y 3,600 m.s.n.m. La zona de estudio tiene un área de 14 km<sup>2</sup>. Limita al norte con el municipio

de Senguio, al este con el Estado de México, al sur con Ocampo y al oeste con Aporo. Su distancia a la capital Morelia es de 170 km (INEGI, 2009).

La ubicación de la zona de estudio es N-E del centro de la población (Figura 6). La zona de estudio son dos microcuencas conocidas como “El ventilador” con áreas similares de 4 km<sup>2</sup> y pendientes que van de los 15° a 50°. Su uso de suelo es forestal principalmente.

Se tienen registros de 8 PRM en la cuenca, por lo que fue posible obtener suelos próximos a los eventos.

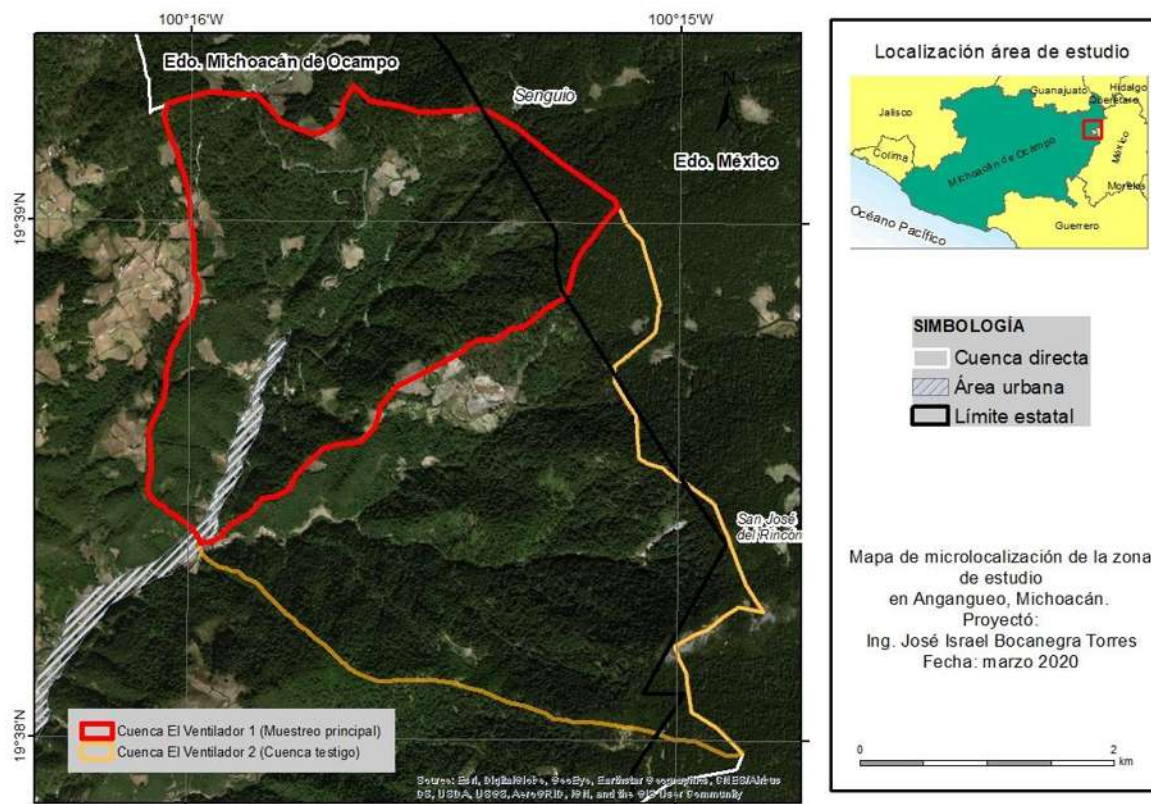


Figura 7.- Microlocalización área de estudio, coordenadas WGS\_1984.

## 4.2 Hidrografía

La hidrografía (Figura 8) está constituida por los ríos el Puerco y Carrillos junto con los arroyos del Llano de las Papas y el de Cantera, pertenecientes a la cuenca del río Balsas (INAFED, 2010).

Con base en Strhaler (1955) el orden de corriente llegó hasta cinco (Figura 8).

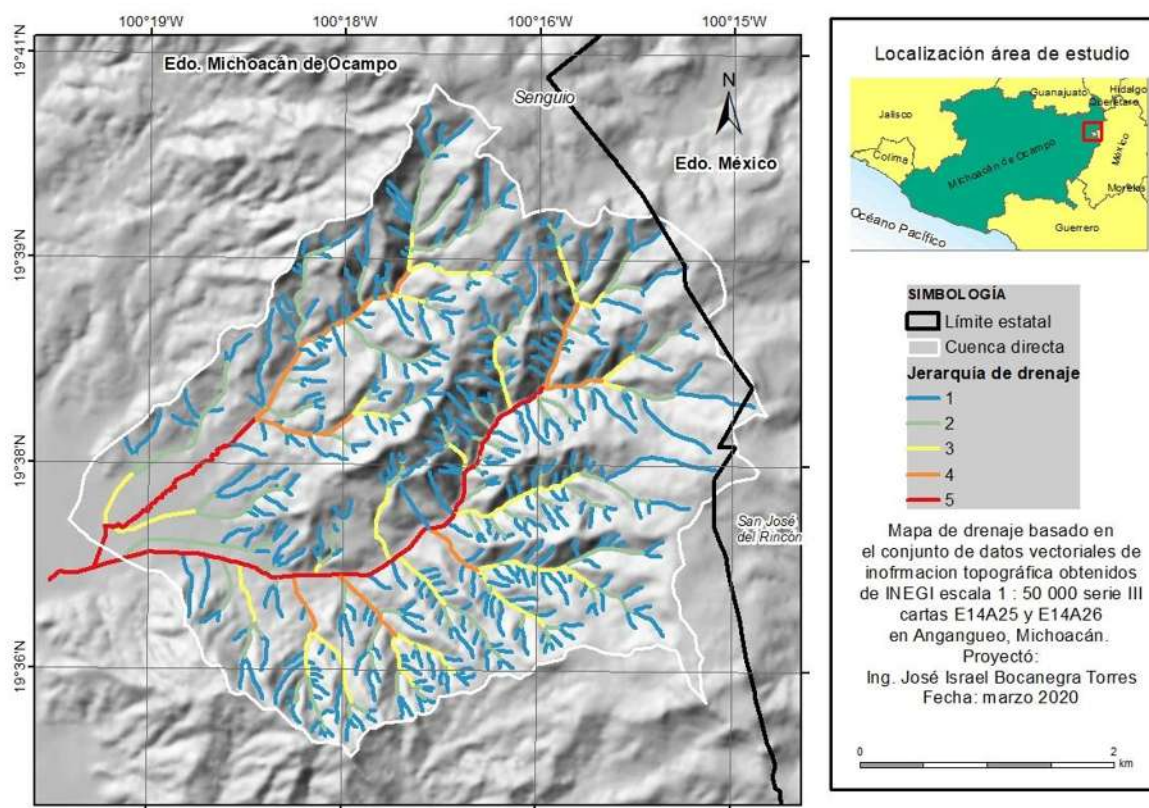


Figura 8.- Red de drenaje de la cuenca en estudio

## 4.3 Clima

El clima es templado de dos tipos, con lluvias en verano y con lluvias todo el año. Tiene una precipitación pluvial anual que oscila entre los 800 y los 1,200 mm y temperaturas que van desde los 8 a los 16°C (INEGI, 2009). En la figura 9 se pueden observar los climas existentes dentro de la cuenca en estudio, demarcando en color morado un clima tipo C(E)(w2)(w) correspondiente a un clima semifrío y en color verde un clima C(w2)(w) correspondiente a un clima templado subhúmedo, según la clasificación de Köppen (1931) modificada por Enriqueta García.

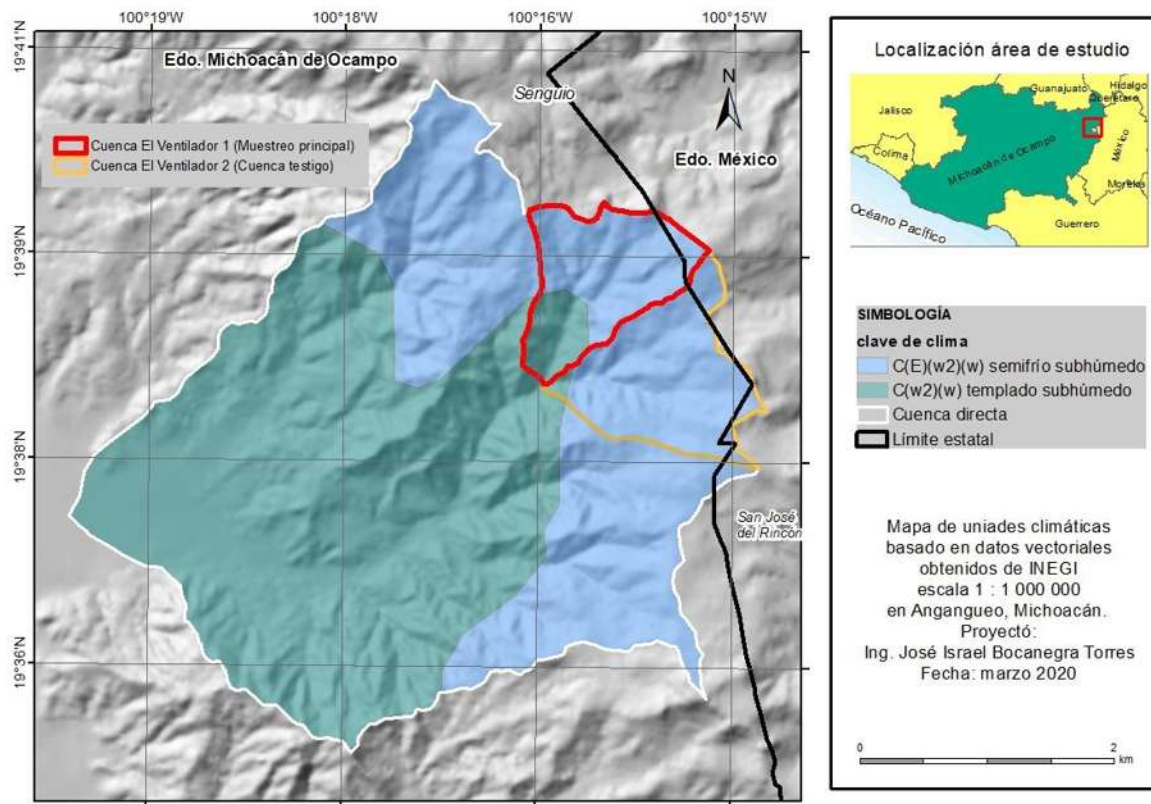


Figura 9.- Tipos de clima zona de estudio, basado en el mapa de unidades climáticas nacional de INEGI, 2018, coordenadas WGS\_1984.

#### 4.4 Principales tipos de vegetación y uso de suelo

Angangueo cuenta con bosques de coníferas: pino, oyamel y junípero, bosque mixto, encino, pino, cedro y aile. Su uso principal es forestal y en menor proporción, ganadero y agrícola (Figura 10).

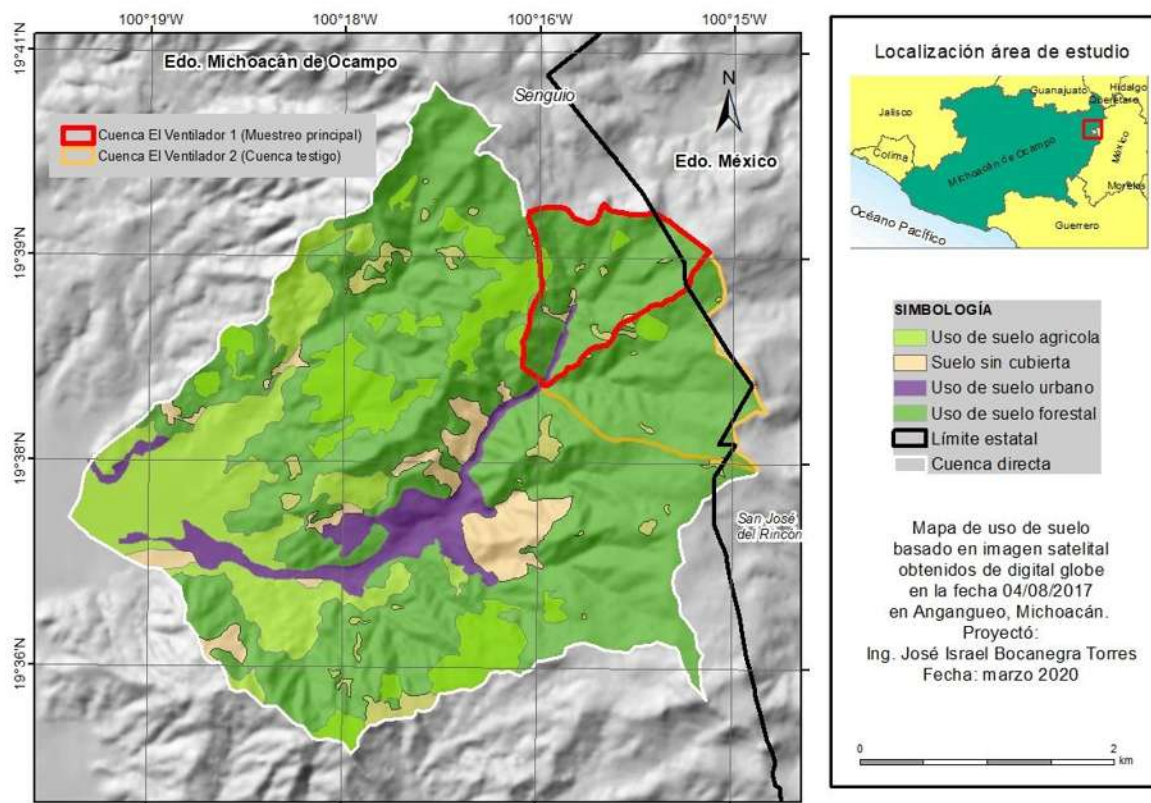


Figura 10.- Mapa de uso de suelo, elaboración propia con base en la interpretación en pantalla de una imagen Digital Globe del 04/08/2017, coordenadas WGS\_1984.

#### 4.5 Principales actividades económicas

Los cultivos que se cosechan son: cebada, haba, frijol y trigo. Se producen principalmente durazno, manzana, maguey de pulque, pera, chile perón y capulín. Se cría ganado avícola, bovino, porcino, ovino, caprino, caballar, asnal y mular. Funciona como una industria extractiva de minerales de cobre, plomo, fierro, plata, oro y zinc. Se producen alimentos y productos metálicos excepto maquinaria y equipo (INEGI, 2009).

#### **4.6 Geología**

La geología en el municipio de Angangueo está definida por el eje Neovolcánico Transmexicano el cual tiene como característica morfológica un relieve volcánico compuesto de rocas ígneas extrusivas de diferentes tipos (Figura 11). Las rocas dominantes son las andesitas, las cuales cubren casi 46 km<sup>2</sup>, brecha volcánica intermedia que abarca 16.5 km<sup>2</sup> del área municipal y basalto en un poco más de 5 km<sup>2</sup>.

La roca andesita es el resultado directo de la actividad volcánica del Mioceno, la cual está representada por las Sierras de Chincua, Rancho Grande y Campanario, las cuales forman una estructura alargada, con orientación **nor-noreste – sur-sureste**, que en su conjunto es conocida como Sierra Angangueo (Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, 2012).

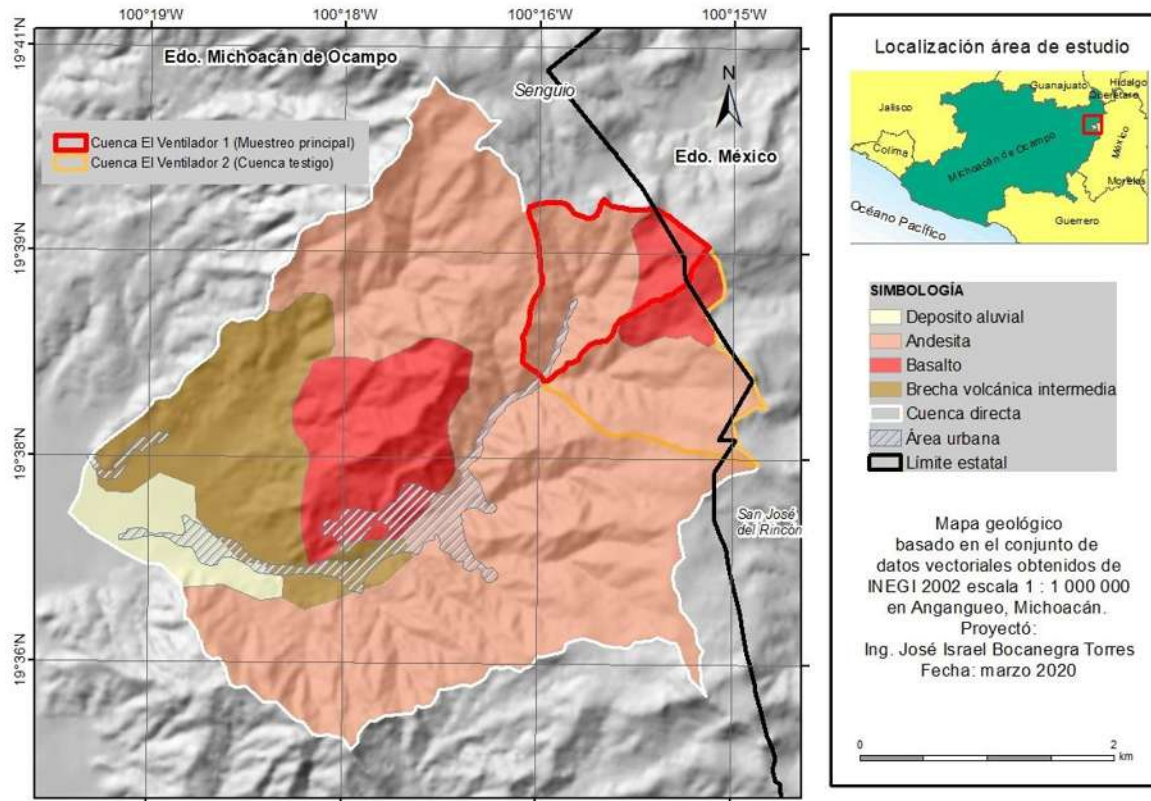


Figura 11.- Mapa geológico, coordenadas WGS\_1984.

#### 4.7 Edafología

Predominan los Andosoles, debido al origen volcánico de las rocas que conforman el basamento y en la superficie municipal, principalmente a las cenizas volcánicas (Figura 12), en menor proporción se encuentran los Luvisoles (INEGI, 2009).

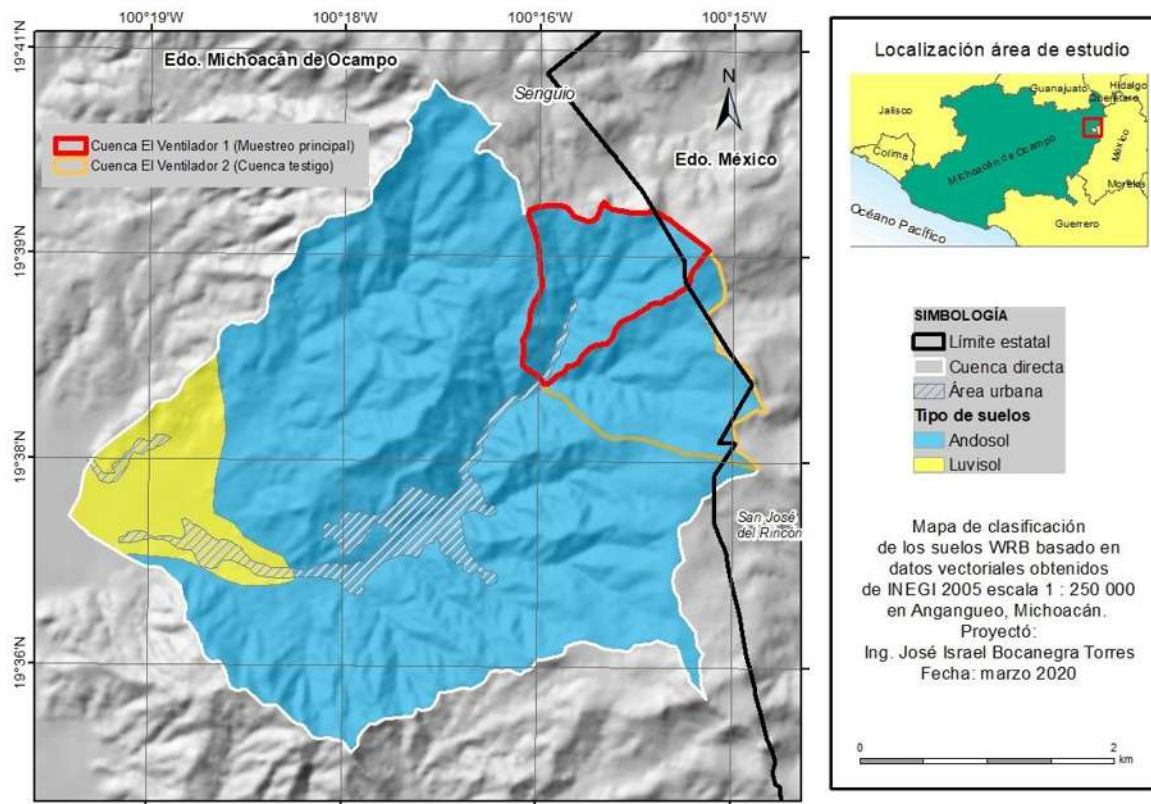


Figura 12.- Mapa de suelos, coordenadas WGS\_1984.

## **Capítulo 5. Procesos de remoción en masa en Angangueo, Michoacán**

### **5.1 Desastres por PRM**

Durante los días tres y cuatro de febrero del año 2010 los PRM provocaron la pérdida de 35 personas y más de 20,000 damnificados, lo que ocasionó cuantiosas pérdidas materiales y económicas (Gobierno Constitucional del Estado de Michoacan de Ocampo, 2012).

Los reportes oficiales del gobierno del estado de Michoacán (Gobierno Constitucional del Estado de Michoacan de Ocampo, 2012), indicaron que fueron cinco los municipios afectados: Angangueo, Ocampo, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuxpan y Tuzantla, cuantificando en la región 35 muertos, 50 desaparecidos, 52 hospitalizados, 20,000 damnificados, 4,000 viviendas dañadas y 280 colapsadas; daños a más de 700 kilómetros de vías rurales, 6 puentes colapsados; la pérdida de los cultivos de la región (40 mil ha.) perjudicando a más de 3000 agricultores.

La cantidad de lluvia del uno hasta el cinco de febrero registrada por el pluviógrafo de “Chincua” fue de 358 mm. Este valor representa casi la mitad de la precipitación media anual de Angangueo, la cual oscila entre los 800 y 1200 mm (Miranda, 2013).

El 22 de julio del año 2012, en el municipio de Angangueo se tuvieron nuevamente PRM, en el cual, la principal zona afectada fue el barrio de San Pedro, que también tuvo afectaciones en el año 2010.

### **5.2 Mapa inventario de PRM**

Después de los eventos ocurridos en los años 2010 y 2012, Hernández Madrigal registró en un mapa inventario un total de 49 PRM. Con base en esta información se ampliaron los registros del mapa inventario mediante el uso de Google Earth para los años 2006, 2007, 2009, 2010 y 2011, además de la fotointerpretación con estereoscopio de espejos de seis fotografías áreas escala 1:4000 a color del año 2005. De esta manera se encontraron 56 eventos más, contabilizando un total de 105 PRM (Figura 13). Los PRM corresponden a características de un flujo de detritos, cabe señalar que en el año 2011 se registraron 40 PRM.

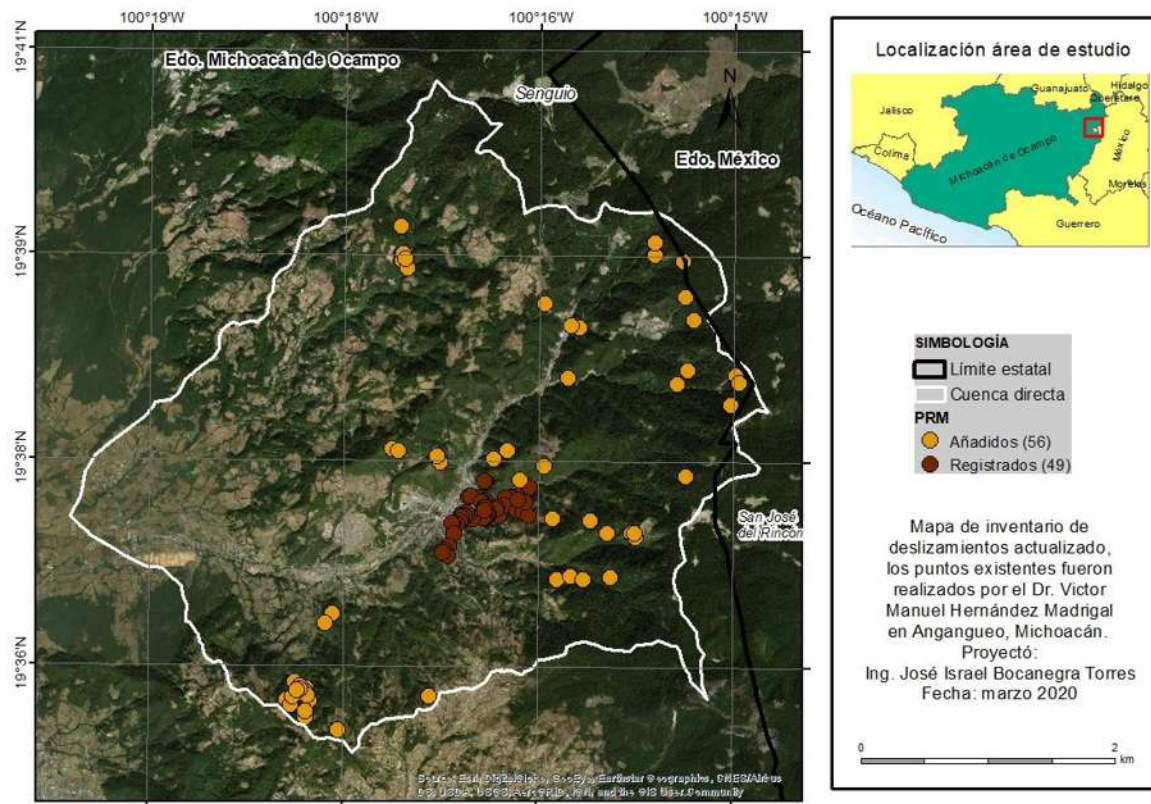


Figura 13.- Mapa inventario de deslizamientos, coordenadas WGS\_1984.

## **Capítulo 6.- Metodología**

Para proyectar el mapa de susceptibilidad se utilizó una herramienta SIG llamada Shallow Landsliding Stability Model (SHALSTAB), la cual requiere de parámetros físicos del suelo y características del relieve de la zona a analizar. Para poder obtener estas características se realizó la fotointerpretación de seis fotografías, se ubicaron puntos de muestreo, se realizó el muestreo, se analizaron los suelos obtenidos en campo y se elaboró un mapa geotécnico basado en las características de los suelos obtenidas en laboratorio. Una vez recabada la información para utilizar SHALSTAB se modeló el mapa de susceptibilidad, para posteriormente ser validado empleando la curva ROC. A continuación, se describe la metodología de cada punto mencionado.

### **6.1 Fotointerpretación**

Se realizó la fotointerpretación (Figura 14) de seis fotografías aéreas obtenidas de INEGI del año 2005 a escala 1: 40 000 a color, con el objetivo de localizar las corrientes de agua existentes, las microcuencas, caminos, identificación de unidades de ladera según el modelo de Ruhe (dividiéndolas en superficie cumbral, hombro, lomo de ladera, pie de monte y valle) y principalmente, conocer la morfología para definir zonas de las laderas en las que se realizó el muestreo en campo, dichas laminas obtenidas, fueron digitalizadas en ArcGis.

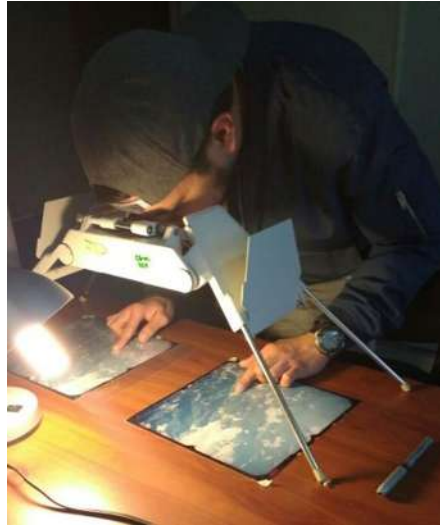


Figura 14.- Proceso de fotointerpretación

## **6.2 Obtención de muestras en campo**

Para la ubicación de los puntos de muestreo, se realizó un mapa morfológico de las laderas existentes clasificando la forma de éstas. Las clasificaciones fueron laderas cóncavas, convexas, rectas, zonas planas y semi planas (Figura 15).

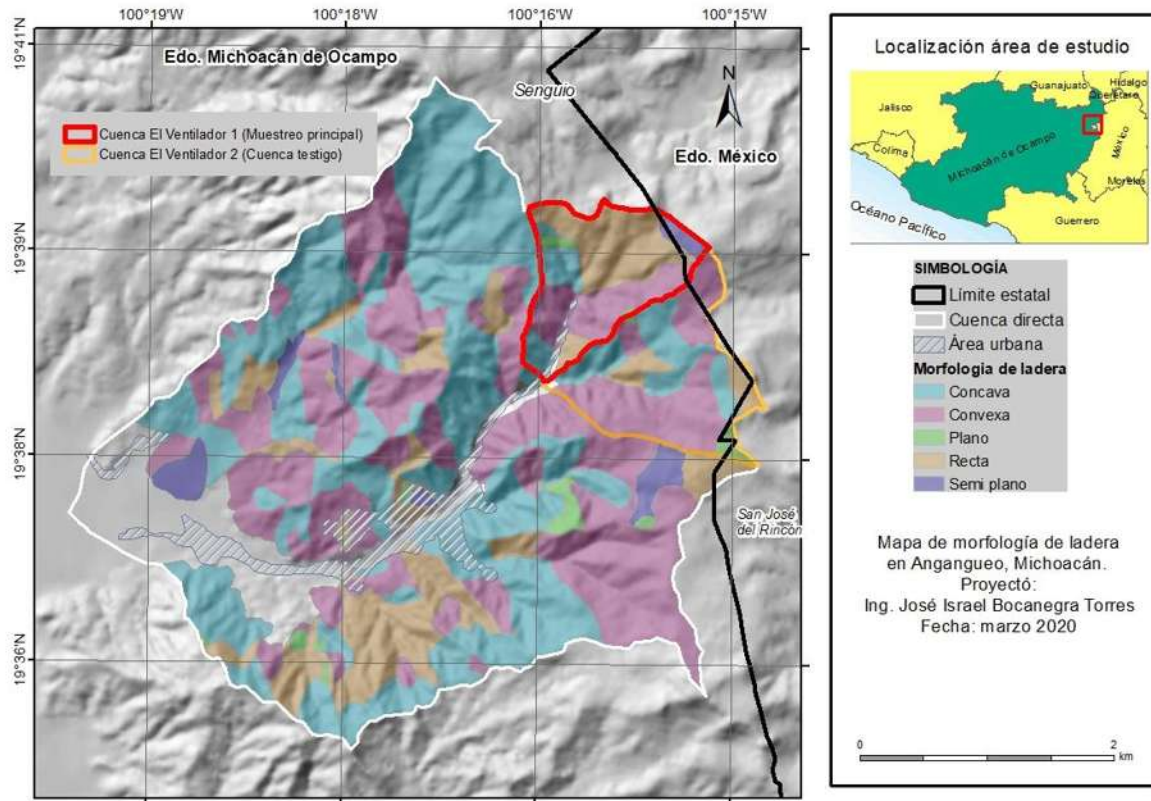


Figura 15.- Morfología de la ladera, coordenadas WGS\_1984.

Una vez definidas las unidades morfológicas se realizaron pozos a cielo abierto, cubriendo al menos una unidad identificada previamente en el mapa morfológico realizando un total de trece sondeos (Figura 16). La extracción de material, con el fin de obtener los parámetros mecánicos y físicos del suelo, se realizó de acuerdo a la Norma NMX-C-467-ONNCCE-2013 (ONNCCE, 2013). En total fueron 23 muestras alteradas de suelo obtenidos de los PCA, las muestras se guardaron y etiquetaron en costales y bolsas. Las muestras se guardaron en la sombra recubiertas con un trapo húmedo para que evitar que perdieran humedad.

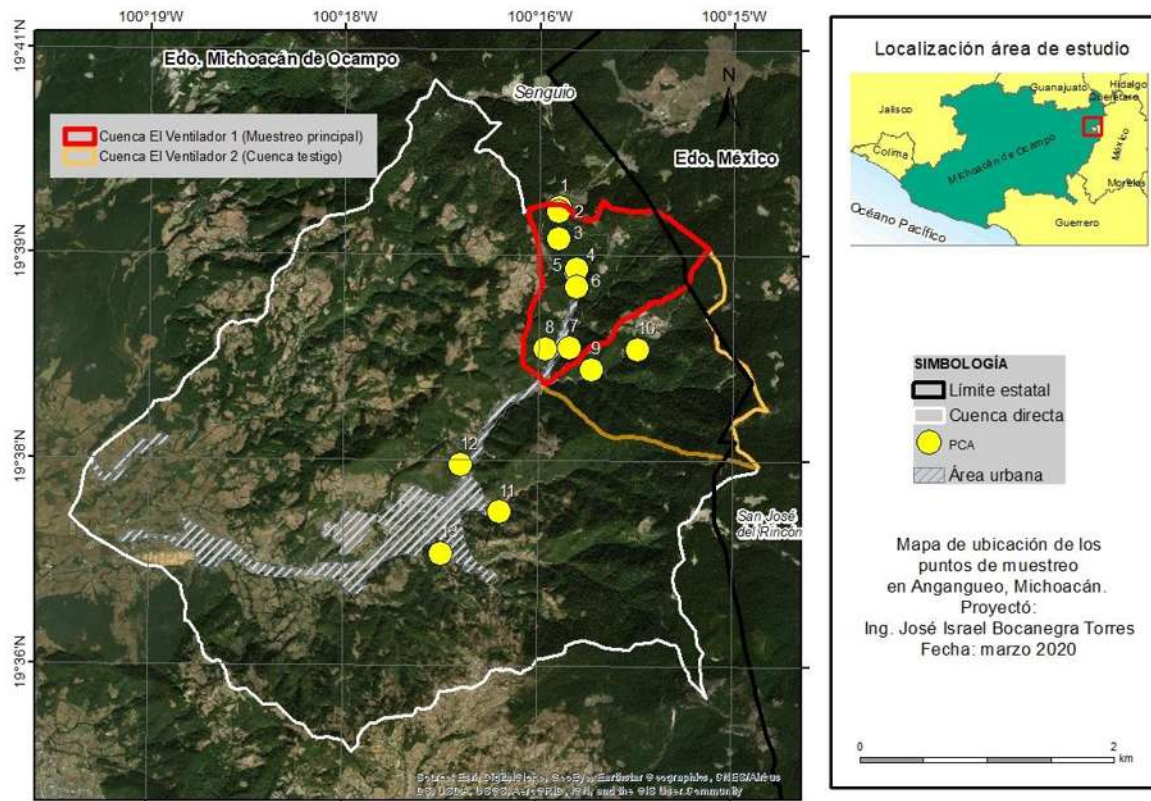


Figura 16.- Ubicación de los PCA en campo, coordenadas WGS\_1984.

En la figura 17, se muestra el PCA #4 en el cual se encontraron dos estratos y en la tabla 6 y 7, se encuentran demarcados los espesores, consistencia natural y ubicación de todos los PCA.



Figura 17.- Extracción de material del PCA #4 para su análisis en laboratorio

## 6.3 Obtención de parámetros físicos de los suelos

### 6.3.1 Humedad de campo

La humedad se obtuvo con base en la norma NMX-C-503-ONNCCE-2015 (ONNCCE, 2015). En la figura 18 se muestra un estrato siendo secado. La humedad se obtuvo calculando:

Ecuación 21.- Cálculo de la humedad de campo

$$W(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Dónde: W (%) es la humedad expresada en porcentaje.

Ph = Peso húmedo expresado en gramos

Ps= Peso seco expresado en gramos



Figura 18.- Secado del material para cada estrato

### **6.3.2 Peso volumétrico húmedo del lugar (PVHL)**

Una vez obtenida la humedad natural de cada uno de los estratos se obtuvo el PVHL de cada uno, haciendo en promedio un total de 3 mediciones en su mayoría por cada estrato con el fin de formular un promedio global para su representación. Esto se hizo elaborando manualmente pastillas de suelo utilizando navajas, con el fin de sumergir la pastilla en mercurio para a través de éste, obtener el volumen del suelo.

Dichas pastillas se muestran en la siguiente figura, donde se observan las pastillas correspondientes al PCA #3 Estrato # 1.



Figura 19.- Obtención de pastillas para PVHL.

Una vez obtenidas las pastillas, se sumergieron en mercurio, considerando el peso de la pastilla inicialmente, así como el peso del mercurio desalojado (Figura 20).



Figura 20.- Mercurio desalojado al momento de sumergir la pastilla de suelo.  
El PVHL se obtuvo de la siguiente manera

Ecuación 22.- Cálculo del PVHL

$$\text{PVHL (gr/cm}^3\text{)} = \frac{W_p}{\frac{WHg}{\gamma Hg}}$$

Dónde:  $W_p$  = Peso de la pastilla de suelo en gr

$WHg$  = Peso del mercurio desalojado

$\gamma Hg$  = Peso específico del mercurio (13.56 gr/cm<sup>3</sup>)

### 6.3.3. Límites de consistencia de suelos

Para la obtención de éstos, se basó en la norma NMX-C-493-ONNCCE-2018 (ONNCCE, 2018) siguiendo los lineamientos que ésta demarca.

En la figura 21 se muestra el momento en el que se encontró el Límite líquido (LL) del suelo en estudio.



Figura 21.- Momento en el que el suelo llega a su LL.

Una vez obtenido el Límite líquido (LL), se obtiene el límite plástico (LP), contracción lineal (CL) y Contracción volumétrica (CV). Metiendo al horno de secado a 110°C las muestras de LL y LP, y dejando 24 h la CV y CL a secado al medio ambiente, pasadas esas 24 h la CV y CL se colocó dentro del horno de secado a la misma temperatura durante 24 h (Figura 22).



Figura 22.- Límites de consistencia Húmedos y secos.

Posteriormente, se procede al cálculo del Índice Plástico (IP) del material, para poder utilizar la clasificación del suelo con base a la carta de plasticidad.

### 6.3.4. Determinación de la composición granular

Para la distribución granulométrica se empleó la norma NMX-C-496-ONNCCE-2014 (ONNCCE, 2014) a cada uno de los estratos demarcados anteriormente. En la figura 23 se muestra la manera en la que el S.U.C.S realiza la clasificación de los suelos.

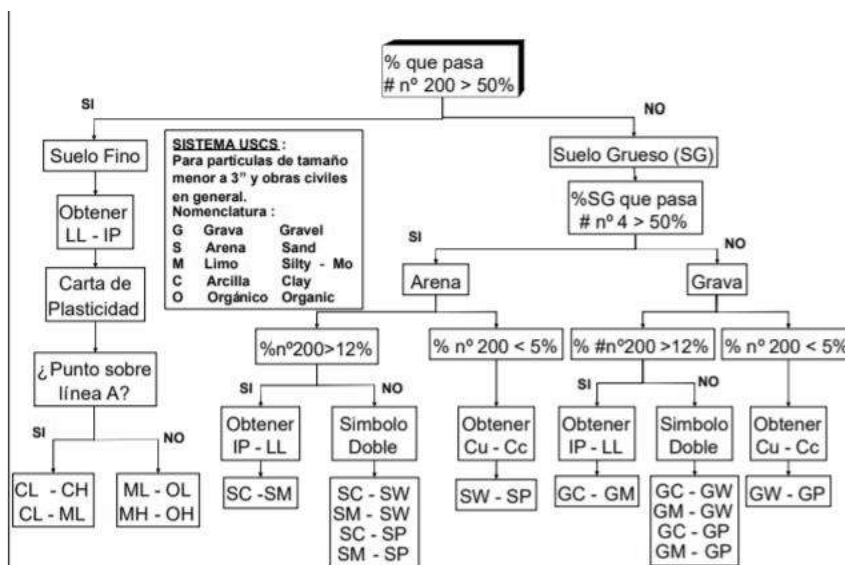


Figura 23.- Metodología de clasificación de suelos S.U.C.S

### 6.3.5. Reconstrucción de muestra

Una vez que se obtuvieron los valores de humedad natural y PVHL, se procedió a realizar una muestra reconstituida con el fin de obtener muestras para realizar la prueba triaxial (U.U).

Para la obtención de la muestra reconstituida, es necesario conocer el volumen del molde con el cual se va a trabajar, para este caso el volumen del molde es de 2454.56 cm<sup>3</sup> y se formula de la siguiente manera.

Ecuación 23.- Cálculo del material requerido para reconstruir una muestra representativa de campo

$$\text{Material requerido (gr)} = \text{PHVL} * \text{Volumen del Molde}$$

Ecuación 24.- Cálculo del agua necesaria para reconstruir una muestra representativa de campo

$$\text{Agua necesaria (ml)} = \text{Material requerido} \left( \frac{W_{\text{natural}}(\%) - W_{\text{actual}}(\%)}{100 + W_{\text{actual}}(\%)} \right)$$

Una vez obtenidos los parámetros se realizó la adición de agua al material hasta que quedó de forma homogénea y se procede a la colocación de material requerido en 3 capas dando 25 golpes con la varilla punta de bala, con las 3 capas colocadas, se procedió a colocarlas en una prensa con el fin de obtener la presión de confinamiento (figura 24), para tener el material similar al PVHL.



Figura 24.- Homogenización del material y confinamiento.

Una vez obtenida la muestra se procede a labrar los especímenes de suelo para probarlos en la máquina triaxial (Figura 25).



Figura 25.- Muestra obtenida una vez efectuado el confinamiento y labrado de especímenes.

Cada muestra obtenida se probó en la máquina triaxial, efectuando una compresión axial sin confinamiento y tres más agregando confinamiento.

### **6.3.6 Prueba triaxial rápida no consolidada no drenada (U.U.)**

Con el fin de obtener el ángulo de fricción interno y la cohesión del suelo, se realizó la prueba triaxial rápida (U.U.) con base en la norma NMX-C-432-ONNCCE-2002 (ONNCCE, 2002) y se siguieron los lineamientos que ésta demarca.

En la figura 26, se muestra un espécimen de suelo antes de probar en compresión simple y después de probarlo.

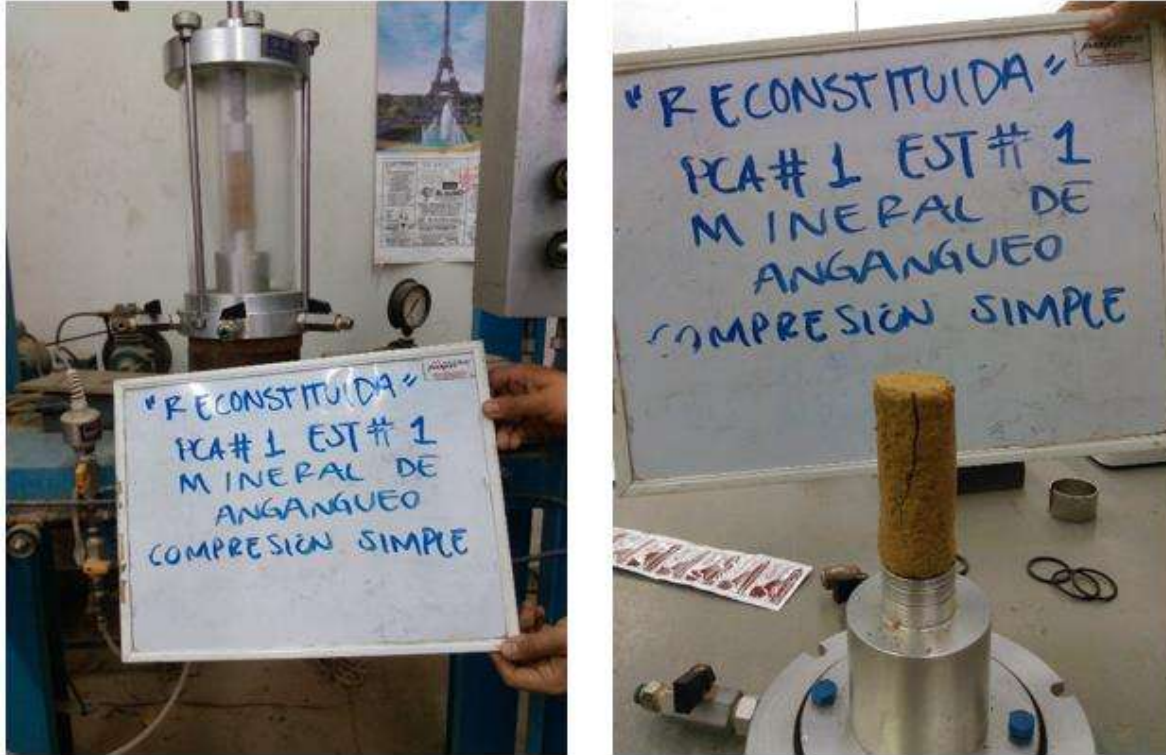


Figura 26.- Suelo probado en compresión simple, en la parte izquierda se muestra sin carga aplicada y en la derecha se muestra el espécimen probado.

En la figura 27 se muestra el espécimen de suelo a probar con confinamiento, dicha muestra está protegida por una membrana de látex que a su vez está siendo presionado por ligas Orlin, para evitar que, al momento de ejercer la presión de aire al agua, ésta se meta a la muestra.



Figura 27.- En la parte izquierda preparación de la muestra para su ensayo triaxial y parte derecha muestra montada para la ejecución de la prueba.

### 6.3.7. Obtención de la permeabilidad mediante la prueba de consolidación unidimensional

Para la obtención de la muestra se elaboró una muestra reconstituida. Una vez obtenida la muestra reconstituida, se labró con el anillo de consolidación sobre de ella (Figura 30 parte izquierda), una vez delimitado el anillo, se corta del todo, se enrasa (Figura 30 parte derecha) y se monta la prueba (Figura 29).

Para la obtención de la permeabilidad, se utilizó lo demarcado por la norma AASHTO T 216 correspondiente a la Consolidación Unidimensional, para esto, se hicieron grupos de los estratos obtenidos en campo, basándose en el límite líquido esencialmente, esto fue posible dado que como se mencionó anteriormente, teniendo en cuenta que se encontraron

ML, CL y MH, los 5 grupos que se hicieron (Figura 29), donde se tiene en el eje horizontal los rangos de las agrupaciones y en el eje vertical el número de muestras de cada rango, cabe señalar que el color de la barra de cada grupo, corresponde a los colores demarcados en la columna de LL (%) de las tablas 16 y 17.



Figura 28.- Anillo sobre la muestra reconstituida (Izquierda) y labrado de éste (Derecha).

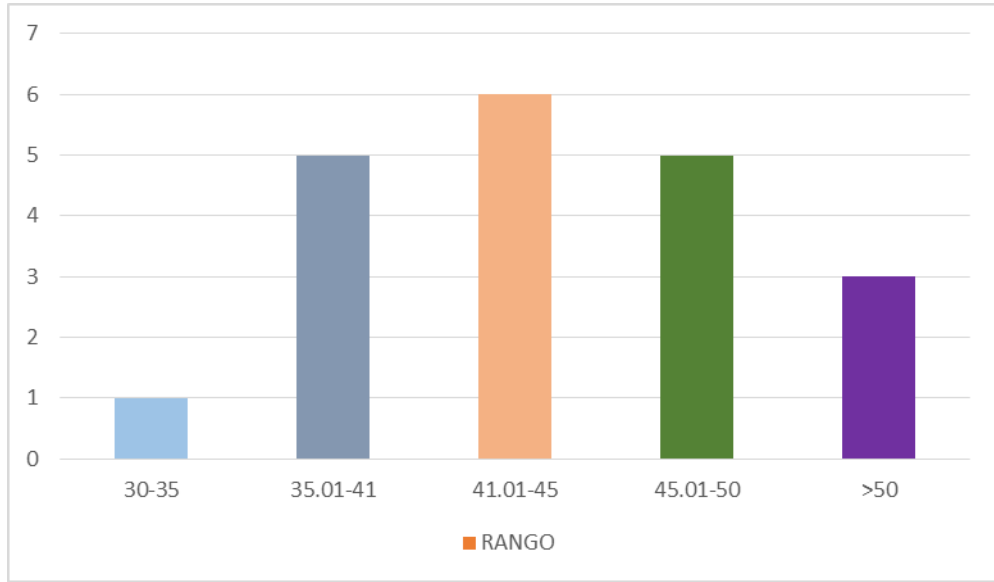


Figura 29.- Grupos para consolidación. En el eje horizontal se encuentran los rangos del límite líquido de las agrupaciones de los suelos y en el eje vertical el número de muestras que se consideraron de cada rango



Figura 30.- Anillo enrasado y montado.

### 6.3 Uso de SHALSTAB

El mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa fue el resultado de utilizar la herramienta *SHALSTAB* en el ArcMap para el cálculo de FS para cada pixel. Los insumos con los que se alimentó la herramienta (Fig. 33) fueron un modelo digital de elevación (MDE) con base al conjunto de datos vectoriales de información topográfica serie III de ciudad Hidalgo y Angangueo (INEGI, 2015) con una resolución de 5 m. A partir del MDE se realizó un archivo ráster de la dirección de flujo en infinitas direcciones, sin embargo, fue necesario llenar las oquedades o celdas sin valor del MDE a través de *ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Hydrology/Fill*. Además, se generó un ráster con los valores del espesor de los suelos (Z) generalizado a 3 m y con una resolución de pixel de 5 m. Se utilizó el archivo shp de la morfología de laderas (Fig. 15) obtenida con la fotointerpretación agrupando cinco diferentes categorías, las cuales son cóncava, convexa, plano, recta y semi plano, en éste *shapefile* se agregaron los parámetros del suelo que utiliza el *SHALSTAB* para calcular la susceptibilidad: cohesión del suelo, cohesión de raíces, peso específico del suelo, peso de vegetación y la profundidad a analizar (tabla 6), resultando también un mapa geotécnico. Cabe señalar que las simulaciones fueron realizadas para el caso más desfavorable, es decir, utilizando el peso volumétrico máximo, la cohesión mínima y el ángulo de fricción mínimo, esto con el fin de poder tener el peor escenario posible. Además, solamente se hizo la modelación para las partes más agrestes de la ladera y no se consideró la zona de asentamientos urbanos al estar el suelo cubierto por otros materiales.

Tabla 6.- Parámetros utilizados

MORFOLOGIALADERA#1											
	FID	Shape *	Id	MORF_LADER	T_MAPA	cs	cr	f	w	z	rs
▶	0	Polygon	0	SEMI PLANO	MORFOLOGIA DE LADERA	30400.615	0	31	0	3	1691
	1	Polygon	0	RECTA	MORFOLOGIA DE LADERA	13729.31	0	19	0	3	1691
	2	Polygon	0	CONVEXA	MORFOLOGIA DE LADERA	13729	0	14	0	3	1691
	3	Polygon	0	CONCAVA	MORFOLOGIA DE LADERA	8825.985	0	31	0	3	1640
	4	Polygon	0	PLANO	MORFOLOGIA DE LADERA	8825.98	0	28	0	3	1544

Donde:

- Cs: Cohesión del suelo (N/m<sup>2</sup>)
- Cr: Cohesión de raíces (N/m<sup>2</sup>)
- Rs: Peso específico del suelo (kg/m<sup>3</sup>)
- W: Peso de la vegetación (N/m<sup>2</sup>)
- Z: Profundidad a analizar (m)

En la figura 31 se muestra el proceso de la información que requiere la herramienta SHALSTAB, para poder generar un mapa de susceptibilidad, los recuadros en color naranja son los elementos que se gestionan en la interfaz de éste.

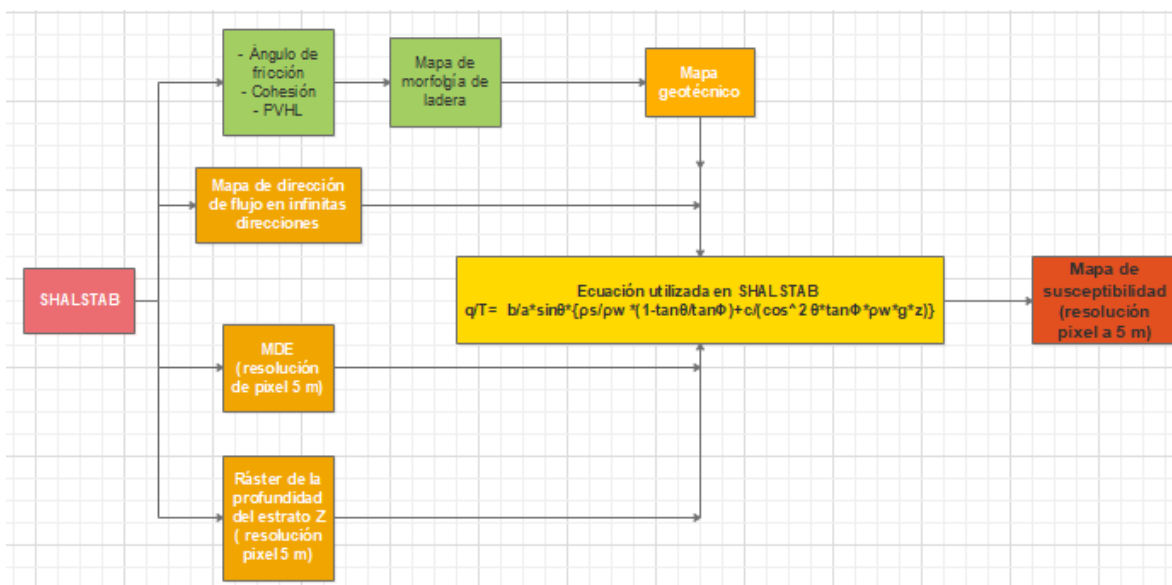


Figura 31.- Se muestra el esquema metodológico seguido para obtener el mapa de susceptibilidad. En los recuadros de color naranja se muestra los datos requeridos de entrada de SHALSTAB y, en amarillo, la ecuación con la cual trabaja.

## 6.4 Validación del mapa empleando la curva ROC

Utilizando el software estadístico IBM SPSS Statistics 2.0 se generó la estadística de la curva ROC, con el objetivo de conocer la validez y fiabilidad del mapa de susceptibilidad en las microcuencas del Ventilador. Se utilizó como puntos verdaderos positivos el mapa inventario de PRM con un total de 105 puntos (Figura 13) y para puntos verdaderos negativos se generaron la misma cantidad de entidades puntuales los puntos verdaderos. Posteriormente se extrajo los valores de probabilidad del mapa para cada punto tanto los

verdaderos como los negativos positivos y la información generada se exportó a un archivo Excel.

## Capítulo 7. Resultados de análisis de laboratorio

### 7.1 Datos obtenidos de campo

En la figura 32, se muestra el PCA #4 en el cual se encontraron dos estratos y en la tabla 6 y 7, se encuentran demarcados los espesores, consistencia natural y ubicación de todos los PCA.



Figura 32.- Extracción de material del PCA #4 para su análisis en laboratorio

En las tablas 7 y 8, se muestran los espesores, y consistencia natural de los estratos encontrados, así como su ubicación.

Tabla 7.- Espesores, ubicación y consistencia natural del terreno.

PCA (#)	ESTRATO (#)	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO qu (kg/cm <sup>2</sup> )	CONSISTENCIA NATURAL	UBICACIÓN
1	CAPA VEGETAL	0 - 0.61	0.61	N/A	N/A	N/A	366614E 2173890N
	1	0.61 - 2.00	1.39	4.2	4.5	DURA	
				4.6			
				4.6			
2	CAPA VEGETAL	0 - 0.5	0.5	N/A	N/A	N/A	366606E 2173832N 3180 M.S.N.M
	1	0.5 - 2.13	1.63	4.6	3.8	MUY COMPACTA	
				4			
				3.8			
3	CAPA VEGETAL	0 - 0.17	0.17	N/A	N/A	N/A	366595E 2173462N 3070 M.S.N.M
	1	0.17 - 0.53	0.36	1.2	2.5	MUY COMPACTA	
				4.2			
				3			
	2	0.53 - 0.79	0.26	1.6	3.55	MUY COMPACTA	
				3			
				3.8			
3.2							
4	CAPA VEGETAL	0 - 0.11	0.11	N/A	N/A	N/A	366829E 2173022N 2996 M.S.N.M
	1	0.11 - 0.81	0.7	3.5	4.03	DURA	
				4.4			
				4.2			
	2	0.81 - 1.51	0.7	4.4	4.3	DURA	
4.3							
5	CAPA VEGETAL	0 - 0.05	0.05	N/A	N/A	N/A	366836E 2173052N 3006 M.S.N.M
	1	0.05 - 0.46	0.51	1.4	1.73	COMPACTA	
				1.8			
				2			
	2	0.46 - 1.20	0.64	4.2	4.23	DURA	
				4.3			
4.2							

Tabla 8.- Espesores, ubicación y consistencia natural del terreno.

PCA (#)	ESTRATO (#)	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	qu (kg/cm <sup>2</sup> )	PROMEDIO qu (kg/cm <sup>2</sup> )	CONSISTENCIA NATURAL	UBICACIÓN
6	CAPA VEGETAL	0 - 0.20	0.2	N/A	N/A	N/A	366838E
	1	0.20 - 0.40	0.2	4.2	4.2	DURA	2172814N
	2	0.40 - 0.55	0.15	3.6	3.6	MUY COMPACTA	2933
	3	0.55 - 0.90	0.35	4.4	4.4	DURA	M.S.N.M
7	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	366736E 2171995N 2868 M.S.N.M
	1	0.10 - 0.37	0.27	2	2.8	MUY COMPACTA	
				3.6			
				2.8			
	2	0.37 - 1.47	1.1	4.3	4.3	DURA	
				4.4			
				4.2			
	3	1.47 - 1.83	0.36	4.3	4.3	DURA	
				4.5			
				4.2			
	4	1.83 - 2.10	0.27	4	2.9	MUY COMPACTA	
				2.5			
2.2							
8	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	366423E 2171980N 2829 M.S.N.M
	1	0.10 - 1.40	1.3	1.4	1.6	COMPACTA	
				2			
				1.4			
	2	1.40 - 2.33	0.93	3.6	4.1	DURA	
				4.4			
4.3							
9	CAPA VEGETAL	0 - 0.15	0.15	N/A	N/A	N/A	367043E 2171701N 2842 M.S.N.M
	1	0.15 - 0.95	0.8	2.2	2.3	MUY COMPACTA	
				2.4			
				2.4			
2	0.95 - 1.95	0.8	ROCA	N/A	ROCA		
10	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	367663E 2171971N 2982 MSNM
	1	0.10 - 0.87	0.77	0.8	1	MEDIA	
				0.8			
				1.4			
	2	0.87 - 1.96	1.09	4.1	4.3	DURA	
				4.3			
4.4							

Dado que no fue posible sacar muestras inalteradas en el sitio, fue indispensable obtener propiedades de campo referidas a humedad natural, consistencia natural del suelo y peso volumétrico húmedo del lugar (PVHL). Los valores anteriores para la elaboración de una muestra reconstituida, la cual consiste en reconstruir una muestra en laboratorio con las mismas características de campo con base en los PVHL y contenido de humedad.

### 7.1.1 Valores de Humedad de Campo

En la tabla 9, se muestran los valores obtenidos de las humedades de cada uno de los estratos obtenidos en campo.

Tabla 9.- Humedades de campo

PCA (#)	ESTRATO (#)	HUMEDO (gr)	W SUELO SECO (gr)	HUMEDAD DE CAMPO (%)
1	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	201.4	175.4	14.823
2	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	201.6	134.4	50.000
3	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	201	152.6	31.717
	2	201	166.6	20.648
4	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	200.8	167.2	20.096
	2	202.8	159.8	26.909
5	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	201.2	162.4	23.892
	2	201	161	24.845
6	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	203.6	174	17.011
	2	201.4	173.6	16.014
	3	201	168.8	19.076
7	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	200.6	159.6	25.689
	2	201	161	24.845
	3	200	157.6	26.904
	4	202.2	158.4	27.652
8	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	200.4	156.4	28.133
	2	201.6	164.8	22.330
9	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	202.2	173.6	16.475
	2	ROCA		
10	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A
	1	200	146.2	36.799
	2	201	151.6	32.586

### 7.1.2 Valores de Peso volumétrico húmedo del lugar (PVHL)

Los resultados obtenidos en cada uno de los estratos se muestran en las tablas 10 y 11.

Tabla 10.- PVHL

PCA (#)	ESTRATO (#)	W MATERIAL (gr)	W MERCURIO (gr)	VOL. MERCURIO DESALOJADO (cm <sup>3</sup> )	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	PROMEDIO PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )
1	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	6.4	54.4	4.012	1.595	1.544
		6.2	51.4	3.791	1.636	
		5.2	47	3.466	1.500	
		6.8	63.8	4.705	1.445	
2	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	No se pudo obtener muestra dado que el material era muy deleznable				
3	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	5.8	63	4.646	1.248	1.411
		8.4	72.8	5.369	1.565	
		6.4	59.2	4.366	1.466	
		7	69.6	5.133	1.364	
	2	11.6	84.8	6.254	1.855	1.653
		12	106.4	7.847	1.529	
		8	64.6	4.764	1.679	
		13.6	119	8.776	1.550	
	4	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A
1		10	85.2	6.283	1.592	1.603
		11.4	95.8	7.065	1.614	
		9.8	95.2	7.021	1.396	1.354
		6.8	68.2	5.029	1.352	
		8.4	86.6	6.386	1.315	
2		21.4	179.2	13.215	1.619	1.637
		17.4	142.8	10.531	1.652	
		19.6	162	11.947	1.641	
5		CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	10	106.6	7.861	1.272	1.485
		7.8	89.8	6.622	1.178	
		21.6	163.4	12.050	1.793	
		15.6	124.6	9.189	1.698	
	2	11.2	99.2	7.316	1.531	1.537
		19.6	178	13.127	1.493	
		13.2	119.2	8.791	1.502	
		18.2	152.2	11.224	1.621	

Tabla 11.- PVHL

PCA (#)	ESTRATO (#)	W MATERIAL (gr)	W MERCURIO (gr)	VOL. MERCURIO DESALOJADO (cm <sup>3</sup> )	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	PROMEDIO PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	
6	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	1	No se pudo obtener muestra					
	2	No se pudo obtener muestra					
	3	14.8	131	9.661	1.532	1.537	
		12.6	116	8.555	1.473		
8.2		69.2	5.103	1.607			
7	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	1	9.2	90.2	6.652	1.383	1.419	
		12	105.8	7.802	1.538		
		8	80.4	5.929	1.349		
		8.4	81	5.973	1.406		
	2	14.8	146	10.767	1.375	1.429	
		11.4	102.4	7.552	1.510		
		15.6	150.8	11.121	1.403		
	3	10.8	89.2	6.578	1.642	1.572	
		7.8	72.2	5.324	1.465		
		10.6	89.4	6.593	1.608		
	4	No se pudo obtener muestra					
	8	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
		1	9.2	98.4	7.257	1.268	1.311
12.8			122.2	9.012	1.420		
14.8			161.4	11.903	1.243		
2		10.4	76.6	5.649	1.841	1.817	
		13.6	98.2	7.242	1.878		
		14.4	112.8	8.319	1.731		
9	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	1	16.6	114.2	8.422	1.971	1.971	
	2	ROCA					
10	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
	1	7.2	105.6	7.788	0.925	1.044	
		8.2	116.8	8.614	0.952		
		8.8	107.2	7.906	1.113		
		8.6	111.4	8.215	1.047		
		6	68.8	5.074	1.183		
	2	11.4	91.4	6.740	1.691	1.691	
		12.6	99.2	7.316	1.722		
		12.2	97.4	7.183	1.698		
		11	90.4	6.667	1.650		

## 7.2 Valores obtenidos de la prueba de límites de consistencia de suelos



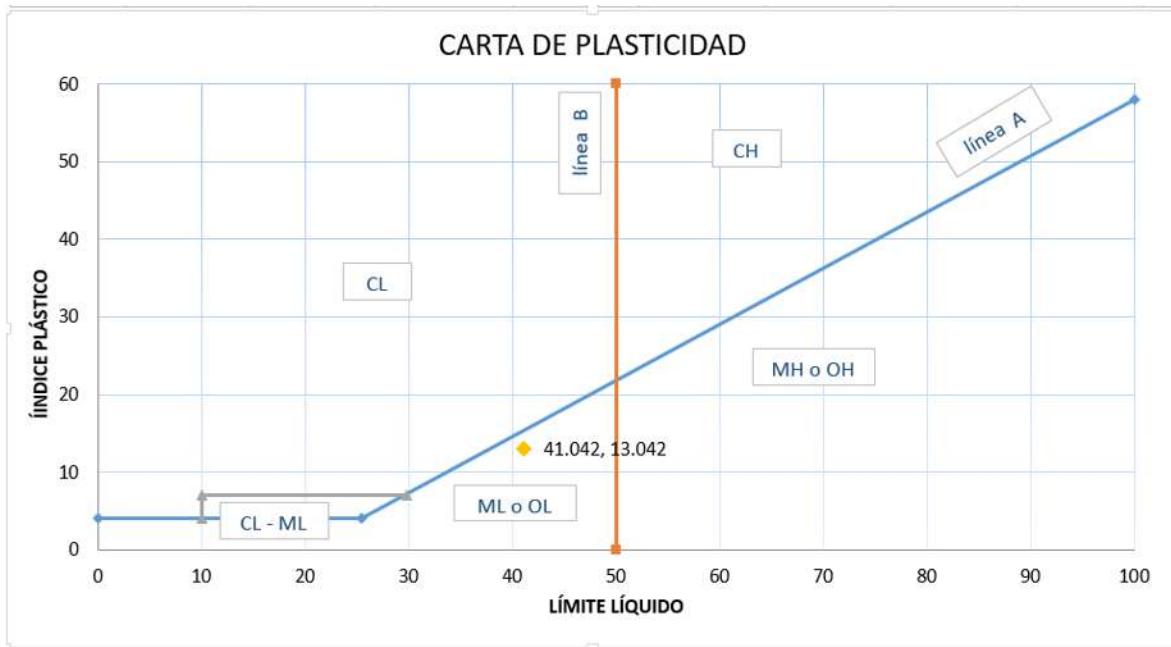


Figura 33.- Carta de plasticidad en la que se clasifica el suelo del PCA #4 Estrato #1.

La clasificación obtenida con base a los límites de plasticidad de cada estrato queda demarcada en la tabla 13 y 14.

Tabla 13.- Clasificación del suelo fino con base al SUCS.

PCA (#)	ESTRATO (#)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)	CLASIFICACIÓN
1	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	31.51	25.71	5.80	2.20	23.96	ML
2	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	90.70	76.47	14.23	1.00	39.44	MH
3	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	53.85	38.10	15.75	5.72	42.60	MH
	2	37.624	32.38	4.75	4.90	25.39	ML
4	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	36.49	26.47	10.02	4.10	23.12	ML
	2	42.71	31.25	11.46	5.83	25.37	ML
5	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	48.27	38.46	9.81	6.91	25.47	ML
	2	49.58	34.45	15.13	8.72	21.83	CL

Tabla 14.- Clasificación del suelo fino con base al SUCS.

PCA (#)	ESTRATO (#)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CL (%)	CV (%)	CLASIFICACIÓN
6	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	40.7	27.8	12.9	4.514	23.361	ML
	2	38.07	29.03	9.04	6.32	19.08	CL
	3	41.04	28.00	13.04	5.836	17.49	ML
7	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	41.94	29.07	12.87	3.39	23.70	ML
	2	37.72	28.95	8.78	4.00	11.83	ML
	3	41.10	29.76	11.34	4.13	27.74	ML
	4	44.49	37.93	6.56	3.08	40.77	ML
8	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	44.14	29.41	14.73	7.87	21.85	CL
	2	48.02	37.19	10.83	7.49	27.69	ML
9	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	47.27	34.71	12.56	2.27	23.33	ML
	2	ROCA					N/A
10	CAPA VEGETAL	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	72.41	53.57	18.84	10.44	35.61	MH
	2	46.78	37.29	9.50	6.63	27.20	ML

### 7.3 Valores de la determinación de la composición granular

En la tabla 15 se muestran los resultados del análisis granulométrico del PCA #7 ESTRATO #4. En la tabla 16, se muestran la humedad de campo, PVHL, y clasificación con base al S.U.C.S. de cada estrato encontrado.



Tabla 17.- Resultados de la prueba de compresión simple

COMPRESIÓN SIMPLE											
OBRA: ZONIFICACIÓN ANGANGUEO											
LOCALIZACIÓN: MINERAL DE ANGANGUEO											
SONDEO N°: 3 ENSAYE N°: 1											
MUESTRA N°: ESTRATO #2 PROF.: Factor de calibración prensa = 0.63											
DESCRIPCIÓN: COLOR AMARILLO, MUY DESLEZNABLE											
Ds=	3.1	cm	As=	7.5477	cm <sup>2</sup>	wm=	127.4	gr	ESFUERZO MÁX.=	0.8953	Kg/cm <sup>2</sup>
Dc=	3.03	cm	Ac=	7.2107	cm <sup>2</sup>	Vm=	60.59	cm <sup>2</sup>	CENTRO=	0.4476	Kg/cm <sup>2</sup>
Di=	3.43	cm	Ai=	9.2401	cm <sup>2</sup>	Ym=	2.103	Ton/cm <sup>3</sup>	RADIO=	0.4476	Kg/cm <sup>2</sup>
Hm=	7.97	cm	Am=	$\frac{As+4Ac+Ai}{6}$		=	7.6051	cm <sup>2</sup>			

1	2	3	4	5	6	7	8
Lectura del micrómetro de deformación	Lectura micrómetro de carga	Carga	Deformación total	Deformación unitaria	1- Deformación unitaria	Área corregida	Esfuerzo
mm.	mm.	Kg.	mm.	-----	-----	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	7.6051	0.0000
5	2.5	1.5750	0.1270	0.0016	0.9984	7.6172	0.2068
10	4.5	2.8350	0.2540	0.0032	0.9968	7.6294	0.3716
15	6	3.7800	0.3810	0.0048	0.9952	7.6416	0.4947
20	7	4.4100	0.5080	0.0064	0.9936	7.6539	0.5762
25	7.5	4.7250	0.6350	0.0080	0.9920	7.6662	0.6163
30	8.5	5.3550	0.7620	0.0096	0.9904	7.6785	0.6974
35	8.5	5.3550	0.8890	0.0112	0.9888	7.6909	0.6963
40	9	5.6700	1.0160	0.0128	0.9872	7.7033	0.7360
45	10	6.3000	1.1430	0.0143	0.9857	7.7158	0.8165
50	10	6.3000	1.2700	0.0159	0.9841	7.7283	0.8152
55	11	6.9300	1.3970	0.0175	0.9825	7.7408	0.8953
60	10.5	6.6150	1.5240	0.0191	0.9809	7.7534	0.8532

Tabla 18.- Resultados de la prueba triaxial con confinamiento de 0.9 kg/cm<sup>2</sup>

OBRA:	ZONIFICACIÓN ANGANGUEO		
LOCALIZACIÓN:	MINERAL DE ANGANGUEO		
SONDEO N°:	3	ENSAYE N°:	1
MUESTRA N°:	ESTRATO #2	PROF.:	
DESCRIPCIÓN:	COLOR AMARILLO, MUY DESLEZNABLE		

COMPRESIÓN TRIAXIAL  
 $\sigma_3 =$  0.90 Kg/cm<sup>2</sup>  
 Factor= 0.63

Ds=	3.67	cm	As=	10.5784	cm <sup>2</sup>	wm=	152.6	gr	ESFUERZO MÁX.=	3.3569	Kg/cm <sup>2</sup>
Dc=	3.72	cm	Ac=	10.8687	cm <sup>2</sup>	Vm=	103.49	cm <sup>2</sup>	CENTRO=	2.5785	Kg/cm <sup>2</sup>
Di=	3.9	cm	Ai=	11.9459	cm <sup>2</sup>	Ym=	1.475	Ton/cm <sup>3</sup>	RADIO=	1.6785	Kg/cm <sup>2</sup>
Hm=	9.41	cm	Am=	$\frac{As+4Ac+Ai}{6} =$		10.9998	cm <sup>2</sup>				

1	2	3	4	5	6	7	8
Lectura del micrómetro de deformación	Lectura micrómetro de carga	Carga	Deformación total	Deformación unitaria	1- Deformación unitaria	Área corregida	Esfuerzo
mm.	mm.	Kg.	mm.	-----	-----	cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	10.9998	0.0000
5	1	0.6300	0.1270	0.0013	0.9987	11.0147	0.0572
10	2	1.2600	0.2540	0.0027	0.9973	11.0296	0.1142
15	3	1.8900	0.3810	0.0040	0.9960	11.0446	0.1711
20	4	2.5200	0.5080	0.0054	0.9946	11.0595	0.2279
25	6	3.7800	0.6350	0.0067	0.9933	11.0746	0.3413
30	8	5.0400	0.7620	0.0081	0.9919	11.0896	0.4545
35	10	6.3000	0.8890	0.0094	0.9906	11.1048	0.5673
40	12.5	7.8750	1.0160	0.0108	0.9892	11.1199	0.7082
45	15	9.4500	1.1430	0.0121	0.9879	11.1351	0.8487
50	17.5	11.0250	1.2700	0.0135	0.9865	11.1503	0.9888
55	20.5	12.9150	1.3970	0.0148	0.9852	11.1656	1.1567
60	24	15.1200	1.5240	0.0162	0.9838	11.1809	1.3523
65	27	17.0100	1.6510	0.0175	0.9825	11.1963	1.5193
70	30	18.9000	1.7780	0.0189	0.9811	11.2117	1.6857
75	34	21.4200	1.9050	0.0202	0.9798	11.2272	1.9079
80	37	23.3100	2.0320	0.0216	0.9784	11.2426	2.0734
85	40	25.2000	2.1590	0.0229	0.9771	11.2582	2.2384
90	43	27.0900	2.2860	0.0243	0.9757	11.2738	2.4029
95	45	28.3500	2.4130	0.0256	0.9744	11.2894	2.5112
100	48	30.2400	2.5400	0.0270	0.9730	11.3050	2.6749
105	50	31.5000	2.6670	0.0283	0.9717	11.3207	2.7825
110	52	32.7600	2.7940	0.0297	0.9703	11.3365	2.8898
115	54	34.0200	2.9210	0.0310	0.9690	11.3523	2.9968
120	56	35.2800	3.0480	0.0324	0.9676	11.3681	3.1034
125	58	36.5400	3.1750	0.0337	0.9663	11.3840	3.2098
130	58.5	36.8550	3.3020	0.0351	0.9649	11.3999	3.2329
135	59	37.1700	3.4290	0.0364	0.9636	11.4159	3.2560
140	60	37.8000	3.5560	0.0378	0.9622	11.4319	3.3065
145	61	38.4300	3.6830	0.0391	0.9609	11.4480	3.3569
150	60	37.8000	3.8100	0.0405	0.9595	11.4641	3.2973
155	60	37.8000	3.9370	0.0418	0.9582	11.4802	3.2926

Una vez obtenidos todos los esfuerzos principales se realizó la envolvente de falla (Figura 25).

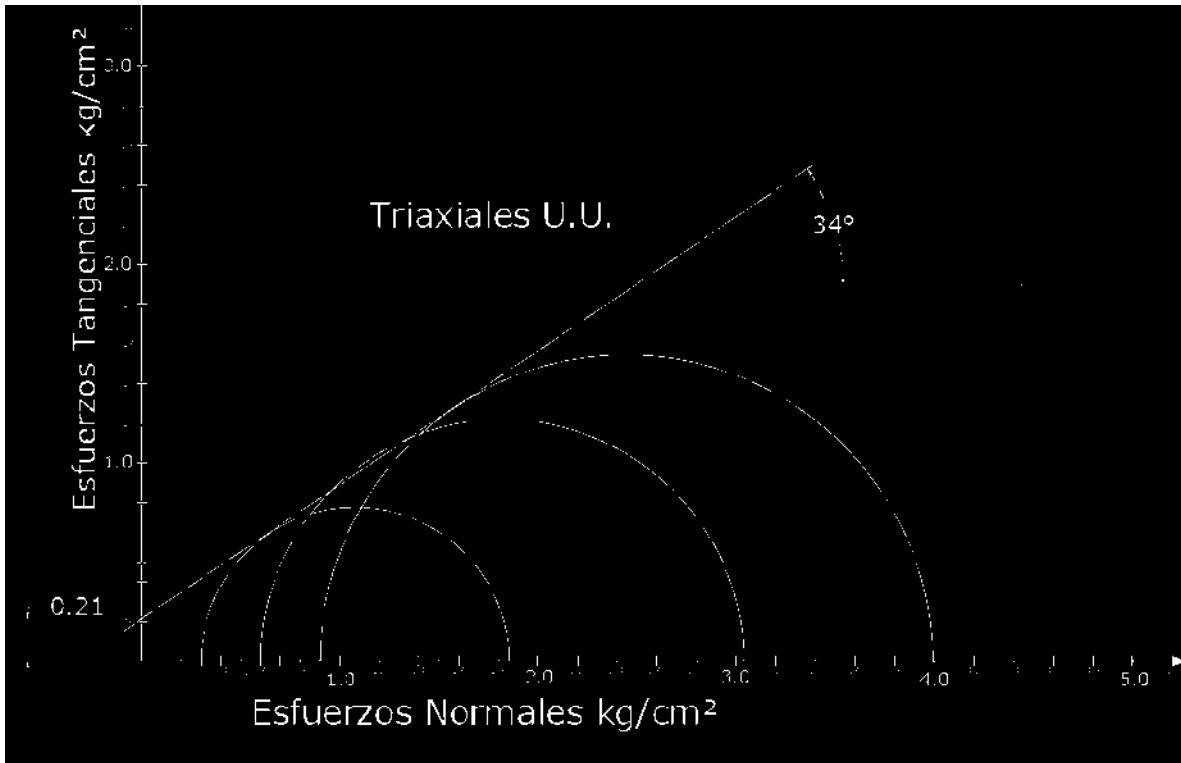


Figura 34.- Envolverte de falla del PCA #3 Estrato #2

Los valores de ángulo de fricción ( $\Phi$ ) y cohesión (C) de cada estrato se muestran en la tabla 19.

Tabla 19.- Valores de ángulo de fricción y cohesión

PCA (#)	ESTRATO (#)	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	$\phi$ (°)	C (N/m <sup>2</sup> )	C (kg/cm <sup>2</sup> )
1	CAPA VEGETAL	0 - 0.61	0.61	N/A	N/A	N/A
	1	0.61 - 2.00	1.39	28	8825.985	0.09
2	CAPA VEGETAL	0 - 0.5	0.5	N/A	N/A	N/A
	1	0.5 - 2.13	1.63	29	28439.285	0.29
3	CAPA VEGETAL	0 - 0.17	0.17	N/A	N/A	N/A
	1	0.17 - 0.53	0.36	28	29419.95	0.3
	2	0.53 - 0.79	0.26	34	20593.965	0.21
4	CAPA VEGETAL	0 - 0.11	0.11	N/A	N/A	N/A
	1	0.11 - 0.81	0.7	27	29419.95	0.3
	2	0.81 - 1.51	0.7	31	26477.955	0.27
5	CAPA VEGETAL	0 - 0.05	0.05	N/A	N/A	N/A
	1	0.05 - 0.46	0.51	33	57859.235	0.59
7	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 0.37	0.27	NO SE PUDO RECONSTITUIR		
	2	0.37 - 1.47	1.1			
	3	1.47 - 1.83	0.36			
	4	1.83 - 2.10	0.27	26	19613.3	1.38
8	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 1.40	1.3	12	13729.31	0.14
	2	1.40 - 2.33	0.93	48	137293.1	1.4
10	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 0.87	0.77	16	33342.61	0.34
	2	0.87 - 1.96	1.09	27	59820.565	0.61

### 7.5 Valores obtenidos de Permeabilidad

Una vez transcurrido el tiempo por la norma AASHTO T 216 se obtuvieron las siguientes tablas (20 y 21). Transcurrido el tiempo (cinco días) la muestra tuvo un aumento en el contenido de humedad de 10.8 % y una disminución de altura con respecto a su altura inicial de 6.02 mm por lo que su relación de vacíos disminuyó durante el proceso de consolidación.

Tabla 20.- Variación de pesos y alturas de la muestra al inicio y final de la prueba.

Determinación de W	Al principio de la prueba		Al final de la prueba	
Anillo y Vidrio N°	1		3	
Peso tara + suelo humedo	546.6		556.6	
Peso tara + suelo seco	521		521	
Peso del agua	25.6		35.6	
Peso Tara	421.8		421.8	
Peso suelo seco	99.2		99.2	
Contenido de agua %	25.81		35.89	

Anillo No: 1 Diámetro del anillo (cm): 8 Área del anillo (cm<sup>2</sup>): 50.27

Altura del anillo = Altura de la muestra al principio de la prueba = H1 (mm) = 20

Peso específico relativo de sólidos: **Ss = 2.54**  
 Altura de sólidos (Hs)mm: 7.77  
 $\Delta H = 6.018$

Altura final de la muestra (mm)	H2 = Ho - ΔH	13.98
Altura inicial del agua (mm)	Hwo = Wo * Hs * Ss	5.09
Altura final del agua (mm)	Hwpf = Wpf * Hs * Ss	7.08
Relación de vacíos inicial	eo = (Ho - Hs) / Hs	1.57
Relación de vacíos final	ef = (Hf - Hs) / Hs	0.80
Grado de saturación inicial (%)	Go = Hwo / (H1 - Hs)	41.64
Grado de saturación final (%)	Gf = Hwpf / (H2 - Hs)	114.01

Tabla 21.- Cálculo de permeabilidad con base a los parámetros obtenidos

Presión	Deformación lineal δ	Deformación unitaria ε	Espesor comprimido H <sub>1</sub>	H-Hs	e	Hm	Hm <sup>2</sup>	t <sub>50</sub>	a <sub>v</sub>	m <sub>v</sub>	C <sub>v</sub>	k <sub>m</sub>	e <sub>m</sub>	Pm
											cm <sup>2</sup> /seg	cm/seg	-	kg/cm <sup>2</sup>
kg/cm <sup>2</sup>	mm	%	mm	mm	-	cm	cm <sup>2</sup>	seg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /kg	cm <sup>2</sup> /seg	cm/seg	-	kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	20	12.23	1.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.25	2.97	14.85	17.03	9.26	1.19	0.93	0.86	100	1.53	0.70	0.001688316	0.0000010833	1.38	0.125
0.75	4.63	23.15	15.37	7.60	0.98	0.81	0.66	60	0.43	0.22	0.002154195	0.0000004415	1.09	0.500
1.75	5.78	28.9	14.22	6.45	0.83	0.74	0.55	70	0.15	0.08	0.001540062	0.0000001197	0.90	1.250
3.75	6.79	33.95	13.21	5.44	0.70	0.69	0.47	100	0.06	0.04	0.000926399	0.0000000341	0.77	2.750
1.75	6.747	33.735	13.253	5.48	0.71						Km promedio =		0.0000001984	
0.75	6.675	33.375	13.325	5.56	0.71									
0.25	6.572	32.86	13.428	5.66	0.73									
0	6.018	30.09	13.982	6.21	0.80									

**Donde:**

Pesos de los sólidos: Ws= 99.2 gr  
 Densidad de los sólidos: Ss= 2.54  
 Área de la probeta: A= 50.27 cm<sup>2</sup>  
 Espesor de los Sólidos: Hs=(Ws\*10)/(γw\*Ss\*A)= 7.77 mm  
 Espesor inicial: H<sub>1</sub>= 20 mm

Coficiente de compresibilidad: a<sub>v</sub>=Δe/ΔP=(e<sub>2</sub>-e<sub>1</sub>)/(P<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>) cm<sup>2</sup>/kg  
 Coficiente de variación volumétrica: m<sub>v</sub>=a<sub>v</sub>/(1+e<sub>1</sub>) cm<sup>2</sup>/kg  
 Coficiente de consolidación: C<sub>v</sub>=(0.197H<sub>m</sub><sup>2</sup>)/(t<sub>50</sub>) cm<sup>2</sup>/seg  
 Coficiente de permeabilidad: k<sub>m</sub>=(C<sub>v</sub>\*a<sub>v</sub>\*γw)/((1+e<sub>m</sub>)\*1000) cm/seg

En la tabla 22, se muestra la Clasificación y propiedades físico-mecánicas de los suelos analizados.

Tabla 22.- Clasificación y propiedades físico-mecánicas de los suelos analizados

PCA (#)	ESTRATO (#)	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR (m)	PROMEDIO PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	PROMEDIO PVHL (kg/m <sup>3</sup> )	HUMEDAD DE CAMPO (%)	LL (%)	CLAS. SUCS	SUCS (FINOS)	φ (°)	C (N/m <sup>2</sup> )	C (kg/cm <sup>2</sup> )	K (cm/seg)
1	CAPA VEGETAL	0 - 0.61	0.61	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.61 - 2.00	1.39	1.544	1544	14.823	31.51	ML	ML	31	11767.98	0.12	1.07x10 <sup>-7</sup>
2	CAPA VEGETAL	0 - 0.5	0.5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.5 - 2.13	1.63	S/M	N/A	50	90.7	MH	MH	29	34323.275	0.35	2.0x10 <sup>-7</sup>
3	CAPA VEGETAL	0 - 0.17	0.17	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.17 - 0.53	0.36	1.411	1411	31.717	53.852	SM	MH	32	24516.625	0.25	2.0x10 <sup>-7</sup>
	2	0.53 - 0.79	0.26	1.653	1653	20.648	37.624	SM	ML	38	13729.31	0.14	1.984x10 <sup>-7</sup>
4	CAPA VEGETAL	0 - 0.11	0.11	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.11 - 0.81	0.7	1.354	1354	20.096	36.49	ML	ML	24	30400.615	0.31	1.984x10 <sup>-7</sup>
	2	0.81 - 1.51	0.7	1.637	1637	26.909	42.71	SM	ML	33	46091.255	0.47	1.984x10 <sup>-7</sup>
5	CAPA VEGETAL	0 - 0.05	0.05	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.05 - 0.46	0.51	1.485	1485	23.892	48.27	ML	ML	41	60801.23	0.62	1.78x10 <sup>-7</sup>
	2	0.46 - 1.20	0.64	1.537	1537	24.845	49.58	CL	CL	S/M	S/M	S/M	S/M
6	CAPA VEGETAL	0 - 0.20	0.2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.20 - 0.40	0.2	S/M	S/M	17.011	40.7	SM	ML	S/M	S/M	S/M	S/M
	2	0.40 - 0.55	0.15	S/M	S/M	16.014	38.07	SC	CL	S/M	S/M	S/M	S/M
	3	0.55 - 0.90	0.35	1.537	1537	19.076	41.04	SM	ML	S/M	S/M	S/M	S/M
7	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 0.37	0.27	1.419	1419	25.689	41.94	ML	ML	S/M	S/M	S/M	S/M
	2	0.37 - 1.47	1.1	1.429	1429	24.845	32.72	ML	ML	S/M	S/M	S/M	1.07x10 <sup>-7</sup>
	3	1.47 - 1.83	0.36	1.572	1572	26.904	41.1	ML	ML	S/M	S/M	S/M	S/M
	4	1.83 - 2.10	0.27	S/M	N/A	27.652	44.49	SM	ML	31	135331.77	1.38	1.984x10 <sup>-7</sup>
8	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 1.40	1.3	1.311	1311	28.133	44.14	CL	CL	12	13729.31	0.14	1.984x10 <sup>-7</sup>
	2	1.40 - 2.33	0.93	1.817	1817	22.33	48.02	SM	ML	48	137293.1	1.4	1.78x10 <sup>-7</sup>
9	CAPA VEGETAL	0 - 0.15	0.15	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	S/M	N/A	N/A
	1	0.15 - 0.95	0.8	1.971	1971	16.475	44.14	SM	ML	S/M	S/M	S/M	1.78x10 <sup>-7</sup>
	2	0.95 - 1.95	0.8	ROCA	ROCA	ROCA	ROCA	ROCA	ROCA	ROCA		ROCA	N/A
10	CAPA VEGETAL	0 - 0.10	0.1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	1	0.10 - 0.87	0.77	1.044	1044	36.799	72.41	MH	MH	16	33342.61	0.34	2.0x10 <sup>-7</sup>
	2	0.87 - 1.96	1.09	1.691	1691	32.586	46.78	MH	MH	27	59820.565	0.61	1.78x10 <sup>-7</sup>

Obteniendo una permeabilidad de  $19.84 \times 10^{-6}$  cm/seg para 6 estratos establecidos en el rango 41.01 – 45. Cabe señalar que la permeabilidad depende de la granulometría del suelo (a mayor tamaño de la partícula mayor será la permeabilidad por los espacios vacíos que existen entre ellas), de la densidad del suelo (entre más denso, menor será la permeabilidad) y de la forma y orientación de las partículas del suelo (debido a que las condiciones de sedimentación dan lugar a orientaciones preferenciales, la permeabilidad varía en función de la dirección de flujo (Guerra Torralbo, 2018).

7.8

## 8. Resultados generales y discusión

La susceptibilidad se calculó para toda la cuenca (figura 34) bajo el supuesto de que se comparten las mismas características de las microcuenclas muestreadas conocida como “El ventilador” (Tabla 23). Cabe resaltar que este supuesto fue respaldado al tomar 3 muestras de suelo en otros puntos de la cuenca de Angangueo (Figura 16).

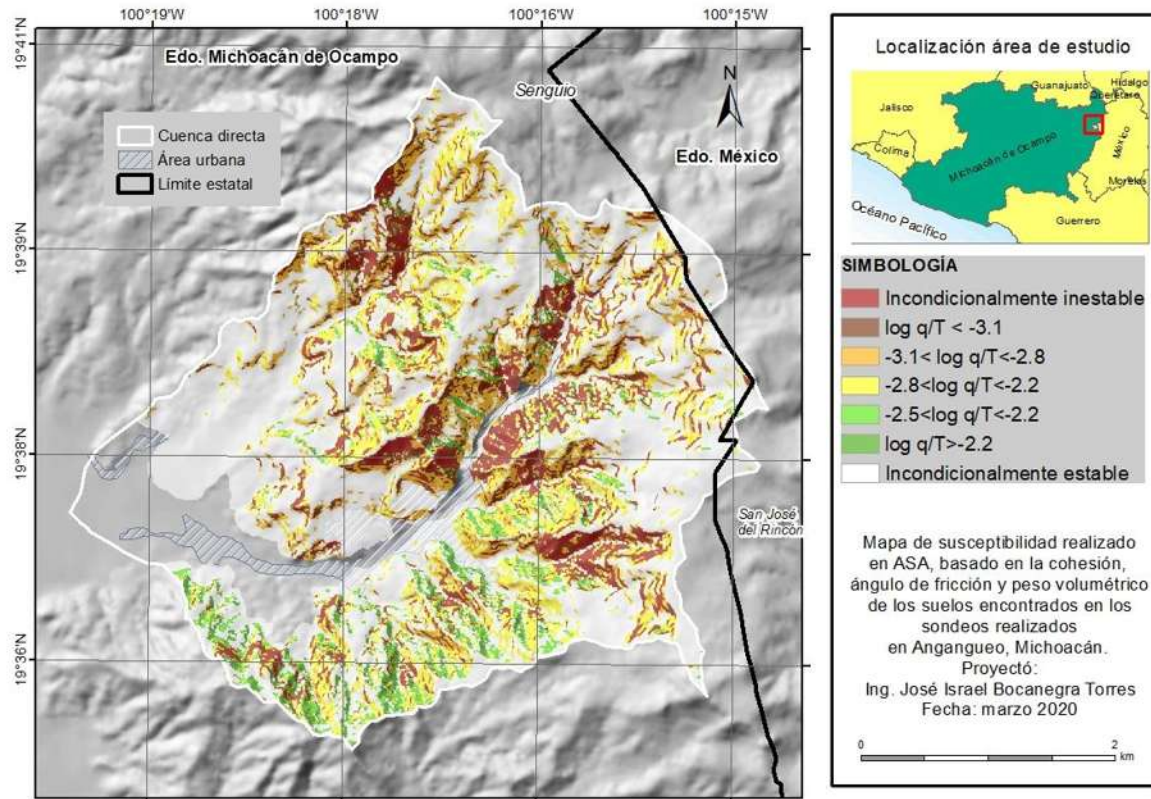


Figura 35.- Mapa de susceptibilidad general, coordenadas WGS\_1984.

Tabla 23.- Distribución de porcentajes de categorías de susceptibilidad

<b>Categoría</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
incondicionalmente inestable	10.9
$\log q/T < -3.1$	8.2
$3.1 < \log q/T < -2.8$	15.9
$-2.8 < \log q/T < -2.2$	10.4
$-2.5 < \log q/T < -2.2$	0.6
$q/T > -2.2$ (2.7%)	2.7
incondicionalmente estable	51.3

Las laderas convexas son aquellas que presentaron mayor susceptibilidad a los PRM. La distribución de las siete categorías se presenta en la tabla 23, en ella destaca que solamente el 10.9% de la superficie de la zona de estudio corresponde a una categoría de incondicionalmente inestable, esto puede ser debido a que la pendiente del terreno es mayor que el ángulo de fricción interno de los suelos y de esta manera genere una inestabilidad natural.

De acuerdo con los resultados del modelo de susceptibilidad desarrollado en este trabajo, el modelo tiene un valor predictivo del modelo general de 0.718 a través de la curva ROC. A partir de la fiabilidad del modelo se puede pensar que el papel del suelo y la pendiente son factores importantes para explicar y entender los procesos en remoción que han ocurrido en Anganguco.

Si bien el modelo resultó evaluado correctamente y coincide con el inventario de PRM, podría ser mejorado aumentando el número de muestras de los suelos en cada una de las laderas de las micro cuencas de la región, y de esta manera aumentar el número de valores más específicos. También se podría modificar la forma de obtener el ángulo de fricción interno y cohesión, ya que la metodología empleada fue con base a la prueba triaxial rápida no consolidada no drenada, y podría obtenerse un mejor valor acorde a campo con la

prueba de corte directo. Además, SHALSTAB no considera factores como la cobertura del uso del suelo y vegetación, orientación de la ladera y geología.

### 8.1 Verificación de resultados del mapa de susceptibilidad

Haciendo una superposición de los resultados del mapa con el inventario de deslizamientos, (Figura 36), se observó (Tabla 23) que el 11.4 % de los puntos corresponde a la categoría de incondicionalmente inestable. El mayor porcentaje de puntos (21.9%) corresponde a una categoría de  $-2.8 < \log q/T < -2.2$  que puede ser considerada como media, y 16.2% resultaron estar sobre la categoría incondicionalmente estable lo que representa una falla en el modelado de la susceptibilidad.

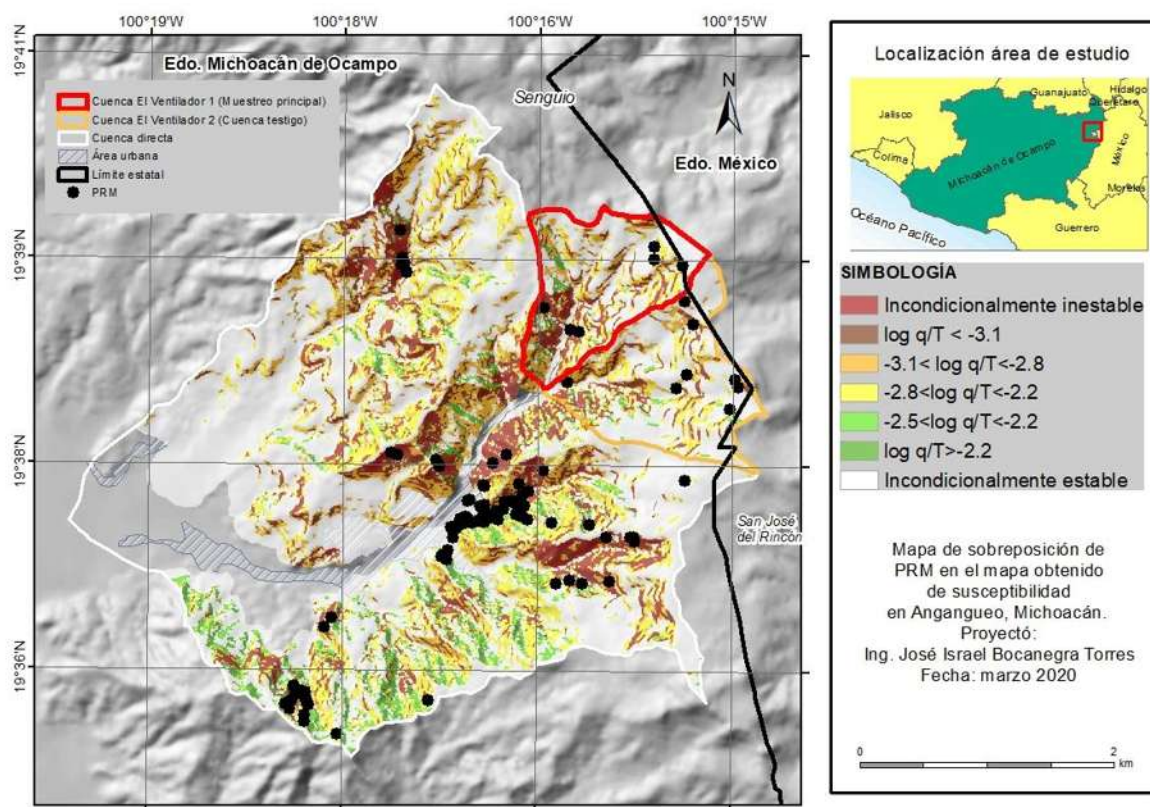


Figura 36.- Inventario de deslizamientos sobrepuesto a el mapa de susceptibilidad.

Tabla 24.- PRM registrados por categoría.

Categoría	PRM registrados	% PRM
incondicionalmente inestable	12	11.4
$\log q/T < -3.1$	19	18.1
$3.1 < \log q/T < -2.8$	18	17.1
$-2.8 < \log q/T < -2.2$	23	21.9
$-2.5 < \log q/T < -2.2$	11	10.5
$q/T > -2.2$ (2.7%)	5	4.8
incondicionalmente estable	17	16.2

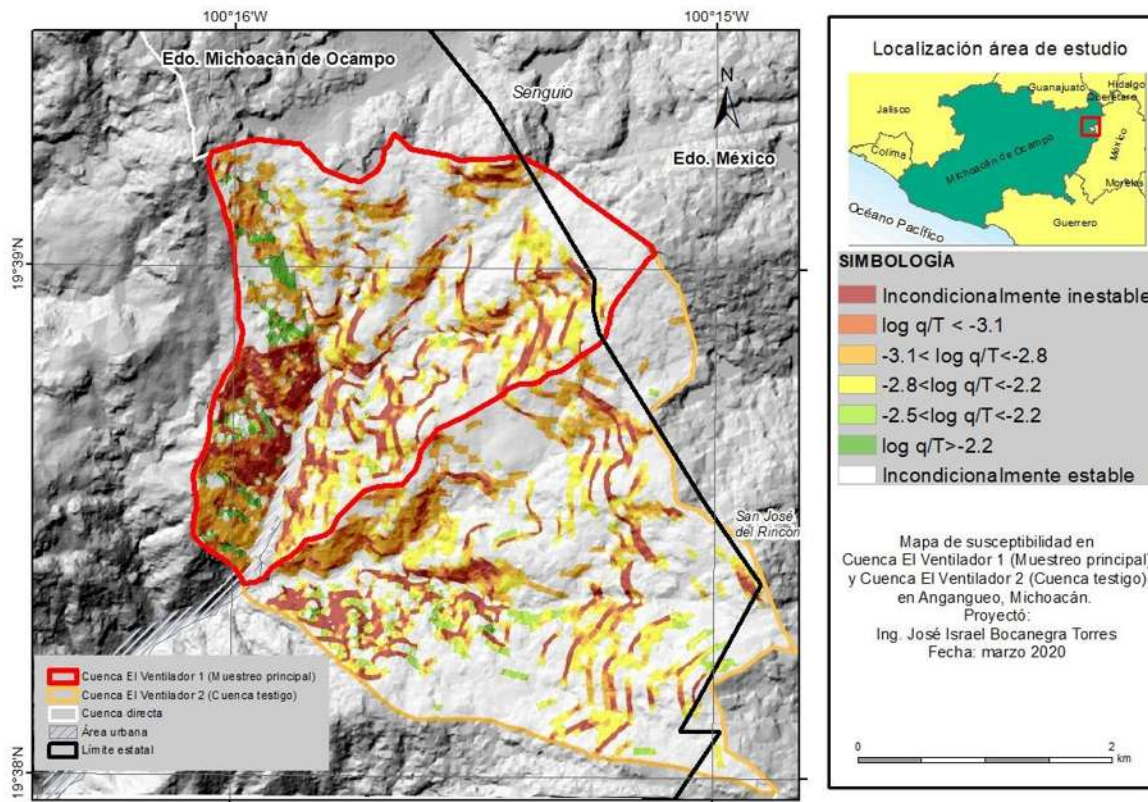


Figura 37.- Mapa de susceptibilidad en la cuenca El Ventilador (cuenca en estudio principal).

Teniendo como base el mapa de la figura 37, se sobrepuso el inventario de deslizamientos sobre este, con el fin de corroborar que los deslizamientos registrados coincidan en zonas de mayor susceptibilidad en el área donde se obtuvo las muestras de suelo (Figura 38). En

la tabla siguiente se muestran los PRM registrados por categoría de solamente la cuenca El Ventilador.

Tabla 25.- Número de PRM en cuenca El Ventilador.

<b>Categoría</b>	<b>PRM registrados</b>
Incondicionalmente inestable	2
$\log q/T < -3.1$	-
$-3.1 < \log q/T < -2.8$	2
$-2.8 < \log q/T < -2.5$	1
$-2.5 < \log q/T < -2.2$	-
$\log q/T > -2.2$	-
Incondicionalmente estable	1
<b>Total PRM</b>	<b>6</b>

Cada PRM registrado corresponde al número de eventos registrados por categoría del mapa de susceptibilidad.

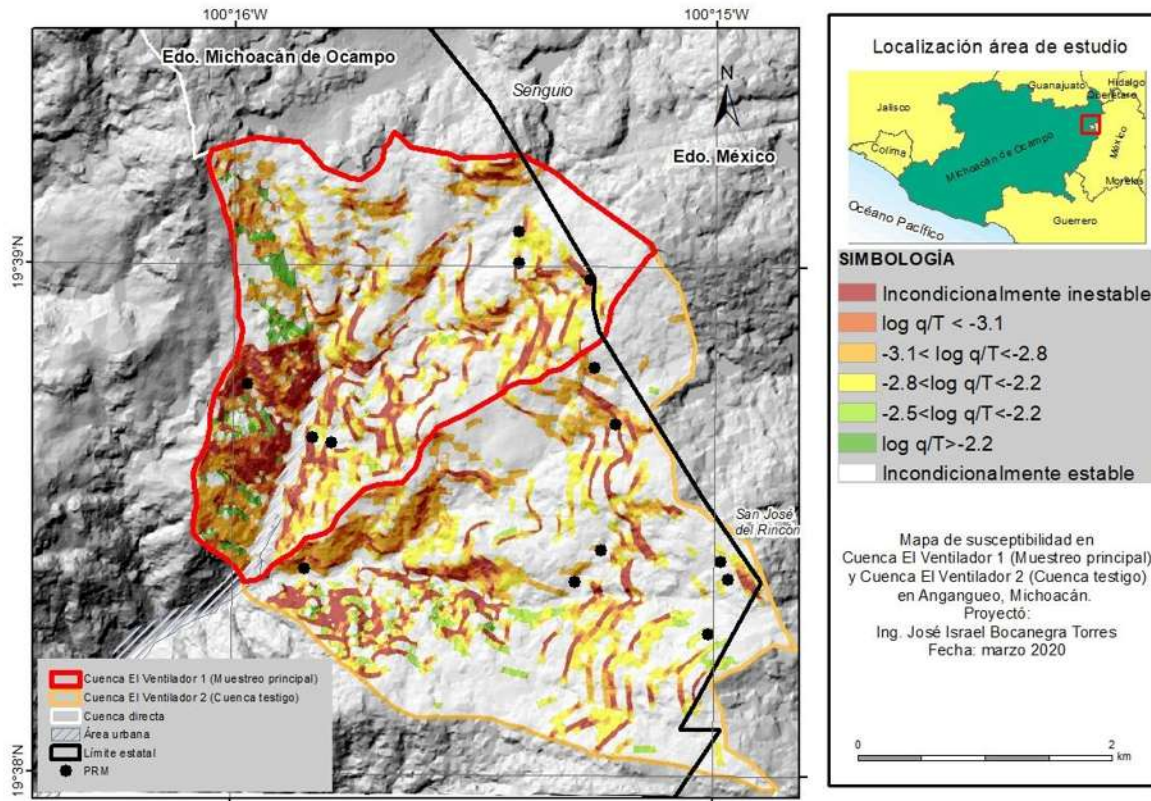


Figura 38.- Inventario de deslizamientos sobrepuesto sobre mapa de susceptibilidad.

### 8.1.1 Comparación con modelo elaborado anteriormente

Se comparó el mapa generado por De la Luz (2011).

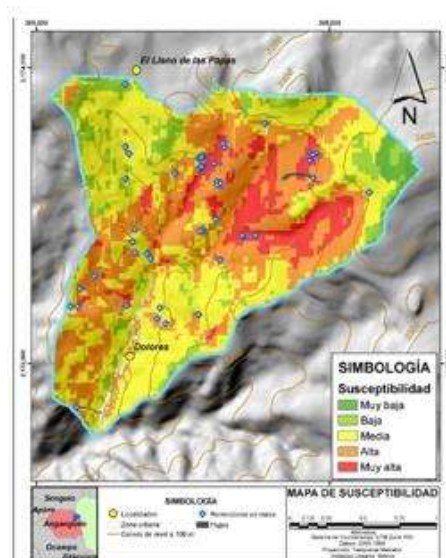


Figura 39.- Mapa de susceptibilidad De la Luz (2011).

De la Luz (2011), distinguió cinco clases (muy baja, baja, media, alta y muy alta), de las cuales las categorías muy alta, alta y media, corresponden a zonas similares encontradas en este trabajo.

Resalta que algunas zonas con la categoría incondicionalmente estables del mapa de este proyecto, caen en categorías de susceptibilidad medias en el trabajo de, De la Luz (2011), lo que hace suponer que su resultado podría estar sobreestimado. Esto se puede deber a que las propiedades mecánicas de los suelos encontrados en dicha cuenca no fueron calculadas en laboratorio y utilizó parámetros del suelo preestablecidos en SINMAP.

### 8.1.2 Validación del mapa empleando la curva ROC

El archivo generado se analizó en el software estadístico IBM SPSS Statistics 2.0 y aplicando la herramienta de curva ROC donde las variables de contraste fueron valores de probabilidad de los verdaderos positivos y como variable de estado el valor los valores de los negativos verdaderos (Figura 40).

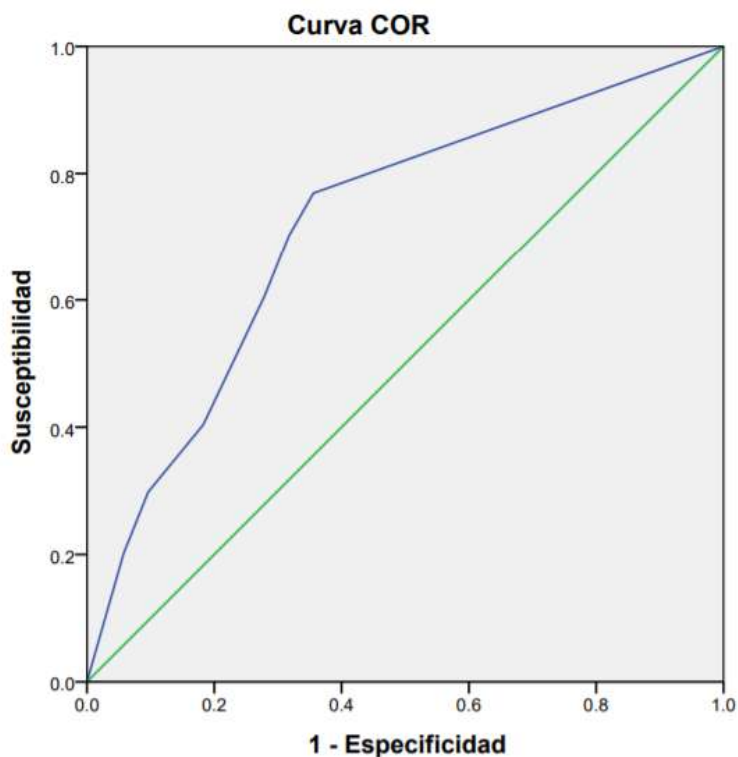


Figura 40.- Curva ROC

Los resultados de la evaluación del rendimiento global de los modelos con el método de la curva ROC fueron: área bajo la curva (AUC) 0.718 con un error estándar estimado de 0.36.

La sensibilidad (fracción verdadera positiva) es la relación entre los datos de presencia de PRM clasificados y todos los datos de presencia de PRM reales y especificidad (fracción

verdadera negativa) es la relación entre las celdas correctamente clasificadas sin PRM y todas las celdas sin PRM reales (Torres Ruiz, 2017) quedan demarcadas en la tabla 26.

Tabla 26.- Variables resultado de contraste: p

Positivo si es mayor o igual que	Sensibilidad	1 - Especificidad
-1.00	1.000	1.000
0.08	0.769	0.356
0.25	0.702	0.317
0.42	0.606	0.279
0.58	0.404	0.183
0.75	0.298	0.096
0.92	0.202	0.058
2.00	0.000	0.000

El resultado del área bajo la curva se considera aceptable debido a que está por encima de 0.5.

## Capítulo 9. Conclusiones

El mapa de inventario de procesos de remoción en masa realizado con base en los registros de Hernández (2017) y la actualización hecha en este trabajo, coincide con los grados de mayor susceptibilidad obtenidos a través de la metodología SHALSTAB.

El 83.8 % de los PRM registrados se encuentran en categorías donde existe susceptibilidad a PRM del cual, el 29.5% de los PRM se encuentran en los grados de mayor susceptibilidad (incondicionalmente inestable y  $\log q/T < -3.1$ , respectivamente). El 16.2 % de los PRM están registrados en zonas donde el modelo las considera incondicionalmente estables.

La validación del mapa de susceptibilidad resultó de 0.718 es decir, es un modelo que predice adecuadamente la susceptibilidad a los PRM.

La metodología utilizada permitió inferir el comportamiento mecánico de los suelos con características morfológicas similares.

La clasificación geotécnica de los suelos realizada en este estudio amplia el conocimiento de los factores en el estudio de los PRM en la cuenca de Anganguero.

El mapa de susceptibilidad elaborado ayuda a disminuir el riesgo futuro a PRM, es útil en la planeación territorial, y constituye información valiosa para los tomadores de decisiones.

El modelo de SHALSTAB presenta ciertas limitaciones al evaluar sólo las propiedades del suelo y morfometría de las laderas, por lo que se sugiere tomar en cuenta factores como la geología, precipitaciones, cubierta y uso de suelo, y aceleración del terreno. Así mismo, una mayor resolución en el MDE mejoraría la calidad de la información referida al relieve.

## Referencias

- Alanis G., N. (2016). *Identificación y estudio de los suelos hidrofóbicos en la microcuenca del río San Pedro en Angangueo, Michoacán*. Morelia : UMSNH.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*.
- Alcántara-Ayala, I., López-García, J., & J. Garnica, R. (2012). On the landslide event in 2010 in the monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, Mexico. *Landslides*, 263-273.
- Ayala-Carcedo, F. J., & Corominas, J. (2003). *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de la ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España*. Madrid: Ministro de ciencia y tecnología.
- Badillo, E. J. (2005). *Mecánica de suelos 1: Fundamentos de la mecánica de suelos*. México, D.F: Limusa.
- Bermúdez, M. (2012). *Caracterización geomorfológica de deslizamientos en la cuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán*. Tacámbaro, Michoacán: Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro .
- Brunsdon, D. (1973). The application of systems theory to the study of mass movement. *Geologia Applicata e Idrologologia*, 185-207.
- Carrara, A. (1983). *Multivariate models for landslide hazard evaluation*. Catena, Southern Italy.
- Carrera, A. (1983). *Multivariate models for landslide hazard evolution*. Catena: Mathematical Geology.
- Cortes V., M. O. (2013). *Propiedades edáficas y su relación con la estabilidad de la estructura de los suelos de Angangueo*. Morelia: UMSNH.
- De la Luz D'elia, A. R. (2011). *Análisis y definición de deslizamientos y sus zonas de susceptibilidad en la microcuenca El Ventilador, Angangueo, Michoacán, México*. Santiago de Querétaro, Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales.
- EPOCH, E. (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Comunity. *Flageollet*.
- Figueroa M., S. (2013). *Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en Flo-2D, caso de estudio: Angangueo, Mich*. Morelia: UMSNH.
- Galindo Serrano, J. A., & Alcántara Ayala, I. (2015). Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 122-145.

- Garduño M., E. (2014). *Identificación de eventos excepcionales, a través de análisis de anillos de crecimiento de los árboles en el margen de los ríos Catingón y San Pedro en Angangueo, Michoacán, México*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Gobierno Constitucional del Estado de Michoacan de Ocampo. (03 de 10 de 2012). Periódico Oficial. *Atlas de riesgos naturales de Angangueo, Michoacán*, págs. 1-36.
- González de Vallejo, L. I., Mercedes, F., Luis, O., & Carlos Oteo. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson educación.
- Guerra Torralbo, J. C. (2018). *Mecánica de suelos: Conceptos básicos y aplicaciones*. Madrid, España: Dextra.
- Hartlen, J., & Viberg, L. (1988). *General report: Evaluation of landslide hazard*. Rotterdam.
- Hutchinson, J. N. (1988). *General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology*. Balkema, Rotterdam, Betherlands: Proceedings of the fifth international symposium on landslides.
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Obtenido de Estado de Michoacán de Ocampo: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16005a.html>
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal d elos estados Unidos Mexocanos*. Clave geostadística 16005: INEGI.
- M. Das, B. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Sacramento: Thomson Learning.
- Mara Sbroglia, R., Machado Porath, P. H., dos Reis Higashi, R. A., & de Oliveira, F. H. (2017). Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. *XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*. Santa Catarina: ABMS.
- Miranda, S. F. (2013). *Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Angangueo, Mich.* Morelia, Michoacán: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Deartamento de Geología y Mineralogía.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). *A physically based model for the topographic control on shallow landsliding*. Seattle: Water resources research.
- Núñez Solorio, A. D. (2012). *Inventario de flojos de detritos y su relación con la hidrografía y geología en la cuenca del río Tuzantla, Mich.* Tacámbaro, Michoacán: Instituto Tecnológico de Tacámbaro.
- O'Loughlin, E. M. (1986). *Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis*. Seattle: Water Resour.
- ONNCCE. (2002). *Ensayo de Compresión Triaxial, Método de Prueba*. D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.

- ONNCCE. (2013). *Métodos de Muestreo*. D.F: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- ONNCCE. (2014). *Determinación de la Composición Granular*. D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- ONNCCE. (2015). *Determinación del Contenido de Agua de suelos Mediante Secado Rápido*. D.F.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- ONNCCE. (2018). *Límites de Consistencia de Suelos*. D.F.: Organismo nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnico Vol. 1*. U. Industrial de Santander.
- Torres F., L. (2014). *Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos en el municipio de Angangueo, Michoacán, mediante probabilidad condicional enfocada al SIG*. Morelia: UMSNH.
- Torres Ruiz, E. G. (2017). *Comparación de tres métodos estadísticos empleados para el análisis de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa: El caso del municipio de Los Cabos, Baja California Sur*. Morelia, Michoacán: UMSNH.
- Varnes, D. J. (1978). *Slope movements, types and processes, Landslides: Analysis and control, transportation research board*. Washington: National academy of science.

## ANEXOS

A continuación, se muestran los resultados y gráficos obtenidos de cada uno de los PCA y estratos correspondientes. La simbología

Tabla 27.- Clasificación de suelos en la zona de estudio con base al SUCS.

CLASIFICACIÓN SUELO DE LA ZONA (SUCS)	DESCRIPCIÓN
ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos
MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos
CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres
SM	Arenas limosas, mezcla de arena y limo
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla

Ésta clasificación se logró con base a los lineamientos del SUCS, los suelos correspondientes a la clasificación ML, MH y CL, fue por que más del 50% del material es producto fino (aquel material que pasa la malla No. 200 (abertura de 0.075 mm)).

Las pruebas mecánicas realizadas en este estudio tienen como fin obtener la resistencia cortante de los materiales y su permeabilidad. El SUCS, tiene una descripción previa de los materiales, (Tabla 28).

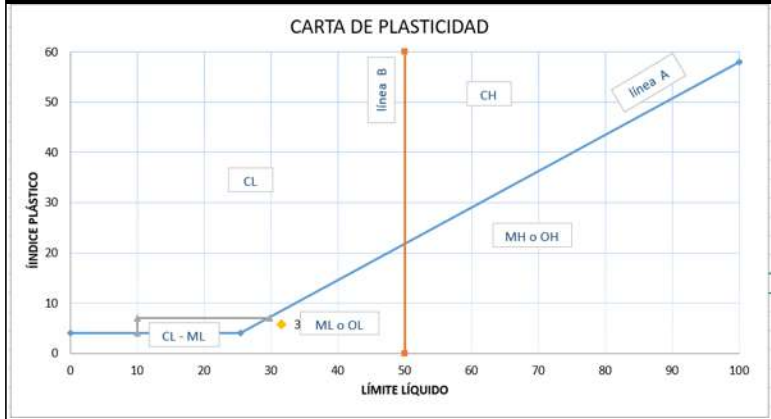
Tabla 28.- Descripción previa de los materiales

CLASIFICACIÓN SUELO DE LA ZONA (SUCS)	PROPIEDADES MÁS IMPORTANTES	
	RESISTENCIA AL CORTE	PERMEABILIDAD
ML	Regular	Semipermeable a impermeable
MH	Regular a deficiente	Semipermeable a impermeable
CL	Regular	Impermeable
SM	Buena	Semipermeable a impermeable
SC	Buena a regular	Impermeable



**ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

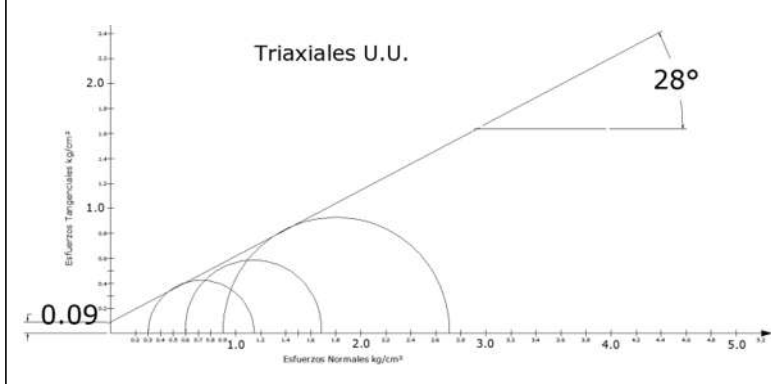
PCA #	1
EST. #	1
LL (%)	31.51
LP (%)	25.71
CLASIFICACIÓN FINOS	ML



G	46.5
S	49.3
F	4.2
CLASIFICACIÓN SUELO	SP-GP



PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.544
Wnat (%)	14.823
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.09
θ (°)	28

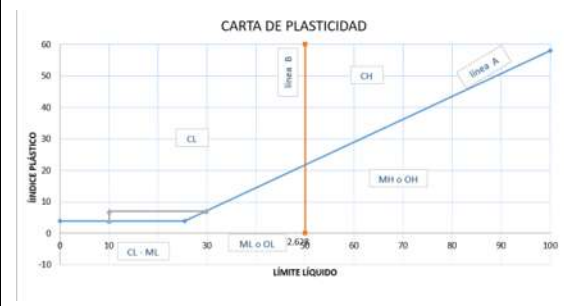
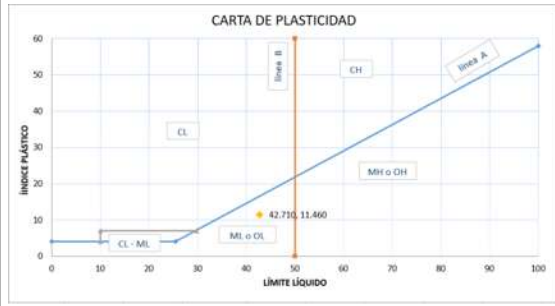


ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	3	PCA #	3
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	53.85	LL (%)	37.624
LP (%)	38.095	LP (%)	32.877
CLASIFICACIÓN FINOS	MH	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	28.7	G	44.4
S	39.7	S	35.8
F	31.6	F	19.9
CLASIFICACIÓN SUELO	SM	CLASIFICACIÓN SUELO	SC-SM
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.411	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.653
Wnat (%)	31.717	Wnat (%)	20.648
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.3	C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.21
θ (°)	28	θ (°)	34

ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	5	PCA #	5
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	48.272	LL (%)	49.58
LP (%)	38.462	LP (%)	34.454
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	10.1	G	5.2
S	29.9	S	35.6
F	59.9	F	59.1
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	ML
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.485	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.537
Wnat (%)	23.892	Wnat (%)	24.845
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.59	C (kg/cm <sup>2</sup> )	
θ (°)	33	θ (°)	

**ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

PCA #	4	PCA #	4
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	42.71	LL (%)	40
LP (%)	31.25	LP (%)	37.37
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	CL

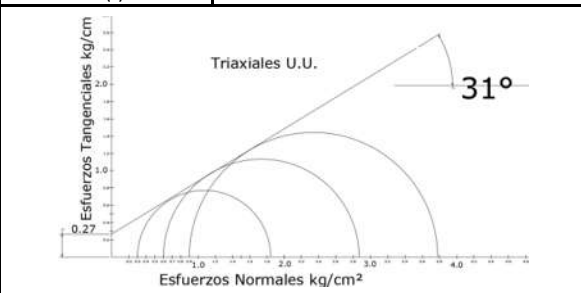
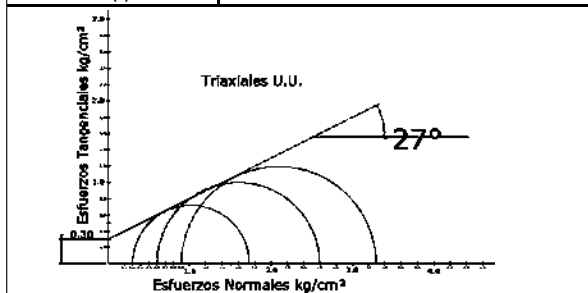


G	3.8	G	9.2
S	44.1	S	57.4
F	52.2	F	33.4

CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	SC-SM
---------------------	----	---------------------	-------



PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.354	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.637
Wnat (%)	20.096	Wnat (%)	26.909
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.3	C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.27
θ (°)	27	θ (°)	31



ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	6	PCA #	6
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	40.72	LL (%)	38.072
LP (%)	27.778	LP (%)	29.032
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	18.2	G	35.2
S	35.8	S	37.6
F	46.1	F	27.2
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	SM
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	S/M	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	S/M
Wnat (%)	17.011	Wnat (%)	16.014

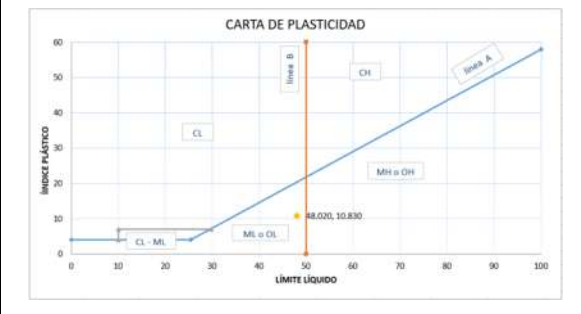
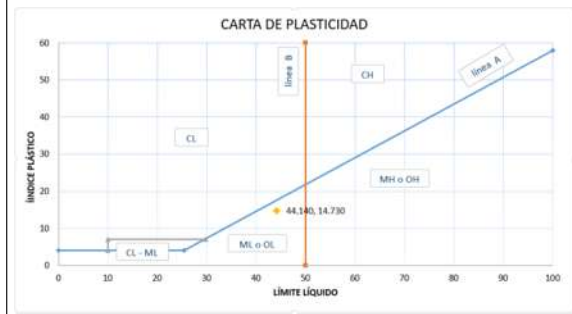
ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO	
PCA #	6
EST. #	3
LL (%)	41.042
LP (%)	28
CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	30.6
S	34.4
F	35.1
CLASIFICACIÓN SUELO	SM
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.537
Wnat (%)	19.076

ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	7	PCA #	7
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	41.94	LL (%)	37.723
LP (%)	29.07	LP (%)	28.947
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	18.9	G	8.5
S	18.2	S	18.1
F	62.9	F	73.4
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	ML
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.419	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.429
Wnat (%)	25.689	Wnat (%)	24.845

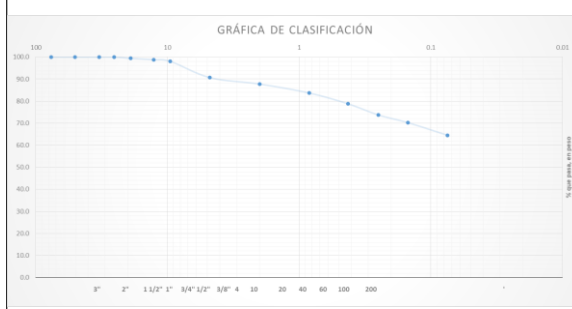
ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	7	PCA #	7
EST. #	3	EST. #	4
LL (%)	41.104	LL (%)	44.494
LP (%)	29.762	LP (%)	37.931
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	10.9	G	45.8
S	16.8	S	24.6
F	72.3	F	29.3
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	SM
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.572	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	S/M
Wnat (%)	26.904	Wnat (%)	27.652

**ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

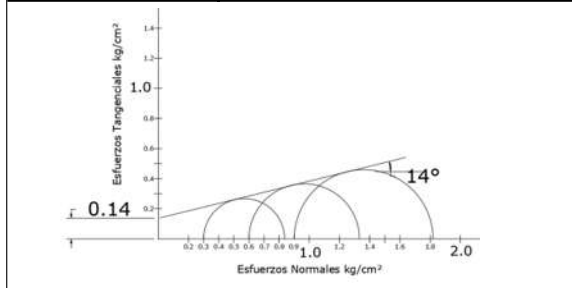
PCA #	8	PCA #	8
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	44.14	LL (%)	48.02
LP (%)	29.41	LP (%)	37.19
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML



G	9.4	G	19.2
S	26.1	S	58.6
F	64.5	F	22.2
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	SM



PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.311	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.817
Wnat (%)	28.133	Wnat (%)	22.33
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.14	C (kg/cm <sup>2</sup> )	
θ (°)	14	θ (°)	

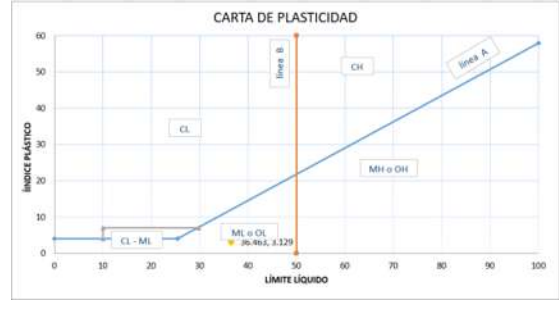
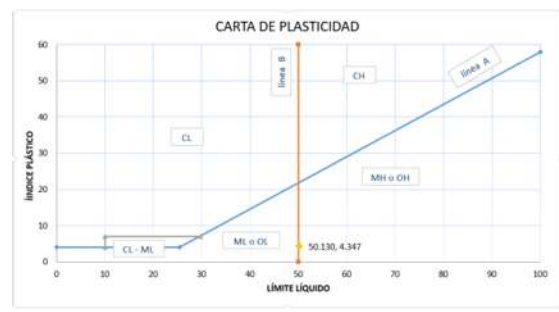


ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO	
PCA #	9
EST. #	1
LL (%)	47.27
LP (%)	34.711
CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	37
S	33.4
F	29.6
CLASIFICACIÓN SUELO	SM
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.971
Wnat (%)	16.475

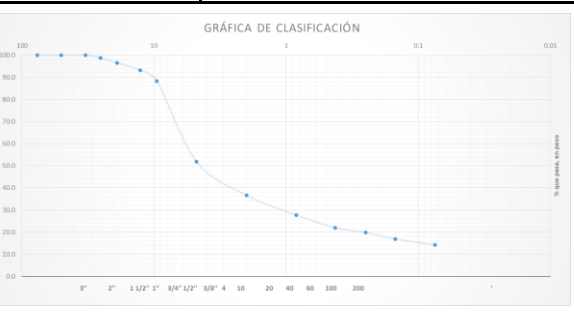
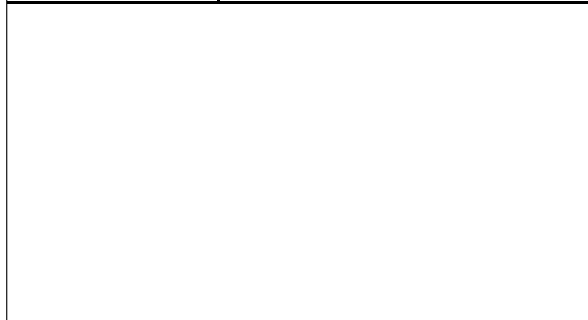
ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	10	PCA #	10
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	72.41	LL (%)	46.784
LP (%)	53.571	LP (%)	37.288
CLASIFICACIÓN FINOS	MH	CLASIFICACIÓN FINOS	ML
G	46.5	G	1
S	49.3	S	22.3
F	4.2	F	76.7
CLASIFICACIÓN SUELO	SP	CLASIFICACIÓN SUELO	ML
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.044	PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	1.691
Wnat (%)	36.799	Wnat (%)	32.586
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.31	C (kg/cm <sup>2</sup> )	
θ (°)	19	θ (°)	

**ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO**

PCA #	11	PCA #	11
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	50.13	LL (%)	36.463
LP (%)	45.78	LP (%)	33.333
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	ML

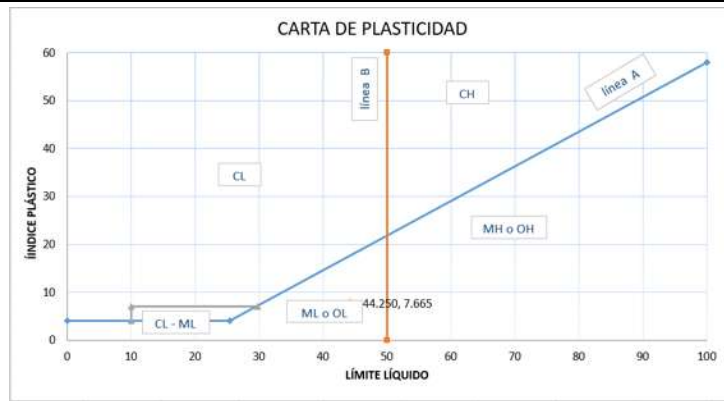


G		G	48.1
S		S	37.6
F		F	14.3
CLASIFICACIÓN SUELO		CLASIFICACIÓN SUELO	GM



ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO			
PCA #	12	PCA #	12
EST. #	1	EST. #	2
LL (%)	39.338	LL (%)	54.62
LP (%)	27.16	LP (%)	36.634
CLASIFICACIÓN FINOS	ML	CLASIFICACIÓN FINOS	MH
G	29.7	G	13.6
S	19.7	S	41
F	50.5	F	45.5
CLASIFICACIÓN SUELO	ML	CLASIFICACIÓN SUELO	
PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )		PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	
Wnat (%)		Wnat (%)	
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.09	C (kg/cm <sup>2</sup> )	
θ (°)	31	θ (°)	

ANEXO DE RESULTADOS DE LABORATORIO	
PCA #	1
EST. #	1
LL (%)	44.25
LP (%)	36.585
CLASIFICACIÓN FINOS	ML



G	20.9
S	18.2
F	60.9
CLASIFICACIÓN SUELO	ML



PVHL (gr/cm <sup>3</sup> )	
Wnat (%)	
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.13
$\theta$ (°)	30

