



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**



---

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CARACTERIZACIÓN DEL DESLIZAMIENTO DEL CERRO  
GUADALUPE (ANGANGUEO) Y SU RELACIÓN CON LA  
PRECIPITACIÓN ATÍPICA DEL 2010**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**CON ESPECIALIDAD EN:**

**GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

**PRESENTA**

**ING. PABLO GARCÍA DÍAZ**

**ASESOR**

**DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL**

Morelia, Michoacán, Abril 2022.



## Agradecimientos

---

En primer lugar, le agradezco a **Dios** por darme licencia de concluir esta etapa en mi vida, brindándome la salud y bienestar para lograrlo.

A **CONACYT** por el apoyo económico otorgado durante mi estancia en la maestría realizando el presente trabajo de investigación.

A **mi familia**, mis padres J. Margarito García Calderón y M. Luisa Díaz Vásquez. Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado con cariño y comprensión; aconsejándome y siendo mi modelo a seguir, ya que son los formadores de la persona que soy hoy. A mi hermana M. Daniela García Díaz, por su apoyo incondicional. Y toda mi familia por estar a mi lado apoyándome.

A **mis compañeros** y amigos por brindarme sus consejos, su apoyo moral y experiencias. (Ariosto, Ernesto, Israel, Omar, Ángel, Lucy, Lolita, Marlene, Gaby, Sonia)

A **mis profesores**. El Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, Dr. Pedro Corona Chávez, la Dra. Erna Martha López Granados, el Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, la Dra. María Lourdes González Arqueros, la Dra. Martha Gabriela Gómez Vasconcelos y el Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera.

A **mi asesor**, el **Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal**, por su guía, apoyo, paciencia y comprensión, tanto en el ámbito, profesional, académico y personal. Muchas gracias!

A **la institución**, que me han brindado la formación académica necesaria para realizar este proyecto de investigación, particularmente la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

La Facultad de Ingeniería civil, en particular al **Laboratorio de Materiales en la sección de Mecánica de Suelos**, por brindarme su espacio y equipo para realizar las pruebas del presente trabajo.

A el Dr. Carlos Chávez Negrete, por brindarme su apoyo y conocimiento y su asesoría en parte de la presente investigación por lo cual se lo agradezco mucho.

A la Dr. Elia Mercedes Alonso Guzmán, el Dr. Wilfrido Martínez Molina y Mtra. Cindy Lara Gómez, por el apoyo y la confianza que me brindaron en llevar a cabo mis estudios de maestría.

## **Dedicatoria**

---

Este trabajo está dedicado con amor, respeto y admiración a mis padres y mi hermana, que son los motores en cada etapa de mi vida, además de mis abuelos † que siempre me apoyaron para seguir mis metas al brindarme sus consejos.



## Índice de páginas

---

<b>Índice de páginas</b> .....	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Acrónimos</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Justificación. ....	3
1.2. Hipótesis .....	4
1.3. Objetivo general.....	4
1.3.1. Objetivos particulares. ....	4
<b>Capítulo 2. Marco teórico</b> .....	<b>5</b>
2.1. Definición de PRM. ....	5
2.2. Factores condicionantes .....	5
2.2.1. Hidrología e Hidrogeología .....	6
2.2.2. Vegetación .....	6
2.2.3. Clima.....	6
2.2.4. Actividad Antrópica.....	6
2.3. Factores Detonantes .....	7
2.3.1. Precipitaciones .....	7
2.4. Clasificación de PRM .....	9
2.4.1. Deslizamiento (Slide).....	10
2.4.2. Flujos.....	11



2.5. Energía potencial .....	12
2.6. Factor de Seguridad de la ladera .....	14
2.6.1. Envolvente de falla de los materiales con el criterio de Mohr-Coulomb .....	16
2.7. Umbral de precipitación.....	17
<b>Capítulo 3. Antecedentes .....</b>	<b>19</b>
3.1. Trabajos enfocados al estudio de PRM generados por precipitaciones donde utilizan las SWCC. ....	19
3.2. Estudios realizados en el municipio de Angangueo, Michoacán.....	25
<b>Capítulo 4. Área de estudio .....</b>	<b>30</b>
4.1. Localización.....	30
4.2. Clima.....	31
4.3. Uso de suelo y Vegetación.....	31
4.4. Fisiografía .....	34
4.5. Geología Regional .....	35
<b>Capítulo 5. Materiales y métodos. ....</b>	<b>37</b>
5.1. Reconocimiento de campo.....	38
5.2. Muestreo, topografía y mapas.....	38
5.2.1. Muestreo .....	38
5.2.2. Topografía y mapas temáticos. ....	39
5.3. Pruebas físico-mecánicas a los depósitos de suelo. ....	45
5.3.1. Propiedades índice de los suelos estudiados.....	45
5.3.2. Prueba de compresión triaxial.....	50
5.3.3. Determinación de la curva característica suelo-agua (SWCC).....	52
5.3.4. Medición de la permeabilidad aparente en campo.....	56



5.4. Análisis Numérico con software GeoSlope. ....	57
5.4.1. Características de Slope/W. ....	58
5.4.2. Características de Seep/W.....	59
5.4.3. Proceso en la modelación.....	60
5.4.4. Umbral de precipitación.....	63
<b>Capítulo 6. Caracterización de la ladera. ....</b>	<b>69</b>
6.1. Morfometría. ....	69
6.1.1. Altitudes.....	69
6.1.2. Pendientes .....	70
6.1.3. Orientación de la ladera .....	70
6.1.4. Características morfométricas de la ladera del Cerro Guadalupe.....	71
6.2. Geología local. ....	74
<b>Capítulo 7. Caracterización del deslizamiento.....</b>	<b>83</b>
7.1. Tipos de Inestabilidad.....	83
7.1.1. Tipología.....	83
7.1.2. Morfología y morfometría .....	83
7.2. Caracterización del deslizamiento .....	87
7.2.1. Energía Cinética del PRM .....	87
7.3. Modelización numérica.....	89
7.3.1. Propiedades Físico-Mecánicas.....	89
7.3.2. Resultados de las pruebas Físico-Mecánicas .....	89
7.4. Implementación del modelo.....	101
7.4.1. Infiltración (Seep/W) .....	101
7.4.2. Estabilidad (Slope/W).....	111



7.4.3. Resultados de los análisis con el umbral de precipitación.....	119
<b>Capítulo 8. Análisis y discusión de resultados.....</b>	<b>123</b>
8.1. Modelación numérica.....	125
8.2. Recomendaciones para trabajos Futuros.....	126
<b>Capítulo 9. Conclusiones .....</b>	<b>127</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>129</b>
<b>Apéndice.....</b>	<b>138</b>
1.-Factores que afectan la obtención de la SWCC.....	139
1.1. El tipo de suelo.....	139
1.2. La energía de compactación.....	140
1.3. El contenido de agua inicial de las muestras .....	141
1.4. La técnica de saturación del espécimen a probar.....	141
1.5. El Fenómeno de Histéresis.....	142
2. Ejemplo de cómo se llevó a cabo la prueba para obtener la SWCC.....	143
2.2. Resultados de la prueba para obtener la SWCC (Curva característica suelo-agua) .....	149
<b>Anexos.....</b>	<b>150</b>





## Índice de figuras

---

Figura 1. Esquema para identificar las partes de un deslizamiento rotacional en partes. ....	10
Figura 2. Representación esquemática de un deslizamiento rotacional, observando el desplazamiento que sufre la masa inestabilizada sobre la superficie de rotura. ....	11
Figura 3. Representación esquemática de un deslizamiento traslacional, donde se observa el desplazamiento que sufre la masa inestabilizada a través de la superficie de rotura. ....	11
Figura 4. Flujo según el tipo de movimiento de ladera. ....	12
Figura 5. Diagrama Esfuerzo-Deformación hipotético para movimiento de ladera. ....	13
Figura 6. Imagen sobre umbrales de lluvia con modelos de TRIGRS y Papa <i>et al.</i> (2013). ....	17
Figura 7. Ubicación del campo de estudio en la comunidad de <i>Åmot</i> , condado de <i>Modum</i> . ....	20
Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología conceptual propuesta en la evaluación de susceptibilidad de PRM en eventos de lluvia extrema. ....	21
Figura 9. Deslizamientos de tierra en Umyeonsan (monte) bajo fuertes lluvias (307mm/24h) en 2011, vista general de los deslizamientos en el área de la cuenca hidrográfica de Raemain y cuenca de Dukwoam. ....	22
Figura 10. Diagrama esquemático del modelo YS-Slope. (a) Plano de deslizamiento infinito para análisis de estabilidad de taludes, (b) perfil de suelo y concepto de modelo hidrológico. ....	22
Figura 11. Vistas panorámicas del sitio de monitoreo de deslizamientos de tierra después de la construcción de las barreras de escombros. ....	23
Figura 12. Distribución de las coberturas del suelo a escala regional 2012. ....	25
Figura 13. Deslizamiento-flujo de detritos en el Cerro Guadalupe y afectación en las viviendas del mismo. ....	26
Figura 14. Distribución espacial de los flujos de escombros (DF) y puntos de prueba del penetrómetro dinámico (P) en Angangueo. ....	27
Figura 15. Mapa preliminar de peligro por inundación, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010. ....	28



Figura 16. Mapa de peligrosidad para el municipio de Angangueo Mich. ....	29
Figura 17. Ubicación de la zona de estudio en Angangueo, Michoacán. ....	30
Figura 18. Localización del Cerro Guadalupe en el Municipio de Angangueo, Michoacán. ....	31
Figura 19. Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona en estudio.....	32
Figura 20. Bosques de Oyamel (A); Bosque de Pinus (B); Bosque de encino (C).....	33
Figura 21. Mapa del MDE de la zona en estudio.....	35
Figura 22. Mapa geológico y perfil, Angangueo, Michoacán, México (modificado del SGM, 2010. Coordenadas en proyección UTM).....	36
Figura 23. Secuencia en cuatro etapas en las que se realizó el trabajo de investigación. ....	37
Figura 24. Vista de la ladera del Cerro Guadalupe sobre la zona del deslizamiento donde se construyó un muro de contención a base de gaviones; se puede observar aun viviendas habitadas en la zona. ....	38
Figura 25. Toma de muestras de suelo de la ladera del cerro Guadalupe.....	39
Figura 26. Medición in situ de propiedades mecánicas con penetrómetro de bolsillo y molinete de bolsillo para inspección del terreno.....	39
Figura 27. Equipo utilizado para obtener la topografía de la ladera fue realizado con el Laser Scanner RIEGL VZ-1000. ....	40
Figura 28. Características de dimensiones y controles del Scanner RIEGL VZ-1000.....	41
Figura 29. Nube de puntos del levantamiento topográfico, utilizando el programa CloudCompare... ..	41
Figura 30. Rectificación de la nube de puntos, utilizando puntos de referencia a partir de Google Earth e identificación de puntos en la nube, basado en las coordenadas UTM. ....	42
Figura 31. Clasificación de la nube de puntos utilizando el programa <i>Global Mapper 19</i> . ....	42
Figura 32. Software GlobalMapper y barra de herramientas utilizada para la clasificación de la nube de puntos... ..	43



Figura 33. Proceso de clasificación de la nube de Puntos, una vez realizando un recorte de los puntos que se localizan fuera de la zona de estudio y obtención de perfiles de la ladera.....	44
Figura 34. MDT del cerro Guadalupe en el programa GlobalMapper 19.....	45
Figura 35. Determinación de humedad natural y PVHC. ....	46
Figura 36. Determinación de la composición granulométrica de material. ....	47
Figura 37. a) Determinación del límite líquido en suelos con la copa de Casagrande y colocadas en recipientes de aluminio para determinar las diferentes humedades que presenta la muestra de suelo; b) límite plástico con los rollitos de 1mm de diámetro y colocados en las capsulas de aluminio; así como las muestras de CL y CV.....	48
Figura 38. Proceso de prueba de consolidación unidimensional. ....	50
Figura 39. Prueba para determinación de densidad de sólidos (Ss).....	50
Figura 40. Esquema de ensayo triaxial. ....	51
Figura 41. Proceso de la prueba de compresión Triaxial realizada a las muestras de suelo.....	52
Figura 42. Extractor de placa de presión 15 bares modelo 1500F1.....	53
Figura 43. Configuración típica del múltiple 0700CG23F1. ....	54
Figura 44. Extractor de placa de presión 5 bares modelo 1600. ....	54
Figura 45. Estación 0700G2 (a) y estación 0700G3F1 (b). ....	55
Figura 46. Plato Cerámico para presión de 1 bar y extractores modelo 1600 y 1500F1. ....	55
Figura 47. Análisis de estabilidad con Seep/W y Slope/W en GeoStudio.....	57
Figura 48. Acciones en la i-ésima rebanada según las hipótesis de Mongester y Price y representación del conjunto. ....	63
Figura 49. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis pluviométrico.....	65
Figura 50. Histograma de precipitación en la estación 16033 Chincua-Senguio del 12/01/2010 a 13/02/2010.....	65



Figura 51. Histograma de precipitación en la estación 16033 Chincua-Senguio del 2005 al 2010.....	66
Figura 52. Grafica de la precipitación en relación a los tiempos de duración del caso real de 5 días y de los modificados para 2 y 8 días. ....	68
Figura 53. Mapa de MDT que se obtuvo con la nube de puntos en el programa de ArcGis10.6.	69
Figura 54. Mapa de pendientes del Cerro Guadalupe en Angangueo, Michoacán.....	70
Figura 55. Mapa de orientaciones del cerro Guadalupe, Angangueo, Michoacán. ....	71
Figura 56. Morfometría ladera Cerro Guadalupe.....	72
Figura 57. Geomorfología de la ladera del cerro Guadalupe.....	73
Figura 58. Ubicación de puntos de control para determinar la geología y litología de la zona de estudio del cerro Guadalupe, en Angangueo Michoacán.....	74
Figura 59. Afloramiento de la roca andesita argílica sobre la base del Cerro Guadalupe en su sector sur, apreciándose al circular por la vialidad de la calle Guerrero. ....	75
Figura 60. Depósito de Andesita con una notada diferencia en su grado de alteración.....	76
Figura 61. A) Roca con poca alteración presentando color café-rojizo poco alterada con planos de fracturas (orientación 345°N/72°;40°N/78) y B) Roca dacita color amarillento alterada hidrotermalmente y con fracturación de forma enrejada. ....	76
Figura 62. Depósito de dacita muy alterada y fracturación mecánica esferoidal. ....	77
Figura 63. Afloramiento de dacita argílica alterada hidrotermalmente muy fracturada y en contacto con la unidad de andesitas. ....	77
Figura 64. Depósito coluvial sobre la coordenada X=365093m, Y=2170476m y Z=2769 msnm, de un espesor superior a los 6 m, presentando clastos de composición andesítica de forma angulosa con tamaños de 0.10 m a 0.90 m inmersos en una matriz de suelo arenoso de color café. ....	78
Figura 65. a) Afloramiento donde se aprecia el depósito de andesita y en la parte baja del mismo un depósito coluvial antiguo; b) Depósito de material coluvial movilizado en el deslizamiento del 2010.....	78



Figura 66. Se presenta un depósito coluvial, un depósito de caída de lapilli; lo cuales fueron los materiales que se movilizaron sobre la superficie de la roca dacita alterada hidrotermalmente durante el deslizamiento del 2010.....	79
Figura 67. Perfil estratigráfico sobre la zona del deslizamiento en la ladera SE del Cerro Guadalupe.....	80
Figura 68. Mapa Litológico del cerro Guadalupe, en Angangueo Michoacán.....	81
Figura 69. Perfil litológico obtenido con los datos recabados en las visitas a campo. ....	82
Figura 70. Corte esquemático típico de un flujo de detritos. ....	83
Figura 71. Mapa de la morfología del deslizamiento sobre la ladera del Cerro Guadalupe.....	85
Figura 72. Imagen de la ladera en que visualizamos su morfología.....	86
Figura 73. Perfil morfométrico del deslizamiento de la ladera en estudio. ....	86
Figura 74. Curva del esfuerzo de Preconsolidación del depósito coluvial, en el que se aprecia un esfuerzo de preconsolidación de $0.85 \text{ kg/cm}^2$ , que se determina gráficamente.....	91
Figura 75. Círculos de Mohr para el depósito coluvial, obtenidos a partir del resultado de la prueba triaxial no consolidada no drenada (UU).....	91
Figura 76. Curva característica suelo-agua de los depósitos de suelos coluvial y de caída.....	94
Figura 77. Zonas en la SWCC y valores característicos.....	95
Figura 78. Familia de curvas de secado para suelos plásticos. ....	96
Figura 79. Comparación de los puntos obtenidos en las pruebas de laboratorio y curvas interpoladas de los mismos para los depósitos de suelo coluvial y de caída, sobre la familia de curvas de secado para suelos.....	97
Figura 80. SWCC del depósito coluvial utilizando la predicción basada en los métodos de Perera et al. 2005 y Huston et al. 2006. ....	98
Figura 81. SWCC del depósito de caída utilizando la predicción basada en los métodos de Perera et al. 2005 y Huston et al. 2006.....	98



Figura 82. Comparación de las SWCC con los datos obtenidos en laboratorio y la predicción basada en el punto de 300kPa obtenida por medio de los métodos de Perera <i>et al.</i> 2005 y Huston <i>et al.</i> 2006.....	100
Figura 83. Exportando el perfil de la zona de desprendimiento del PRM que se generó en el programa de Global Mapper al programa de AutoCAD 2018 para modificarlo a sus condiciones previas al deslizamiento.....	101
Figura 84. Perfil modificado a las condiciones previas al deslizamiento del 2010, dentro del programa de GeoStudio 2018 R2.....	101
Figura 85. Definir materiales en el programa de GeoStudio 2018 2R en el módulo de Seep/W.....	102
Figura 86. Los datos de la SWCC se definieron en la pestaña de Fn. Contenido Vol. de Agua al agregarla y calcular su función de conductividad hidráulica en relación de los datos de la SWCC de cada material en su estimación, requiriendo en este apartado la permeabilidad ( $k_{sat}$ ) por lo que se utilizó la obtenida en campo con el infiltrómetro de membrana. ....	102
Figura 87. Condiciones límite para el modelo. ....	103
Figura 88. Función para la precipitación durante el evento del 2010 en Angangueo, Michoacán.....	103
Figura 89. Modelo final del perfil de suelo con las condiciones a considerar para su análisis de flujo por precipitación en Seep/W del programa GeoStudio 2018 R2. ....	104
Figura 90. Comportamiento del flujo por la lluvia sobre el modelo en Seep/W, durante los 5 días de precipitación.....	106
Figura 91. Comportamiento del flujo y de la presión de poro (PWP) sobre el modelo utilizando una precipitación de 2 días en Seep/W. ....	108
Figura 92. Comportamiento del flujo y la presión de poro (PWP) sobre el modelo utilizando una precipitación de 8 días en Seep/W .....	109
Figura 93. Comportamiento que presentaron los análisis de la Precipitación sobre el tiempo de cada umbral analizado.....	110



Figura 94. Comportamiento de la presión de poro en relación con los tiempos utilizados en el análisis.....	111
Figura 95. Definición de materiales dentro del análisis en Slope/w.....	112
Figura 96. Modelo con las condiciones para su análisis de estabilidad en Slope/W del programa GeoStudio 2018 R2.....	113
Figura 97. Resultados del FS para el modelo en Slope/w, durante los 5 días de precipitación.	114
Figura 98. Análisis del FS durante los 5 días de precipitación Slope/W.....	115
Figura 99. Resultados del FS para el modelo en Slope/w, durante los 2 días de precipitación.	116
Figura 100. Valores obtenidos de FS para la precipitación de 2 días.....	117
Figura 101. Resultados del análisis del FS para el modelo en Slope/w, durante 8 días de precipitación.....	118
Figura 102. FS por el modelo para 8 días de precipitación.....	119
Figura 103. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 2 días.....	121
Figura 104. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 5 días.....	121
Figura 105. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 8 días.....	122
Figura 106. a) Depósito de roca dacita argílica (regolito); b) suelo que se movilizó sobre el depósito de roca dacita argílica en la parte inferior (depósito de caída). ....	123
Figura 107. Curva característica suelo-agua para tres tipos de suelo diferentes.....	139
Figura 108. Efecto de la energía de compactación en la curva característica (Miller, et al., 2002). Suelo CH.....	140



Figura 109.Compactación y curvas características (Sugii, <i>et al.</i> , 2003).....	141
Figura 110.Efecto del contenido de agua de compactación en la curva característica (Miller, <i>et al.</i> , 2002).....	141
Figura 111.Efecto de la técnica de saturación en la determinación de la curva característica.....	142
Figura 112.Fenómeno de histéresis en suelos en procesos de secado y humedecimiento.....	142
Figura 113.Equipo y material utilizado en la prueba para determinar la SWCC en laboratorio.....	144
Figura 114.Proceso de remoldeo para obtener las muestras que se utilizaran en la prueba.....	144
Figura 115.Proceso de obtención de las muestras de suelo en los anillos.....	145
Figura 116.Proceso de saturación de los platos cerámicos durante 8 a 24 horas.....	145
Figura 117.Proceso para la colocación de las muestras de prueba sobre los platos cerámicos, utilizando un papel filtro; y colocación de las muestras sobre estos. ....	145
Figura 118.Formas de saturar las muestras: a).-Dentro del extractor y b).-En bandejas de aluminio.....	146
Figura 119.Colocación de la tapa del extractor y colocación de los tornillos para mantener la presión de aire.....	146
Figura 120.Compresor SOILMOISTURE para 20 bares de presión.....	147
Figura 121.Configuración del colector con sus estaciones (extractor 1600 y 1500F1) ya en funcionamiento. ....	147





Figura 122. Expulsión de la humedad en los especímenes de suelo aplicando una presión de 3 bar.....	148
Figura 123. Se retiran las muestras una vez deja de extraer agua (cuando se mantenga en equilibrio).....	148
Figura 124. Determinación del peso húmedo de las muestras de suelo.....	149
Figura 125. Determinación del peso seco de las muestras de suelo.....	149
Figura 126. Grafica de la composición granulométrica para los depósitos de suelo.....	151
Figura 127. Carta de plasticidad para clasificar los suelos finos que se utilizó en la clasificación de la fracción fina para los depósitos de suelo estudiados.....	152
Figura 128. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito coluvial, y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ).....	152
Figura 129. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito de caída, y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ).....	153
Figura 130. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito de roca dacita argílica (regolito), y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ). ....	153



## Índice de tablas

---

Tabla 1.	Efectos de la saturación por precipitaciones. Fuente: Prieto C. (1985).....	8
Tabla 2.	Clasificación de remociones en masa. Fuente: Varnes (1978).....	9
Tabla 3.	Umbral de precipitación para desencadenamiento de movimientos de laderas. Fuente: Cuanalo (2006).....	18
Tabla 4.	Clasificación mediante el sistema SUCS. Fuente: Juárez Badillo (1980).....	49
Tabla 5.	Parámetros de Van Genuchten. Fuente: Manual Mini Disk Infiltrómetro (2018) y López Alegría; 2020. ....	57
Tabla 6.	Métodos de análisis de estabilidad. Fuente: Suarez (2009).....	59
Tabla 7.	Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Fuente: Red de estaciones climatológicas CONAGUA, (2018).....	64
Tabla 8.	Registro de la lluvia de febrero de 2010 por el pluviógrafo “Chincua-Senguio”, para los días del uno al cinco. Fuente: Estación 16033 Chincua-Senguio. ....	65
Tabla 9.	Datos utilizados en el análisis de la distribución de precipitación para 2, 5 y 8 días.	67
Tabla 10.	Datos morfométricos de la ladera del cerro Guadalupe, Angangueo, Michoacán. ....	72
Tabla 11.	Parámetros morfométricos del deslizamiento en el Cerro Guadalupe del 2010.....	87
Tabla 12.	Propiedades físicas de los materiales involucrados en el PRM.....	90
Tabla 13.	Parámetros de resistencia generados a partir de la prueba triaxial (UU).....	92
Tabla 14.	Valores representativos del ángulo de fricción interna $\phi$ . Fuente: Bowles, Joseph E. (1988).....	93
Tabla 15.	Resultados de pruebas para la SWCC de los depósitos coluvial y de caída.....	93
Tabla 16.	Valores obtenidos en la predicción de la SWCC al aplicar la ecuación de Fredlund y Xing (1994), con los parámetros obtenidos según la metodología de Huston <i>et al.</i> (2006), modificada de Perera <i>et al.</i> (2005). Para el depósito coluvial y de caída. ....	99
Tabla 17.	Resultados de las pruebas en laboratorio de mecánica de suelos. ....	100



Tabla 18. Resultados de pruebas de laboratorio utilizadas en la modelación numérica.....	104
Tabla 19. Resultados de la modelación en Slope/w mostrando los valores donde ocurre la inestabilidad de los depósitos de suelo a causa de las precipitaciones consideradas.....	120
Tabla 20. Resultados de los análisis sobre el comportamiento que va teniendo el FS en relación al caudal precipitado en los umbrales de precipitación utilizados.....	120
Tabla 21. Clasificación de rocas (características y propiedades). (La geología en la mecánica de rocas, División de Educación continua, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1984). .....	138
Tabla 22. Mediciones de resistencia aparente del suelo en campo utilizando molinete de Bolsillo.....	138
Tabla 23. Remoldeo de las muestras de suelo para el depósito coluvial.....	143
Tabla 24. Resultados obtenidos de los porcentajes de suelo retenidos en las mallas a la hora de determinar la composición granulométrica de los suelos analizados. ....	150
Tabla 25. Resultados de las pruebas para obtener los límites de consistencia de los suelos así como sus contracciones lineal y volumétrica.....	151
Tabla 26. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 1 bar en muestras del depósito coluvial.....	154
Tabla 27. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 3 bar en muestras del depósito coluvial.....	154
Tabla 28. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 5 bar en muestras del depósito coluvial.....	155
Tabla 29. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 15 bar en muestras del depósito coluvial.....	156
Tabla 30. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 1 bar en muestras del depósito de caída.....	157
Tabla 31. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 3 bar en muestras del depósito de caída.....	157



Tabla 32. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 5 bar en muestras del depósito de caída..... 158

Tabla 33. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 15 bar en muestras del depósito de caída..... 159



## Acrónimos

---

<b>2D</b>	Bidimensional o Dos dimensiones
<b>3D</b>	Tridimensional o Tres Dimensiones
<b>AASHTO</b>	Asociación Estadounidense de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte
<b>BSM</b>	Barrio Sustentable Monarca
<b>CENAPRED</b>	Centro Nacional de Prevención de Desastres
<b>CONABIO</b>	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
<b>CONACYT</b>	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>CRED</b>	Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres
<b>FLO-2D.</b>	2-Dimensional Flood Routing Model
<b>FS</b>	Factor de Seguridad
<b>GNSS</b>	Sistema Global de Navegación por Satélite
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>hp</b>	Altura de precipitación
<b>INAFED</b>	Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal
<b>INEGI</b>	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
<b>INICIT</b>	Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
<b>Ip</b>	Índice Plástico
<b>IUSS</b>	Unión Internacional de Ciencia del Suelo
<b>LiDAR</b>	Detección por Luz y Distancia
<b>LL</b>	Límite Líquido
<b>LP</b>	Límite Plástico
<b>MDE</b>	Modelo Digital de Elevación



<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superficie
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno
<b>MEL</b>	Método de equilibrio límite
<b>MIT</b>	Instituto de Tecnología de Massachusetts
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>NF</b>	Nivel Freático
<b>PRM</b>	Procesos de Remoción en Masa
<b>SGM</b>	Servicio Geológico Mexicano
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>SMN</b>	Servicio Meteorológico Nacional
<b>SUCS</b>	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
<b>SWCC</b>	Curva característica suelo-agua
<b>TIN</b>	Red Irregular de Triángulos
<b>TLS</b>	Escáner Láser Terrestre
<b>TRB</b>	Junta de Investigación de Transporte
<b>UMSNH</b>	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
<b>UNAM</b>	Universidad Nacional Autónoma de México
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura
<b>USDA</b>	Departamento de agricultura de los Estados Unidos
<b>USGS</b>	Servicio Geológico de los Estados Unidos



## Resumen

---

Durante lluvias extraordinarias registradas los días del 1 al 5 de febrero del 2010, al oriente del estado de Michoacán, se desarrollaron cientos de deslizamientos-flujos de lodos y detritos; uno de los que más afectaron a la población, provocando el deceso de 16 personas y destrucción de 9 viviendas, fue el que se generó sobre la ladera SE del Cerro Guadalupe, ubicado en el sector NW de la mancha urbana de la ciudad de Mineral de Angangueo.

No obstante del impacto de este evento, no se había estudiado el decaimiento de la resistencia de los materiales de esta ladera por influencia de las precipitaciones atípicas, es decir, la variación del factor de seguridad (FS) con respecto al incremento de la presión de poro (PWP). Por lo que el propósito del presente trabajo, fue el analizar el efecto de la precipitación sobre la ladera del Cerro Guadalupe, a partir de la caracterización físico-mecánica de los materiales involucrados y la implementación de un modelo numérico para determinar las variaciones de presión de poro y su efecto en los FS.

De los análisis realizados, se obtuvo como resultado, que el factor detonante del deslizamiento-flujo de detritos, fue la precipitación atípica de febrero del 2010; la cual representó sobre el municipio de Angangueo el 35.8% de la precipitación media anual, generándose durante el tercer día del evento, como resultado del decaimiento del FS con un valor de 0.926, al incrementarse la PWP, produciendo la pérdida de estabilidad en los depósitos de suelo presentes en la zona.

Adicionalmente se realizó una modificación en los umbrales de precipitación en relación al tiempo, para 2 días y 8 días, pero conservando el mismo volumen de lluvia precipitado del evento, con el fin de conocer el comportamiento en tales condiciones, arrojando como resultado, el decaimiento en el FS en el análisis de 2 días que generaría un proceso de remoción en masa (PRM) durante el 1.386 día, al presentarse un FS de 0.758; mientras que para el análisis de 8 días, permitiendo que los depósitos de suelo liberen la PWP, este presentaría una condición crítica de estabilidad, al no sobre pasar la frontera del FS de 1, con un valor mínimo de 1.037 durante el 7.141 día.

Concluyéndose que en este fenómeno, concordaron los factores condicionantes en la generación de los PRM sobre la ladera, dadas las características de la zona, así como que el factor detonante, fuera la precipitación atípica que se tuvo durante el evento; por lo que se deben de tomar las



medidas necesarias, para prevenir a la población ante la amenaza latente a la que se ven expuestos, si se vuelven a presentar dichas condiciones de precipitación para un nuevo evento sobre la ladera; dado que aún, permanecen casas habitadas en la zona, por lo que deben estar prevenidas y preparadas ante el riesgo que representa la ladera en estudio.

**Palabras Clave:** Proceso de remoción en masa, precipitación atípica, factor de seguridad, factores condicionantes y detonantes, presión de poro.





## Abstract

---

During extraordinary rains recorded from February 1 to 5, 2010, in the east of the state of Michoacán, hundreds of landslides-flows of mud and debris developed; one of those that most affected the population, causing the death of 16 people and the destruction of 9 homes, was the one generated on the SE slope of Cerro Guadalupe, located in the NW sector of the urban sprawl of the city of Mineral de I hang out.

Despite the impact of this event, the decline in the resistance of the materials on this slope due to the influence of atypical rainfall had not been studied, that is, the variation of the safety factor (FS) with respect to the increase in pressure of pore (PWP). Therefore, the purpose of this work was to analyze the effect of precipitation on the slope of Cerro Guadalupe, based on the physical-mechanical characterization of the materials involved and the implementation of a numerical model to determine the pressure variations of pore and its effect on the FS.

From the analyzes carried out, it was obtained as a result that the triggering factor of the landslide-debris flow was the atypical precipitation of February 2010; which represented 35.8% of the average annual precipitation over the municipality of Angangueo, generated during the third day of the event, as a result of the decay of the SF with a value of 0.926, when the PWP increased, producing the loss of stability in the deposits. of soil present in the area.

Additionally, a modification was made in the precipitation thresholds in relation to time, for 2 days and 8 days, but keeping the same volume of precipitated rain of the event, in order to know the behavior in such conditions, throwing as a result, the decay in the SF in the 2-day analysis that would generate a mass removal process (PRM) during the 1,386th day, when a SF of 0.758 was presented; while for the 8-day analysis, allowing the soil deposits to release the PWP, it would present a critical stability condition, as it does not exceed the FS border of 1, with a minimum value of 1,037 during 7,141 days.

Concluding that in this phenomenon, the conditioning factors in the generation of the PRM on the slope agreed, given the characteristics of the area, as well as that the triggering factor was the atypical precipitation that occurred during the event; Therefore, the necessary measures must be taken to prevent the population from the latent threat to which they are exposed, if these



precipitation conditions occur again for a new event on the slope; given that there are still inhabited houses in the area, so they must be warned and prepared for the risk that the hillside under study represents.

**Keywords:** Mass removal process, atypical precipitation, safety factor, conditioning and triggering factors, pore pressure.



## Capítulo 1. Introducción

---

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM), son un fenómeno que involucra el movimiento de roca, suelo o una combinación de ambos, en diferentes proporciones, de manera descendente y bajo la acción de la gravedad. Este fenómeno se puede generar por una serie de factores, con severas consecuencias en los asentamientos humanos y en su infraestructura (Varnes, 1978; Brunsten, 1979). En la clasificación de los PRM se hace referencia usualmente al tipo de material, mecanismo de rotura, y grado de propagación del movimiento; además, se tienen en cuenta aspectos como el contenido de aire y agua en el suelo, así como magnitud y velocidad del PRM (Ladd, 1935; Sharpe, 1938; Ward, 1945; Varnes, 1958 y 1978; Hutchinson, 1968; Zaruba y Mencl, 1969; Crozier, 1973; Coates, 1977; Brunsten, 1979; Selby, 1993; Dikau et al., 1996, entre otros).

Después de los sismos e inundaciones, los PRM constituyen uno de los fenómenos que más afectan a la población, ya que una gran cantidad de personas muere alrededor del mundo a causa de estos (La CRED -2010- en Aristizábal et al., 2011).

Los PRM son favorecidos por factores condicionantes subdivididos en: (i) geológicos (estratificación, resistencias bajas de los materiales, esfuerzos preexistentes); (ii) geométricos (incremento de la pendiente por efecto de excavaciones o rellenos); (iii) uso de suelo, entre otros; y disparados por sismos o precipitaciones excepcionales que en su conjunto constituyen los factores detonantes de este fenómeno.

En el caso particular de la precipitación, ésta juega un papel importante en la estabilidad de una ladera, debido a que modifica la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales a través del incremento de la presión de poro y reducción del esfuerzo efectivo.

Esta situación es frecuente durante periodos atípicos de lluvia; como el ocurrido en febrero del 2010 en Anganguero (Mich.), donde precipitaciones acumuladas de 360 mm en tan solo 5 días, detonaron numerosos deslizamientos superficiales que evolucionaron a flujos de lodos y detritos con lamentables pérdidas humanas y cuantiosos daños materiales.



Uno de los PRM con más afectación en la población, fue el registrado en la ladera SE del Cerro Guadalupe, en el sector NW de la mancha urbana de Angangueo, y que provocó el sepultamiento de 9 viviendas y el deceso de 16 personas.

Actualmente, en zonas aledañas al depósito de este deslizamiento, se conservan viviendas bajo amenaza de posibles eventos similares al ocurrido en el 2010, sin que hasta la fecha se tenga un análisis de la influencia de la precipitación como factor detonante de **PRM**, ni el FS de seguridad de las mismas.

El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la variación de la presión de poro y su efecto en el factor de seguridad (**FS**), de la ladera NE del C. Guadalupe, bajo condiciones de saturación gradual similares a las producidas por la precipitación atípica de febrero del 2010.

El trabajo se llevó a cabo mediante el muestreo in situ de los suelos para su caracterización físico-mecánica en laboratorio, que incluyeron además de propiedades índice y propiedades mecánicas, la obtención de la Curva Característica Suelo-Agua (SWCC) e identificación de las unidades litológicas.

Los resultados de laboratorio, en conjunto con un levantamiento topográfico de detalle y registros de precipitación, permitieron alimentar un modelo numérico con el que se evaluó el impacto de las lluvias atípicas en la estabilidad de la ladera.

Los resultados en la modelación revelaron, que dadas las condiciones morfológicas como lo es su gran elevación y pendientes muy pronunciadas, aunadas a las características y propiedades físico-mecánicas que presentan los suelos, que en conjunto a la precipitación atípica durante los 5 días de febrero del 2010, fuera el detonante del deslizamiento, durante el 3<sup>er</sup> día de precipitación al decaer su FS a 0.926. Este resultado concuerda con el fallo de la ladera, y al modificar el umbral de precipitación en relación al tiempo, para observar si se presentaba alguna variación en el comportamiento, pero manteniendo el mismo volumen precipitado, con una reducción a 2 días y otro prolongándolo a 8 días, se obtuvo la falla de los materiales involucrados para el umbral de 2 días de precipitación, llegando a la pérdida de estabilidad durante el 1.386 días, presentando un valor del FS de 0.758; mientras que para el análisis en el umbral de precipitación de 8 días, se llegó a un FS crítico de 1.037, manteniéndose en un estado crítico de estabilidad los depósitos de suelo



de la ladera, pero que si se llegara a incrementar el volumen de precipitación, se podría perder la estabilidad y llegar a generarse un PRM.

Con estos resultados se concluye, que en este fenómeno concordaron los factores condicionantes así como que el factor detonante fuera la lluvia del PRM; por lo que se deben de tomar las medidas necesarias para prevenir a la población ante la amenaza latente a la que se ven expuestos, si se vuelven a presentar dichas condiciones de precipitación, dadas las características geomorfológicas que condicionan a la ladera a posibles nuevos deslizamientos.

### **1.1. Justificación.**

Una de las zonas más afectadas por PRM durante las intensas lluvias invernales de febrero del 2010, fue el municipio de Mineral de Angangueo, Michoacán de Ocampo. Un caso particular y de gran importancia, es la inestabilidad del cerro de Guadalupe localizada hacia el NW del municipio, el cual causó el sepultamiento de varias viviendas y el deceso de 16 personas.

Dadas las condiciones de potencial inestabilidad, exposición y riesgo que aún prevalecen en la zona, a pesar de la construcción del fraccionamiento “Barrio Sustentable Monarca (BSM)” (Rodríguez, 2016), en el que se reubicó a la población afectada, con el paso del tiempo todo ha vuelto a las mismas condiciones previas al desastre del 2010; es decir, la población ha regresado a sus antiguas casas ubicadas en zonas de alta peligrosidad, como por ejemplo, las faldas de la ladera del cerro Guadalupe.

Situación que nos lleva a plantear la posibilidad de que este desastre histórico se vuelva a repetir, si en algún momento se llegara a presentar una precipitación atípica que sobre sature el suelo y genere un nuevo PRM. El presente trabajo permitió conocer las condiciones físico-mecánicas de los materiales que integran el cuerpo de la ladera en el sector SE del cerro Guadalupe, e identificar el decaimiento de su resistencia, en relación a la variación de presión de poro que se genera durante lluvias de gran intensidad, llegando a vulnerar su estabilidad, realizando un modelo que nos indique de acuerdo a un umbral de precipitación, en qué punto la ladera perdería su seguridad y con ello poder determinar en qué condiciones de saturación se pudiera presentar un nuevo deslizamiento en la zona.



## 1.2. Hipótesis

Conocer el comportamiento que presentaría la ladera, al verse afectada su estabilidad por el decaimiento del factor de seguridad, debido a precipitaciones atípicas que incrementan el contenido de humedad de los depósitos de suelo involucrados; se podría analizar y evaluar, con base en las propiedades hidromecánicas del suelo, como lo es su curva característica suelo-agua (SWCC) y modelizaciones numéricas.

Este análisis permitirá establecer un umbral de precipitación, o la cantidad de lluvia máxima que permita a la ladera en estudio conservar su estabilidad.

## 1.3. Objetivo general.

El presente trabajo, se realizó con el objetivo, de evaluar el decaimiento del factor de seguridad de la ladera en el sector SE del C. Guadalupe, al considerar la saturación gradual de los depósitos presentes en la ladera por la precipitación atípica de febrero del 2010, mediante la caracterización físico-mecánica del material involucrado, con la obtención de la curva característica suelo-agua y llevando a cabo modelaciones numéricas de estos parámetros.

### 1.3.1. *Objetivos particulares.*

Los objetivos que se persiguieron en la investigación fueron los siguientes:

- Reconocer el área de estudio e identificar características morfológicas y posibles sitios de muestreo.
- Realizar la clasificación de las muestras, y determinar las propiedades índice y mecánicas mediante pruebas de laboratorio.
- Realizar un levantamiento topográfico de detalle a través del registro de nubes de puntos 3D.
- Elaborar la cartografía base: MDE, mapa y perfiles topográficos.
- Construir el mapa Geomorfológico y perfiles geológicos.
- Obtener la curva característica suelo-agua (SWCC) del material involucrado.
- Implementar un modelo numérico para cálculo de infiltración y factor de seguridad.



## Capítulo 2. Marco teórico

---

### 2.1. Definición de PRM.

Los procesos de remoción en masa, desde un punto de vista geomorfológico, se definen como fenómenos que involucran el movimiento de material formador de laderas por influencia de la gravedad, sin la asistencia de algún agente de transporte fluido (Alcántara-Ayala, 2000). O bien, son al movimiento lento o rápido ladera abajo de una masa compuesta de suelo, roca o una combinación de ambos, en diversas proporciones y generados por una serie de factores (Hauser, 1993).

Estos movimientos tienen un carácter descendente, ya que están fundamentalmente controlados por la gravedad (Cruden, 1991) y se denota como “el movimiento de una masa de suelo, roca o detritos por una ladera”. Varnes (1978) lo define como “el movimiento hacia abajo y hacia afuera de materiales formadores de ladera bajo la influencia de la gravedad”.

Después de los sismos e inundaciones, los PRM constituyen uno de los fenómenos que más afectan a la población, ya que una gran cantidad de personas mueren alrededor del mundo a causa de sus efectos (La CRED, 2010 en Aristizábal et al., 2010).

### 2.2. Factores condicionantes

Este fenómeno es favorecido por **factores condicionantes**, que corresponden a aquellas variables que favorecen las condiciones para el potencial desarrollo de un PRM. Estas variables pueden ser de origen *geomorfológico, geológico, geotécnico, de cobertura y uso de suelo*.

Los rasgos geomorfológicos que condicionan a los PRM, son principalmente la geometría de las laderas (pendiente, altura, extensión); su forma (convexa, cóncava); orientación; génesis (Popescu, 2002). Estas características influyen en la velocidad, energía y volumen de los cuerpos inestables.

Por lo que este, es el primer factor a considerar para la generación de movimientos y flujos, al presentarse dentro de este factor la topografía escarpada y los ángulos elevados en las laderas.



### **2.2.1. Hidrología e Hidrogeología**

Este factor está relacionado con la incorporación de agua en los materiales geológicos (macizos rocosos, suelos o combinación de ambos), como lo son: las redes de drenaje, la variación y la posición del nivel freático, los coeficientes de escorrentía e infiltración.

Ya que el suelo es una estructura en la cual se tienen poros, que al incorporarle agua, puede llegar a saturarlos lo que podría generar una disminución en la resistencia, dado que un suelo saturado presenta variaciones en sus rangos de cohesión, dependiendo de su composición granulométrica, y al saturarlo se disminuye su esfuerzo efectivo a causa de la generación de presiones de poros (Lambe y Whitman, 1972).

### **2.2.2. Vegetación**

La vegetación es uno de los factores menos constantes, debido a la diversa variedad de especies vegetales existentes, y que está a su vez condicionado por factores climáticos y topográficos (Prieto, 1985); pero el efecto positivo que puede producir, será el de mantener la estabilidad superficial del terreno, evitando su degradación, además de que favorece el drenaje del agua en la superficie del terreno, disminuyendo con ello la erosión hídrica (Selby, 1993).

### **2.2.3. Clima**

Los agentes que influyen en la forma del relieve, dada su acción en los procesos geomorfológicos, ya que los efectos climáticos que tienen más impacto principalmente son las precipitaciones y la temperatura.

Respecto a las precipitaciones, no solo influye el volumen, sino también su distribución e intensidad en algunas regiones, ya que la presencia de lluvias torrenciales sobre el suelo provoca la degradación y movilización de las partículas que son arrastradas por el agua.

Por otro lado, las temperaturas en cuanto más altas y extremas sean, mayor será su influencia sobre los ciclos de humedad-sequedad del suelo, es por ello, que los cambios de temperatura originarán procesos de expansión y contracción del terreno.

### **2.2.4. Actividad Antrópica**

Actualmente las actividades humanas son otro factor importante a considerar, dentro de los factores condicionantes en los PRM, ya que en varios casos, estos son primordiales en su





generación y se presentan varios ejemplos de dichas actividades como lo son: las obras de ingeniería civil (excavaciones, rellenos, sobrecargas con la construcción de obras de infraestructura, urbanización, etc.) generando cambios en la geometría de las laderas durante la ejecución de las obras. Otro ejemplo de relevancia son los cambios de uso de suelo, que en la actualidad cada vez son mayores; un ejemplo más se presenta con las labores mineras las cuales contribuyen a la generación de sismicidad inducida, y aun cuando estas no son de gran intensidad, si llegan a influir en la desestabilización por la frecuencia con la que se generan, y que a lo largo del tiempo van disminuyendo la resistencia de los materiales.

### 2.3. Factores Detonantes

Mientras que por otra parte, existen factores que aunados a los anteriores desencadenan estos movimientos, conocidos como “**factores detonantes**”, y estos representan un estímulo externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman la pendiente (Wang y Sassa, 2003 en Aristizábal, 2010), como lo son principalmente *la precipitación y los sismos*.

A estos también se les conoce como agentes desencadenantes, y dentro de los más comunes se tienen las acciones antrópicas, sismos y precipitaciones, siendo este último en el que nos enfocaremos durante el presente trabajo.

#### 2.3.1. Precipitaciones

González *et al.* (2002) destacan que las lluvias como factores detonantes de los PRM, se relacionan y dependen con su intensidad, duración y distribución. Menciona Aleotti, 2004; Kim *et al.*, 2004, que las precipitaciones cortas e intensas serían susceptibles a provocar eventos superficiales, en tanto, remociones más profundas serían provocadas por eventos distribuidos en largos periodos de tiempo.

Las precipitaciones aumentan el porcentaje de saturación de los suelos, rocas y fracturas, lo que con el paso del tiempo provoca un aumento gradual en la presión de Poro del agua ( $\mu$ ).

Se sabe que el esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) se define como, la diferencia entre el esfuerzo total menos la presión de poro ( $\sigma' = \sigma - \mu$ ), la disminución de este esfuerzo provoca un descenso en la



resistencia y con ello se genera un decremento en la estabilidad de la ladera, lo que puede provocar eventualmente un fenómeno de remoción en masa.

Además de que en precipitaciones intensas, se tiene un aumento en la escorrentía superficial y en la erosión del material sobre las laderas (Tabla 1).

Tabla 1. Efectos de la saturación por precipitaciones. Fuente: Prieto C. (1985).

Efectos asociados	Consecuencias	Inestabilidades producidas
Lluvias intensas -Infiltración-	Elevación del nivel freático	Deslizamientos (planos) de suelo sobre roca
		Deslizamientos circulares por empuje
	Carga de fisuras	Deslizamiento de taludes en suelo o en roca blanda
		Vuelco de masas rocosas
Saturación	Movilización de taludes en equilibrio estricto. Reptaciones	
	Hundimiento. Desplazamiento de bloques	
Inundación de la base del talud	Disminución de resistencia en zonas críticas	Deslizamiento por falta de resistencia
	Efectos de desembalse	Deslizamientos por tracción de pie
	Arrastres superficiales	Flujos sólidos en torrentes
Erosión de laderas	Acumulaciones en pie de conos de deyección	Deflación del cono
	Erosión interna	Hundimientos generalizados
Socavación	Eliminación de zonas resistentes	Deslizamientos progresivos desde el pie
		Vuelco de cornisas
Disolución	Creación de cavernas y túneles	Hundimientos en la cima
		Retroceso de cantiles



## 2.4. Clasificación de PRM

Existen muchas clasificaciones para los distintos tipos de eventos de remoción en masa, por mencionar algunos se tienen a Varnes (1978), Hauser (1993), Cruden y Varnes (1996), entre otros.

De la clasificación realizada por estos últimos autores (Cruden y Varnes, 1996), presentan las siguientes categorías:

- *Caídas*
- *Deslizamientos (rotacionales y traslacionales)*
- *Flujos*
- *Volcamientos*
- *Extensiones laterales*

Las clasificaciones consideran diversos factores, como lo es el material geológico (rocas o suelo) involucrado, el grado de saturación que puede tener y el mecanismo de ruptura que los genere.

Para tener definidos los tipos de remoción en masa, Varnes (1978) realizó su primer clasificación considerando al tipo de movimiento y material involucrado (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de remociones en masa. Fuente: Varnes (1978).

Tipo de movimiento		Tipo de material		
		Roca	Suelo	
Caída				
Toppling				
Deslizamiento	Rotacional			
	Traslacional			
Extensiones laterales			Grano grueso (detritos, <80% partículas <2mm)	Grano fino (barro, >80% partículas <2mm)
Flujos				
Complejos				

En el desastre de Anganguero del 2010, las principales modalidades en que se desarrollaron los PRM, fueron en forma de Deslizamientos y Flujos de lodos y detritos; relacionados en los trabajos referentes al evento, como ejemplo el mapa inventario de deslizamientos realizado por Hernández (2010), basado en recorridos en campo en los días inmediatos a la ocurrencia del

evento; así como el estudio del peligro de flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas realizado por Figueroa (2013), por lo que nos enfocamos en estos.

### 2.4.1. Deslizamiento (Slide)

Es el movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca a través de una superficie de rotura (Varnes, 1978; Hutchinson, 1988). Estos movimientos pueden ser rotacionales o traslacionales y tienen elementos característicos como lo son, la presencia de superficies de rotura definidas y la preservación a grandes rasgos de la forma de la masa desplazada (Corominas y García, 1997).

Según Varnes (1978), entre las partes de un deslizamiento es posible identificar la corona, el escarpe principal, el escarpe secundario, la zona superior, flancos, la masa desplazada, la superficie de rotura, el pie de la superficie de ruptura, grietas y pie (Figura 1).

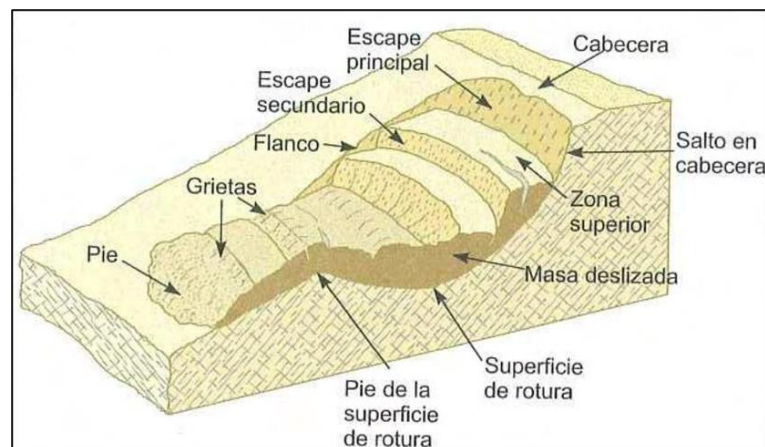


Figura 1. Esquema para identificar las partes de un deslizamiento rotacional en partes.

Fuente: Varnes (1978) en Gonzales *et al.* (2002).

Se clasifica según la superficie de ruptura, condicionada directamente por el tipo de material involucrado en el movimiento. Se tienen los deslizamientos rotacionales (*rotational slides*), en el que la rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava y el terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizante (Figura 2).

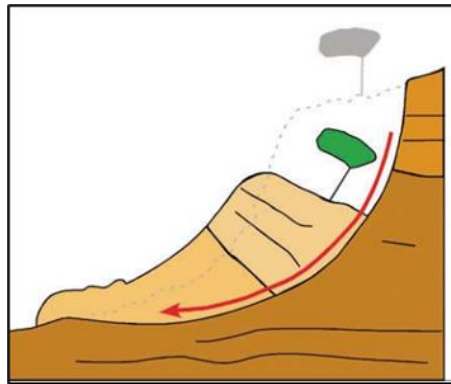


Figura 2. Representación esquemática de un deslizamiento rotacional, observando el desplazamiento que sufre la masa inestabilizada sobre la superficie de rotura.

Fuente: GSC en Masquef (2009).

Y los deslizamientos traslacionales (*translational slides*), que se presentan sobre una superficie de rotura plana u ondulada y la masa desplazada puede seguir su movimiento por la ladera (Figura 3); los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas de la misma (Corominas y García, 1997).

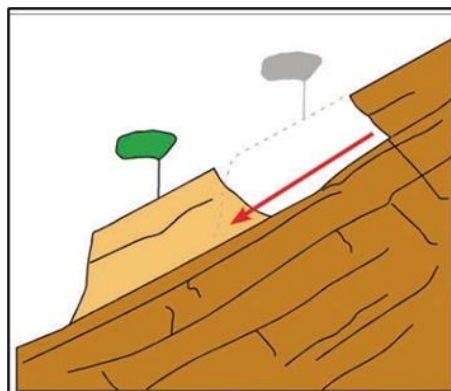


Figura 3. Representación esquemática de un deslizamiento traslacional, donde se observa el desplazamiento que sufre la masa inestabilizada a través de la superficie de rotura.

Fuente: GSC en (Masquef, 2009).

#### 2.4.2. Flujos

Los flujos corresponden a movimientos espacialmente continuos, en los que no se identifican superficies de rotura y las masas se deforman fuertemente de manera interna, por lo que se pueden comparar con un líquido viscoso (Varnes, 1978). Es por esta razón, que la distribución de

velocidades no es homogénea, y dependerá de la cantidad de agua que pueda llegar a presentar una reología plástico a visco plástico (Pierson y Costa, 1987).

Debido a que los flujos envuelven a todo tipo de materiales y se clasifican en base al contenido de estos, se dividen como flujos de rocas (rock flows), flujos o corrientes de derrubios (*debris flows*) y flujos de suelo (*soil flows*) (Figura 4).

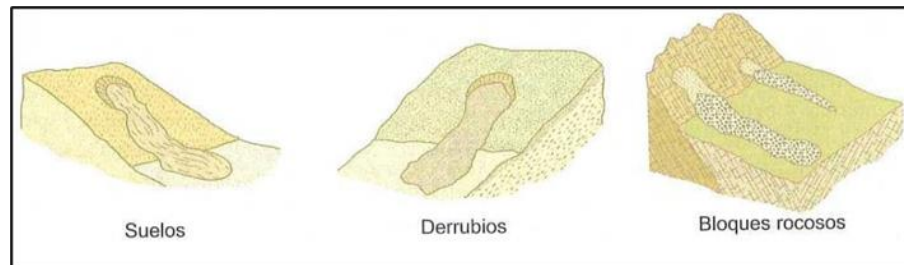


Figura 4. Flujo según el tipo de movimiento de ladera.

Fuente: Gonzales *et al.* (2002).

## 2.5. Energía potencial

Los PRM presentan una energía potencial en función de la pendiente y geometría de la ladera (Leroueil *et al.*, 1996), referente a la energía mecánica asociada a la localización de un cuerpo dentro de un campo de fuerzas externo o interno, que puede ser transformada inmediatamente en otras formas de energía, como por ejemplo, la energía cinética.

Además, se tiene la energía de fricción dado el movimiento del material sobre la superficie de deslizamiento. La cantidad de esta energía depende del comportamiento esfuerzo-desplazamiento, donde para materiales dúctiles o elasto-plásticos, toda la energía potencial es disipada como energía por fricción, lo que da como resultado, bajas tasas de movimiento y desplazamientos medios pequeños.

Parte de la energía potencial es disipada por la desintegración y remoción del material (energía cinética).

Para materiales frágiles, existe una diferencia entre resistencia de pico y residual (Figura 5). La energía cinética puede ser muy grande, a tal grado, que se corre el riesgo de que los movimientos tengan un gran alcance (alta relación alcance / altura de ladera).

El alcance es proporcional con el volumen de la masa colapsada, y la energía potencial por unidad de volumen descende en relación con la altura de la ladera y por ende su tamaño.

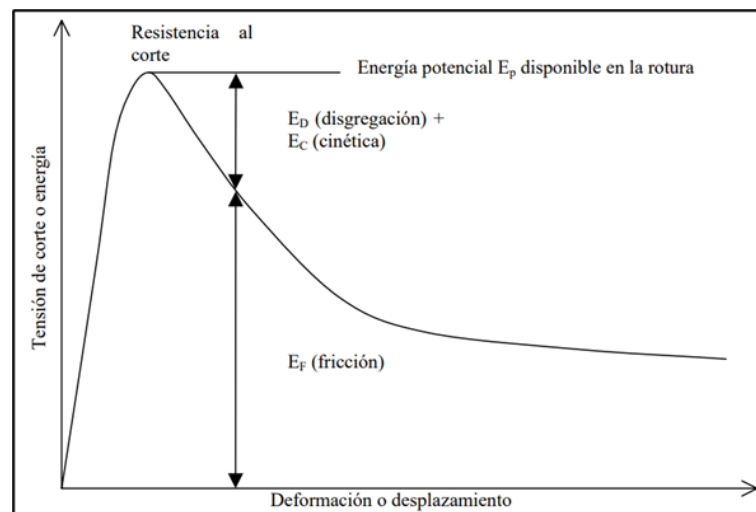


Figura 5. Diagrama Esfuerzo-Deformación hipotético para movimiento de ladera.

Fuente: García J.C. (2005).

La energía potencial ( $E_p$ ) se determina por las características geométricas y de localización del talud en el momento de la falla. Es muy importante determinar el valor de la energía potencial al final de la falla y su posterior evolución, para poder predecir el comportamiento del movimiento, ya que esta energía potencial, se convierte en energía cinética a medida que se produce aceleración del movimiento, y esta energía cinética, se disipa a otros tipos de energía al disminuirse la velocidad, (Juárez Díaz, 1998).

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

$E_p$  = energía potencial (J);

$m$  = masa (Kg);

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ); y

$h$  = altura (m).



## 2.6. Factor de Seguridad de la ladera

Para determinar si una ladera se encuentra en un estado estable bajo condiciones prevalecientes en algún determinado sitio de estudio y en un momento determinado, se utiliza el término de “*Factor de seguridad*” (FS). Este factor se entiende como la relación entre fuerzas resistentes y fuerzas desestabilizantes.

$$FS = \frac{F. \text{Resistentes}}{F. \text{desestabilizantes}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La manera de expresar la definición anterior es: “el factor por el cual la resistencia a cortante del suelo tendría que ser dividida para que la ladera se encuentre en un estado de equilibrio límite o de inminente falla”, ya que es lógico definir este factor en función de la resistencia cortante, por ser este, el parámetro que involucra mayor grado de incertidumbre en el análisis de la estabilidad (Lowe, 1976).

Otros autores como Winterkorn y Fang (1987), lo definen en función del equilibrio de momentos resistentes y actuantes en la masa de suelo o de roca en inminente falla, incluso de la altura de la ladera.

También puede ser definido como la resistencia cortante de un suelo entre el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

$$FS_s = \frac{\tau_r}{\tau_d} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$FS_s$  = factor de seguridad con respecto a la resistencia;

$\tau_r$  = resistencia cortante promedio del suelo y;

$\tau_d$  = esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

La resistencia cortante presenta dos componentes, la cohesión y la fricción, y se expresa como:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \quad (\text{Ec. 2.4})$$





Donde

$c$  = cohesión;

$\phi$  = ángulo de fricción; y

$\sigma'$  = esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla

o

$$\tau_f = c_d + \sigma' \tan \phi_d \quad (Ec. 2.5)$$

donde  $c_d$  y  $\phi_d$  son, la cohesión efectiva y el ángulo de fricción que se desarrolla a lo largo de la superficie potencial de falla,

$$FS_s = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{c_d + \sigma' \tan \phi_d} \quad (Ec. 2.6)$$

El factor de seguridad con respecto a la cohesión  $FS_c$  y el factor de seguridad con respecto a la fricción  $FS_\phi$ , se definen como:

$$FS_c = \frac{c}{c_d} \quad (Ec. 2.7)$$

Y

$$FS_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (Ec. 2.8)$$

Al comparar las ecuaciones, se puede observar que cuando el  $FS_c$  se vuelve igual a  $FS_\phi$ , ese es el factor de seguridad con respecto a la resistencia.

$$\frac{c}{c_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (Ec. 2.9)$$

Es decir

$$FS_s = FS_c = FS_\phi \quad (Ec. 2.10)$$

Si el FS es igual a 1, la ladera está en un estado de falla incipiente. Generalmente, un valor de 1.5 para el factor de seguridad con respecto a la resistencia es apropiado y se podría considerar como aceptable para que una ladera se considere estable (Braja, 2001).

Se deben de determinar propiedades de los suelos en estudio para realizar el análisis de la estabilidad como lo son los siguientes:



### 2.6.1. *Envoltente de falla de los materiales con el criterio de Mohr-Coulomb*

La obtención de los parámetros de resistencia que caracterizan a un suelo o a una roca es diferente en ambos casos, así como los modelos en los que se basan. Para el caso donde el criterio que rige el modelo de un suelo corresponde al de *Mohr-Coulomb*, está definido como:

$$\tau = c - \sigma_N \cdot \tan(\phi) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

$\tau$  = resistencia al cizalle en la falla;

$c$  = cohesión;

$\sigma_N$  = esfuerzo normal a la superficie de ruptura; y

$\phi$  = ángulo de fricción interna.

Es un criterio lineal muy usado para definir las condiciones de falla en un suelo, asumiendo el comportamiento lineal que éstos generalmente presentan.

Un principio fundamental en el análisis de resistencia es la influencia de las condiciones de drenaje en un suelo en el momento de la aplicación de cargas sobre éste, donde la presión del agua reduce la resistencia del material. Para este caso el estado tensional sobre el suelo está definido por (Terzaghi, 1936):

$$\sigma' = \sigma - u \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

$\sigma'$  = esfuerzo efectivo sobre el suelo;

$\sigma$  = esfuerzo total sobre el suelo; y

$u$  = presión de poros

## 2.7. Umbral de precipitación.

Se ha estudiado a la lluvia como factor desencadenante en la ocurrencia de movimientos en masa por numerosos autores, algunos de estos estudios los han realizado utilizando datos históricos, con los que definen umbrales críticos empíricos en los que relacionan la intensidad, duración de precipitaciones y los PRM.

Un umbral (“*threshold*” en inglés) crítico, es el nivel mínimo o máximo de alguna cantidad a partir de la cual un proceso ocurre (Reichenbach *et al.* 1998). Otros autores lo definen como un umbral mínimo en su nivel más bajo del cual un proceso no ocurre, mientras que un umbral máximo es el nivel por encima del cual se produce un proceso siempre (Figura 6).

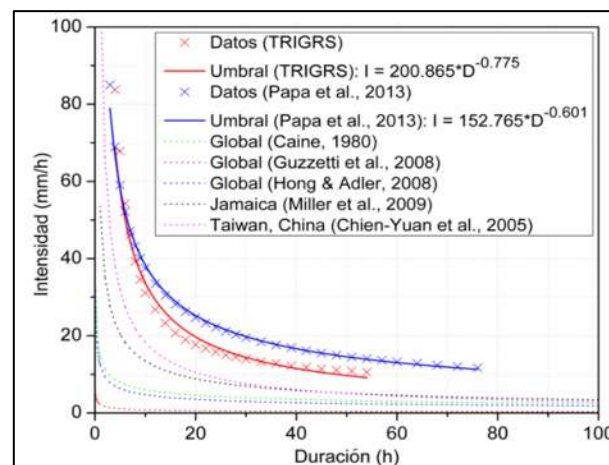


Figura 6. Imagen sobre umbrales de lluvia con modelos de TRIGRS y Papa *et al.* (2013).

Fuente: Marín, R. J., García, E., & Aristizábal, E. (2019).

Manzini y Rabuffetti (2003), indican que el umbral de precipitación para que se presenten deslizamientos superficiales en laderas constituidas por suelos detríticos y coluviales, depende de la inclinación de la ladera, la infiltración y pérdida de cohesión aparente. En la Tabla 3 tomada de González *et al.* (2002), se indican los umbrales de precipitación que han generado movimientos de ladera en varias partes del mundo.

Un umbral de precipitación queda definido, como el nivel mínimo o nivel máximo de una cierta cantidad necesaria (en este caso la lluvia) para que un proceso ocurra (Reichenbach *et al.* 1998 en Aristizábal *et al.* 2010).



Tabla 3. Umbrales de precipitación para desencadenamiento de movimientos de laderas. Fuente: Cuanalo (2006).

<i>Tipo de movimiento y país</i>	<i>Intensidad horaria (Ih)</i>	<i>Intensidad diaria (Id)</i>	<i>Precipitación acumulada</i>
<b>Movimiento de nueva generación</b>			
Hong Kong	>40 mm	>50 mm	>50 mm (15 días)
		>100 mm	
Flujos de Japón barro y tierra		>125 mm	>182 mm (2 días)
Italia (toscana)		88 mm	260 mm (15 días)
			325 mm (30 días)
Brasil	60 mm	>125 mm	0.4 Precipitación anual
			>675 mm (3 días)
Flujos de Estados Unidos (Califórnic)			>250 mm (3 días)
España	213 mm		52 mm durante el evento
Japón	20 mm		10-150 mm en el evento
Estados Unidos (California)			>180 mm en el evento
Italia (Toscana)		143-153 mm	290-400 mm (15 días)
			360-450 mm (30 días)
Francia			>300 mm (60 días)
España		205 mm	> 500 mm (3 días)
			476 mm (2 días)
España	>60 mm clima atlántico	>150 mm atlántico	>300 mm (clima mediterráneo)
		>180 mm mediterráneo	
<b>Reactivación o aceleración de movimientos</b>			
Diversos tipos de movimientos	Italia		>520 mm (60 días)
			pequeños deslizamientos
			>900 mm (100 días)
			grandes deslizamientos
	Francia		300 mm (90 días)
	España		> 250 mm (90 días)
	España		320 mm (15 días)



## Capítulo 3. Antecedentes

---

### 3.1. Trabajos enfocados al estudio de PRM generados por precipitaciones donde utilizan las SWCC.

Una gran cantidad de personas muere alrededor del mundo a consecuencia de efectos de los deslizamientos. La *CRED* (2010) en Aristizábal *et al.* (2011) muestra las estadísticas del año 2009, donde, 335 desastres de origen natural alrededor del mundo afectaron 119 millones de personas y dejaron pérdidas económicas superiores a 41.300 millones de dólares. El 53 % corresponden a eventos de origen hidrometeorológicos que aportaron 57.3 millones de víctimas. Del total de eventos hidrometeorológicos, las inundaciones corresponden al 82.8 % y los movimientos en masa detonados por lluvias al 17.2 %.

Una de las estrategias empleadas para evaluar la influencia de la precipitación como factor detonante de deslizamientos superficiales, es el empleo de la curva característica suelo-agua (Valverde-Ruiz, 2010) en combinación con modelos numéricos utilizados para realizar la modelación de los PRM (Jeong *et al.*, 2014). Para conocer más sobre este fenómeno y la manera en que lo analizan alrededor del mundo, se hizo la revisión de casos de estudio sobre este tipo de eventos, algunos de los cuales se muestran a continuación.

Actualmente este fenómeno se presenta con mayor frecuencia alrededor del mundo, por lo que diversos autores se han dedicado a realizar estudios sobre los efectos que producen los deslizamientos, basados en diferentes propiedades y técnicas para su estudio; tal es el caso de L'Heureux (2005), en la cual su investigación se enfocó en los deslizamientos de tierra inducidos por *precipitaciones en suelos insaturados*, empleando un modelo de elementos finitos en 2-D, así como los efectos de las diferentes características hidráulicas de un suelo de grano fino y grueso, basado en la determinación de las propiedades físicas e hidráulicas en campo y en laboratorio de dichos suelos, uno de ellos fue la SWCC, mostraron que para el suelo grueso, la presión de agua de poro cero se mueve gradualmente cuesta arriba con el tiempo mientras que en el modelo de suelo de grano fino, la tasa de pérdida de succión es casi la misma en el pie de la ladera, en medio y en la parte superior de la pendiente; estos diferentes patrones de infiltración conducen a

diferentes tipos de superficies de falla, además que la geometría de la pendiente, afecta más la distribución de la presión de poro en un suelo de grano grueso que en uno de grano fino.

Para el cálculo numérico del deslizamiento de tierra en la pequeña comunidad de Åmot en Noruega (Figura 7), que presentaba una pendiente de  $38^\circ$ , la cual falló en noviembre del 2000, después de un otoño extremadamente húmedo produciendo un deslizamiento de tierra que amenazó y puso en peligro a más de 24 casas y sus residentes.

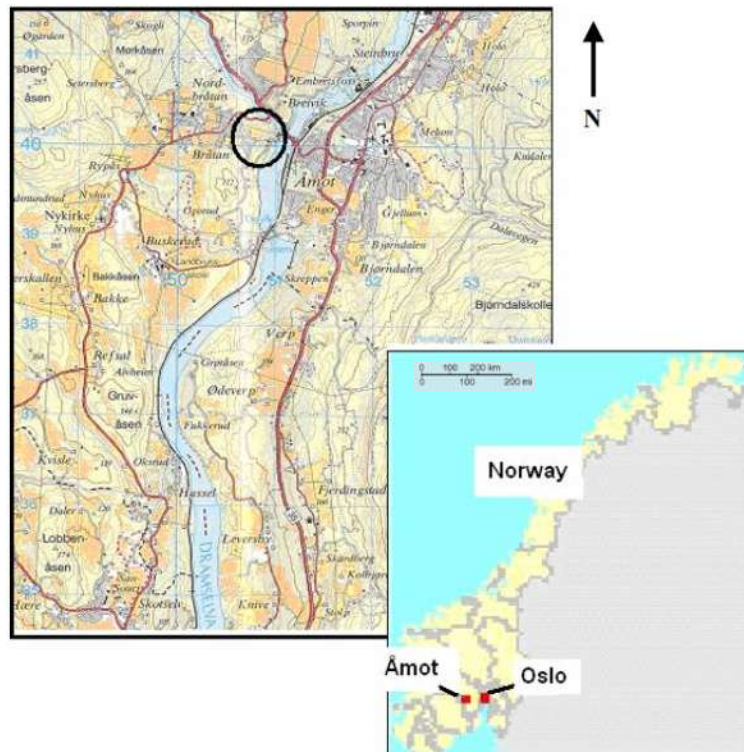


Figura 7. Ubicación del campo de estudio en la comunidad de Åmot, condado de Modum.

Fuente: L'Heureux, J. S. (2005).

Los cálculos mostraron que la falla se debió a una disminución de la succión y fuerza de fricción, durante la intensa lluvia y el tiempo calculado hasta la falla, concuerda con el evento observado, mostrando con ello que el evento podría haberse predicho, esto mediante la comparación de lluvia durante un año normal y la caída húmeda del año 2000.

Para el 2010, Tsai y Chen, realizaron una investigación sobre la influencia que tiene la SWCC sobre los deslizamientos poco profundos de tierra que son inducidos por precipitaciones, utilizando escenarios diseñados e implementándolos en un escenario real, basándose en un modelo de deslizamiento que requiere el conocer propiedades mecánicas del suelo para el análisis, y poder

predecir la ocurrencia de un posible deslizamiento; apoyándose en las principales SWCC de secado y humedecimiento. Se mostró la influencia que presentan estas, en la ocurrencia de los deslizamientos poco profundos, además, de la profundidad a la que se presentarían y el tiempo en que llegarían a la falla; obteniendo que en la simulación del caso real (en la cuenca del embalse de *Shihmen* al norte de *Taiwán*), la SWCC de humectación proporciona una mejor estimación sobre la profundidad de la falla en comparación con la SWCC de secado.

En el 2014, Jeong *et al.* evaluaron la susceptibilidad que tienen los PRM bajo eventos de lluvia extrema, con apoyo de un modelo Hidrogeotécnico propuesto el cual se muestra en la **Figura 8**. Identificaron la influencia del cambio climático, en la generación de 150 deslizamientos y flujos de escombros, que provocaron la muerte de 16 personas y daños graves en 176 viviendas de 13 aldeas de *Umyeonsan (monte)* (**Figura 9**) en Corea del Sur durante los meses de junio y julio del 2011.

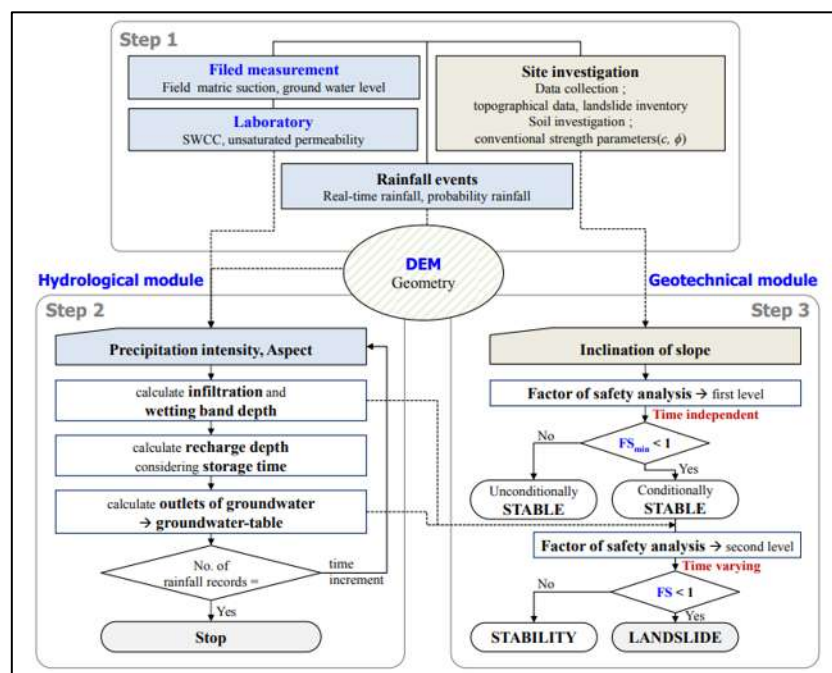


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología conceptual propuesta en la evaluación de susceptibilidad de PRM en eventos de lluvia extrema.

Fuente: Jeong *et al.* (2014).

Efectuaron el análisis numérico en base a pruebas de laboratorio y campo, considerando el flujo de agua subterránea y la infiltración de la lluvia como se muestra en la **Figura 10**, y fundados en las SWCC de los suelos en los sitios de prueba sobre las cuencas de la zona de estudio.

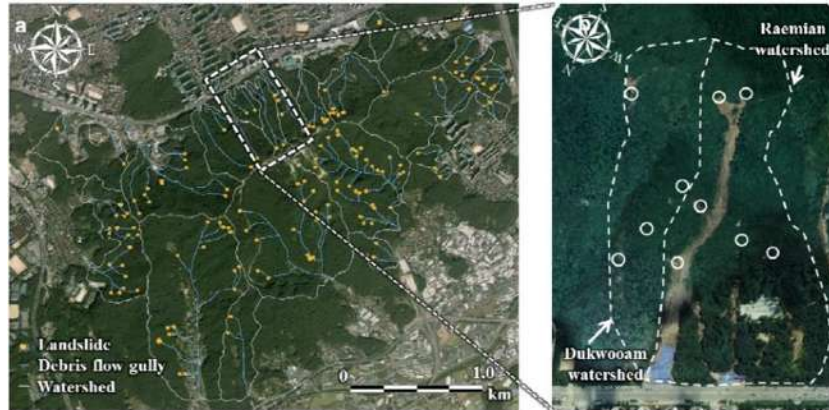


Figura 9. Deslizamientos de tierra en Umyeonsan (monte) bajo fuertes lluvias (307mm/24h) en 2011, vista general de los deslizamientos en el área de la cuenca hidrográfica de Raemian y cuenca de Dukwoom.

Fuente: Jeong *et al.* (2014).

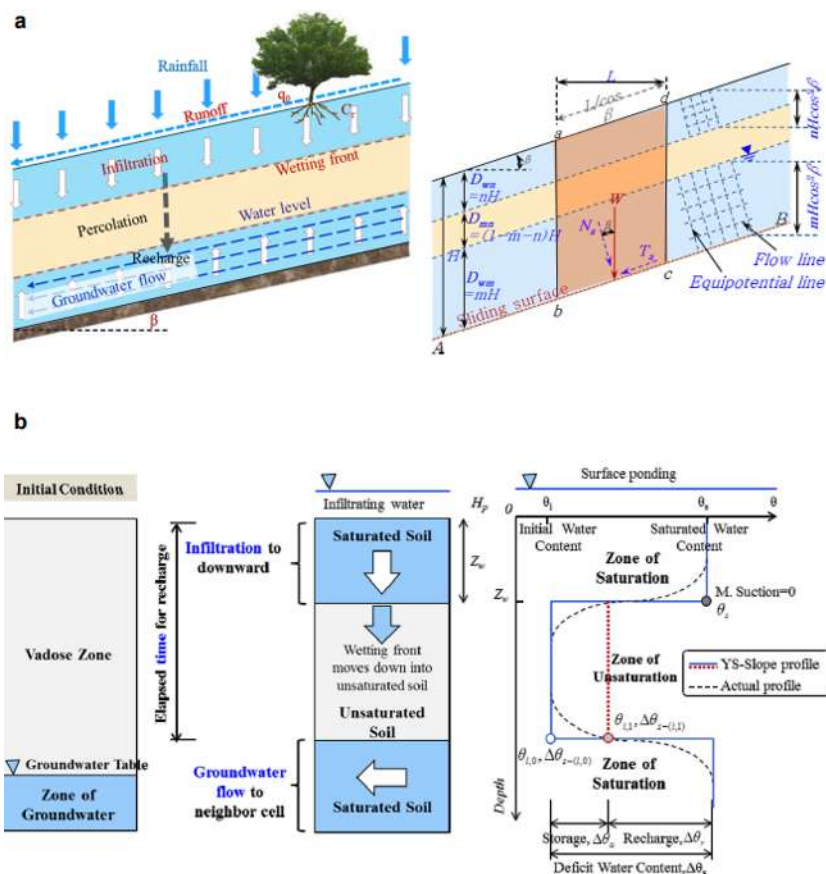


Figura 10. Diagrama esquemático del modelo YS-Slope. (a) Plano de deslizamiento infinito para análisis de estabilidad de taludes, (b) perfil de suelo y concepto de modelo hidrológico.

Fuente: Jeong, SS *et al.* (2014).



Esta metodología conceptual sobre diseño de deslizamiento, considera en un primer paso medidas de campo y laboratorio como la succión matricial, nivel de agua subterránea y la impermeabilidad, y seguida de un paso 2, considerando un módulo hidrológico que se correlaciona con el módulo geotécnico del paso 3 en el que se determina el FS, con base en los cálculos de infiltración y profundidad de banda humectante, así como el cálculo de la profundidad de recarga para determinar la estabilidad o inestabilidad; ambos módulos se basan además en un MDE del sitio en estudio (Figura 8).

Obtuvieron como resultado, que la inestabilidad de las pendientes del suelo se pueden predecir, al observar cómo son las distribuciones de succión matricial cambiantes, espacial y temporalmente, sobre la sección transversal de la pendiente del suelo, ya que el modelo (Figura 10), toma los factores del flujo de agua subterránea, la infiltración de agua de lluvia y el aumento del agua en el suelo, ya que en uno de los casos, los deslizamientos se detonaron por aumentos del nivel de agua, dada la infiltración por la lluvia, y el otro, por el aumento de nivel pero del agua subterránea.

Otro caso de evaluación de estabilidad de una pendiente natural durante lluvia, se presentó en el 2016 por Song, *et al.* utilizando una metodología para evaluar la estabilidad de una pendiente en un terreno natural, no saturado, durante la lluvia en *Deoksan-ri* del condado de *Injgun*, provincia de *Gangwon, Corea*; debido a que en el sitio ya se había presentado el fenómeno a consecuencia de lluvias extremas durante 2006 y 2007; basados en un monitoreo y obras de contención (Figura 11).



Figura 11. Vistas panorámicas del sitio de monitoreo de deslizamientos de tierra después de la construcción de las barreras de escombros.

Fuente: Song, Y.S. *et al.* (2016).



Se analizó la estabilidad del talud en terreno natural, durante una lluvia en tiempo real con base en esfuerzos de succión en el suelo saturado, aplicando el concepto de análisis de estabilidad de taludes, considerando el esfuerzo de succión mediante la estimación de las curvas características del suelo insaturado (SWCC) con medidas realizadas en campo y cálculos de FS, observando que el valor disminuyó repentinamente durante y justo después de una lluvia, y luego se presentó una recuperación, observándose fluctuaciones en el FS con valores de 1.68 a 1.7; lo cual indicó que la pendiente se mantuvo estable durante el monitoreo y por lo tanto no se presentaron deslizamientos de tierra. Este caso de análisis nos presenta una metodología muy buena en el estudio de este fenómeno y la posible implementación en otros sitios en la evaluación de estabilidad de laderas durante lluvia.

Hay situaciones en las cuales se deben utilizar diversos métodos para determinar ciertos parámetros, como por ejemplo, el predecir la SWCC a partir de las propiedades básicas del suelo como lo realizaron Jinchun y Peerapat (2020); que proponen un modelo que emplea la función de la SWCC, utilizada por Fredlund y Xing (1994), trabajando mediante el análisis de resultados de una serie de pruebas para obtener la SWCC en laboratorio y resultados en literatura, estableciendo ecuaciones para poder evaluar los valores que utiliza el modelo de Fredlund y Xing, bajo una analogía física o enlaces relacionados entre los parámetros básicos del suelo y los parámetros en la función de SWCC.

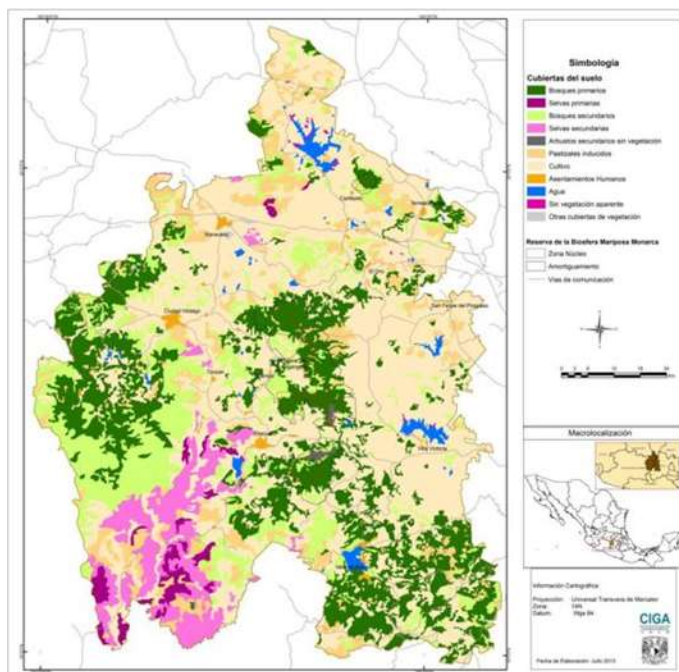
Esta función tiene tres parámetros: **a**, **n** y **m**. El parámetro **a** está relacionado con el valor de entrada de aire ( $\psi_{aev}$ ) de un suelo, **n** influye principalmente en la tasa de desaturación en la zona de transición de un SWCC, y **m** controla el contenido de humedad residual. El modelo propuesto mostró mejores predicciones que los modelos de predicción existentes. Y sugirió que el modelo se pueda usar para estimar el SWCC de secado preliminar de los suelos (Jinchun y Peerapat, 2020).

Es evidente que para el análisis del decaimiento del FS con respecto al incremento del grado de saturación del material, es importante y fundamental el conocer la curva característica suelo-agua y su asociación con la composición granulométrica y estructura del suelo (Pérez, 2008). Por tanto, la relación de contenido de humedad contra la succión mátrica puede variar para diferentes tipos de suelos, y se hace notar que para el caso de suelos finos (arcillas), estos se desaturan en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida,

por lo que conocer esta propiedad, ayuda a predecir el posible comportamiento que tendrá el suelo en estudio según sus propiedades hidromecánicas.

### 3.2. Estudios realizados en el municipio de Angangueo, Michoacán.

Para la zona de estudio existen varios trabajos de investigación en diversas áreas, los primeros fueron enfocados a conocer el cambio de uso de suelo realizado por Ramírez (2001) en cambio de cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, en el periodo de 1971-1994-2000, utilizando fotointerpretación y fotografías aéreas y como complemento de estos una imagen satelital; obtuvieron mapas de la cubierta de suelo para las fechas mencionadas, mejorando con esto la cartografía de la zona, mientras que para el 2013, Salas Canela en este mismo sentido, realizó el estudio sobre las causas directas del cambio en las



cubiertas del suelo en la región mariposa monarca, mostrando resultados del análisis espacial y documental, señalando las causas que explican los cambios en las cubiertas del suelo en la región entre 1986, 1993, 2003 y 2012, con base en un análisis documental sobre los procesos de cambios que se observaban en dichas fechas, utilizando imágenes satelitales y de referencia geográfica; teniendo como resultado una apreciable reducción de la masa forestal por diferentes causas naturales y antrópicas (Figura 12).

Figura 12. Distribución de las coberturas del suelo a escala regional 2012.

Fuente: Salas Canela (2013).

En relación a los PRM, este fenómeno se hizo presente en la región oriente del estado de Michoacán derivado de lluvias atípicas que se produjeron en los primeros días de febrero del año 2010, debido a los frentes fríos No. 28 y 29 e interacción con otros fenómenos climatológicos, que

representaron 35.8% de la precipitación media anual sobre el municipio de Angangueo, provocando afectación a dicho municipio además de Ocampo, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuxpan y Tuzantla, por la saturación de los suelos generando numerosos deslizamientos de suelos y flujos de lodos y detritos; que de manera particular en la población de la ciudad de Mineral de Angangueo registraron daños por el sepultamiento de varias viviendas, calles y canales que provocó lamentables decesos humanos, así como grandes pérdidas económicas.

Uno de los PRM que más afectaron a la población, generando el deceso de 16 personas y destrucción de 9 viviendas, fue el deslizamiento- flujo de detritos del Cerro Guadalupe, ubicado en el sector NW de la mancha urbana (Figura 13), fue uno de los más significativos y que en conjunto a los flujos que se presentaron en el río San Luis, el Charco y del Cerro Catingón movilizaron aproximadamente 697,346 m<sup>3</sup> de material (Alcántara-Ayala *et al.*, 2012).



Figura 13. Deslizamiento-flujo de detritos en el Cerro Guadalupe y afectación en las viviendas del mismo.

Fuente: Alcántara-Ayala *et al.* (2012) y [eluniversal.com.mx](http://eluniversal.com.mx).

Sobre este evento de febrero del 2010, Alcántara-Ayala *et al.*(2012), hacen mención de los deslizamientos de tierra en esa fecha sobre la reserva de la Biosfera de la mariposa monarca, y realizan una descripción de los mismos, concluyendo que los 4 flujos más significativos afectaron un área de 282 km<sup>2</sup> en Angangueo, presentando un volumen de 697, 346 m<sup>3</sup> de material movilizado (Figura 14).

Resalta que la información proporcionada por las estaciones cercanas, identifica a la lluvia como el principal mecanismo desencadenante de estos flujos de escombros, pero sin mostrar parámetros que lo corroboren. Destacando la ocurrencia de un granizo que precede al evento de lluvia, y mostrando que hacía falta el realizar estudios enfocados en conocer de una mejor manera las posibles causas que propiciaron la generación de los PRM, como lo es, la deforestación en la

zona y cambios en el uso del suelo, así como estudios enfocados en conocer si dados los factores que se presentan en la región son favorecedores en la generación de PRM, al ser detonados por la lluvia, así como la importancia del contar con una estación que permita tener un mejor monitoreo en la zona para prevenir un posible nuevo evento.

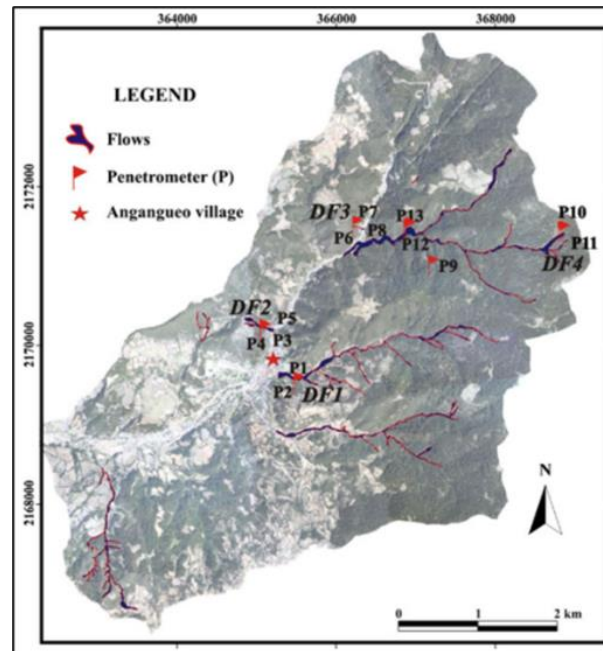


Figura 14. Distribución espacial de los flujos de escombros (DF) y puntos de prueba del penetrómetro dinámico (P) en Angangueo.

Fuente: Alcántara-Ayala (2012).

Y en este sentido para el 2013, Figueroa presenta su trabajo sobre el peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante la simulación numérica en el programa *Flo-2D*, para el caso de Angangueo, Michoacán; evaluando las zonas afectadas y elaborando un mapa de peligrosidad de flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas, proveniente de la microcuenca del río San Pedro. Sus resultados mostraron tres zonas de conflicto tanto para el flujo netamente líquido como para el flujo de detritos. La primera zona se ubica justo a la entrada de la ciudad, en el último cambio de dirección que presenta el río San Pedro; la segunda zona en el puente que intercepta a la calle Libertad y que conduce al Monumento del Minero (calzada Álvaro Obregón); y la tercera en la intersección de la calle Melchor Ocampo con el canal del río San Pedro.

En estas zonas los modelos revelan un incremento importante en los tirantes, las velocidades, las fuerzas de impacto y las presiones estáticas (Figura 14). En el mapa se muestra que las áreas

de mayor peligro se ubican en los márgenes del río-canal San Pedro, calle Melchor Ocampo y Av. Nacional-Independencia; y con peligrosidad media-baja, la calle Libertad y calles perimetrales del atrio del templo de la Inmaculada Concepción de María (Figuroa, 2013).

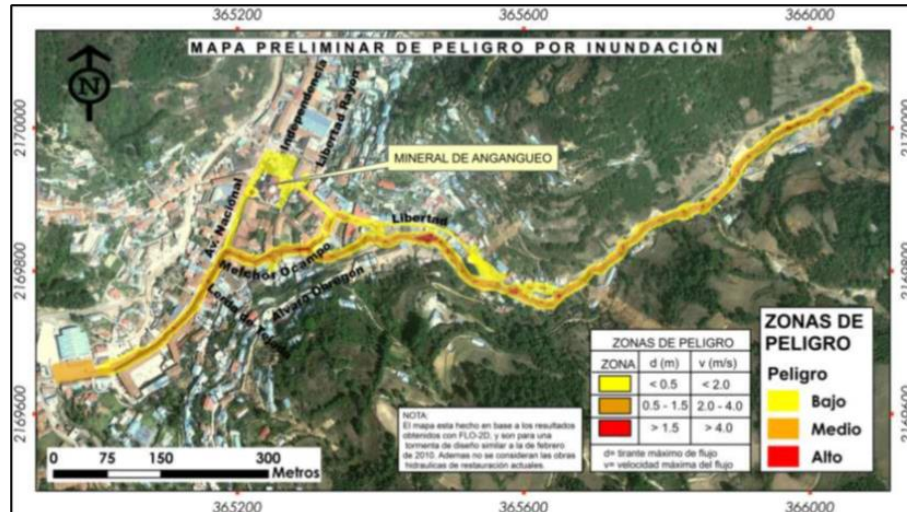


Figura 15. Mapa preliminar de peligro por inundación, para un evento de lluvias similar al ocurrido en febrero de 2010.

Fuente: Figuroa (2013).

Mientras que en el 2014, Torres Fernández realiza un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos para el municipio de Angangueo, Michoacán (Figura 16); mediante probabilidad condicional, con la finalidad de dar a conocer a la población las zonas más susceptibles a los deslizamientos y tengan un mejor plan de desarrollo en base a este, mostrando que las zonas que presentan mayor peligrosidad son las que muestran pendientes entre 20 y 45 grados; y cuya concavidad, corresponda a las partes media de las laderas y con orientación al norte; además de las que se encuentran entre 0 a 100 metros de los ríos y carreteras con vegetación de bosque de pino-encino.

Dadas las condiciones de potencial inestabilidad, exposición y riesgo que aún prevalecen en la zona, a pesar de la construcción del fraccionamiento “Barrio Sustentable Monarca (BSM)” (Rodríguez, 2016) en el que se reubicó a la población afectada, con el paso del tiempo todo ha vuelto a las mismas condiciones previas al desastre del 2010; es decir, la población ha regresado a habitar sus antiguas casas ubicadas en zonas de alta peligrosidad, como por ejemplo las faldas de la ladera del cerro Guadalupe. Situación que nos lleva a plantear la posibilidad, de que este desastre histórico se repita, si en algún momento se vuelven a presentar una precipitación atípica que sobre



sature el suelo y genere un nuevo PRM, de los cuales no se tiene un estudio en este sentido en la zona.

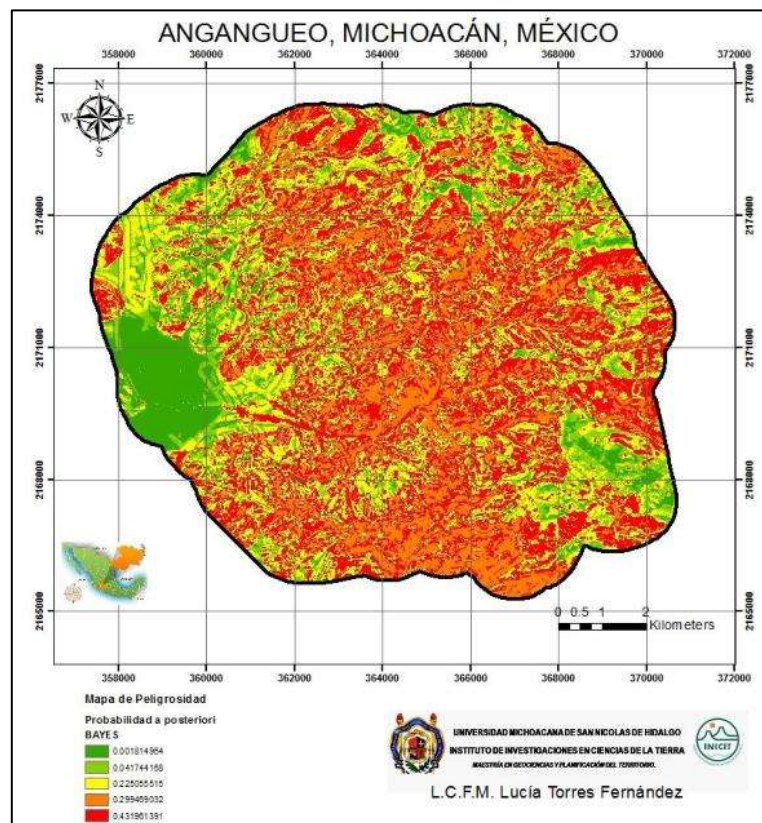


Figura 16. Mapa de peligrosidad para el municipio de Angangueo Mich.

Fuente: Torres, 2014





La ladera en estudio está situada en el sector noroeste (NW) del poblado de Mineral de Angangueo, entre las coordenadas geográficas 19°37'31.78"N (Lat.), 100°17'16.34"O (Long.) y 2,880 msnm de altitud (**Figura 18**).

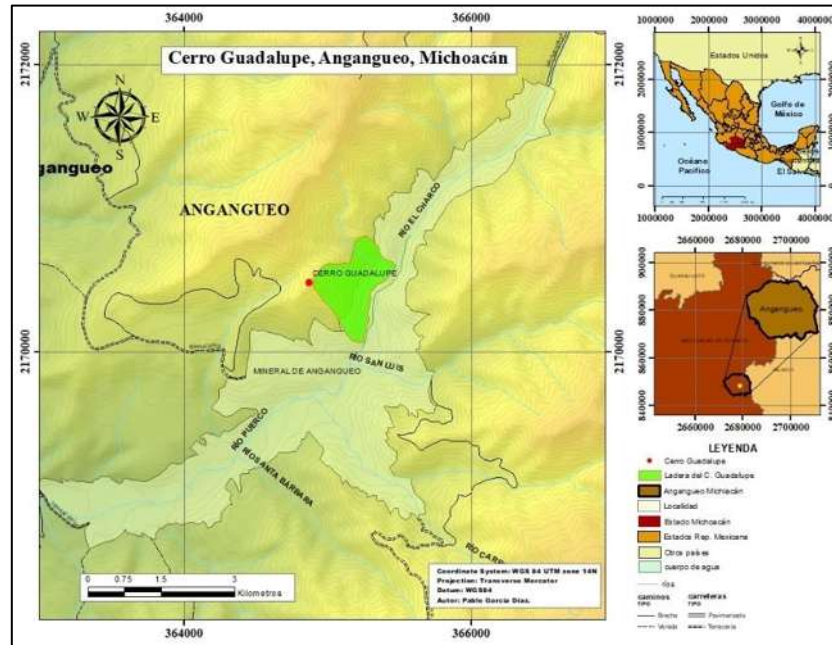


Figura 18. Localización del Cerro Guadalupe en el Municipio de Angangueo, Michoacán.

## 4.2. Clima

Con base en la clasificación de Köppen y modificada por García (1988), el clima del municipio se describe como semifrío, subhúmedo con verano fresco largo Cb (w2), con una temperatura media anual de entre 5°C y 12°C. Para el mes más frío se registran temperaturas entre -3°C y 18°C; mientras que para el mes más cálido la temperatura es menor a 22°C .

La precipitación en el mes más seco es menor a 40 mm; las lluvias de verano y el porcentaje de lluvia invernal es del 5 al 10.2% del total anual. La precipitación media anual oscila entre los 800 y 1200 mm.

## 4.3. Uso de suelo y Vegetación

El municipio tiene bosques de coníferas, con pino, oyamel y junípero; y bosque mixto, con encino, pino y cedro. En su fauna encontramos: comadreja, conejo, ardilla cacomixtle, zorrillo,

tejón, tórtola y pato. En las montañas se recibe anualmente a las mariposas monarca en la Reserva de la Biosfera, siendo esta uno de los principales atractivos turísticos.

Los principales cultivos son: maíz, trigo, cebada, frijol y haba. Se produce principalmente manzana, durazno, maguey de pulque, pera, perón y capulín. Se cría ganado avícola, bovino, porcino, ovino, caprino, caballar, asnal y mular.

Angangueo tiene su principal actividad económica, en la minería, la cual funciona como una industria extractiva de minerales de cobre, zinc, plomo, fierro, plata y oro. También se producen alimentos y productos metálicos excepto maquinaria y equipo.

El suelo que predomina en la zona es el Andosol, que son suelos de origen volcánico que están constituidos principalmente de cenizas; comunes en climas con ambiente húmedos y fríos; y su color, oscuro por lo general, presentando alta capacidad de retención de humedad y alta porosidad.

Presentan una fase física tanto gravosa como no gravosa, con textura media. En condiciones naturales tiene una vegetación de bosques de pino, encino, oyamel y pastizales (Mendoza, 2005) (Figura 19).

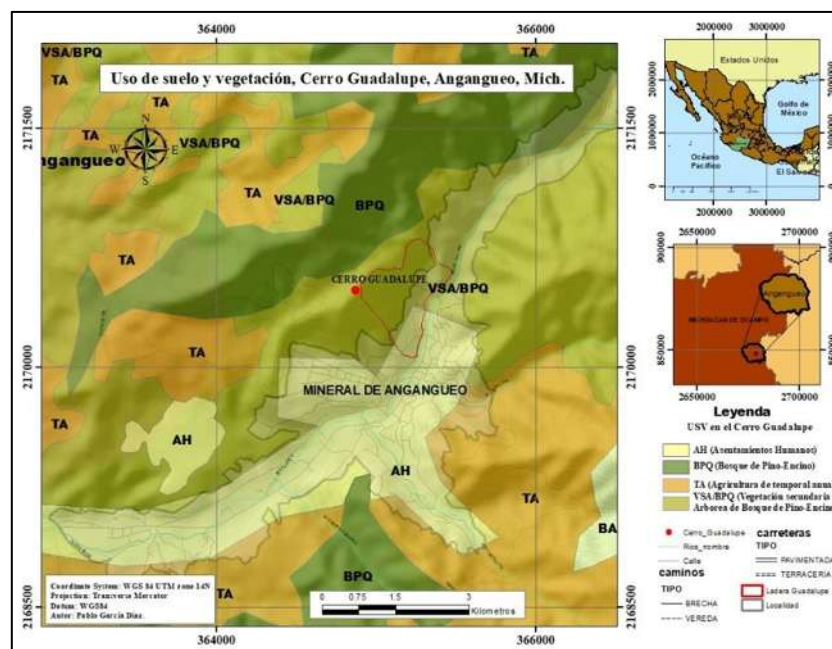


Figura 19. Mapa de uso de suelo y vegetación de la zona en estudio.

En el mapa se muestra sobre la parte N y NW del cerro, una vegetación secundaria arbórea de Bosques de Pino-Encino; y en la parte sur se presentan asentamientos humanos, además de que en las visitas a campo, se pudo observar que en las faldas de la ladera se tienen también asentamientos humanos, los cuales pueden estar en riesgo si se presentara un nuevo PRM, como el acontecido en el 2010. Además, en la parte central se tiene actualmente un uso de suelo de agricultura de temporal anual, consecuentemente de esto, la deforestación de dichas zonas para hacer este cambio en el uso de suelo.

La ladera presenta vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino (VSA/BPQ), sobre pendientes de moderadas a fuertes y creciendo sobre suelos profundos o someros y en ocasiones rocosos (Rzedowski y Rzedowski, 2005 en Cortes Vargas, 2013), caracterizadas por hojas agrupadas, largas, agudas y aciculares con vaina en la base, conos con semillas aladas, son árboles resinosos y las especies más frecuentes son *Pinus pseudostrobus*, *Pinus moctezumae* y *Pinus michoacana*. Siendo de importancia económica en la producción de madera, y obtención de resina (Rzedowski, 1991; Ramírez, 2001 en Cortes Vargas, 2013).

El bosque de encino se observa sobre suelos con poca profundidad, y la altura de estos varia de 2 y 30 m pero llegando a medir hasta 50 m, dependiendo de la humedad disponible. Siendo esta una de las comunidades más características de las zonas montañosas de México, en climas templado y subhúmedo, y cuyas características representativas es con presencia de hojas escaliformes y caedizas, las escamas del cono femeninas son duras y leñosas, el fruto es globoso (Rzedowski, 1991; Rzedowski y Rzedowski, 2005 en Cortes Vargas, 2013) (Figura 20).



Figura 20. Bosques de Oyamel (A); Bosque de Pinus (B); Bosque de encino (C).

Fuente: Fotografías de M.C. Patricia Silva Sáenz en Cortes Vargas (2013).



#### 4.4. Fisiografía

El municipio de Angangueo se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) sub provincia de Mil Cumbres. Es uno de los rasgos estructurales más recientes de la geología de México; la actividad volcánica inicio en el Mioceno y se prolongó hasta el reciente, con fragmentos por lineamientos principales en E-W y N-S.

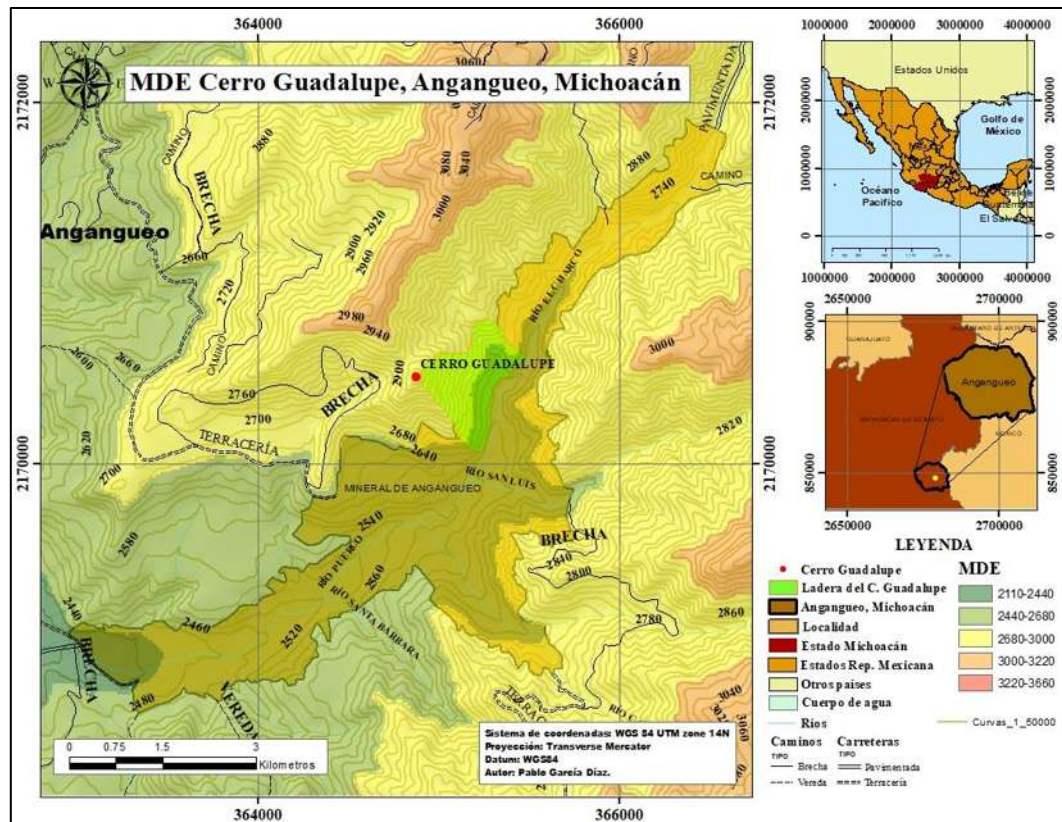
En el municipio existe un predominio de estructuras volcánicas teniendo la Sierra de Angangueo, como el rasgo morfotectónico más representativo de esta zona, que presenta una orientación Noroeste-Sureste, con altitudes que varían de los 2,400 a los 3,600 msnm, siendo su punto más alto el Cerro del Campanario con 3,640 msnm; esta sierra se compone por tres conjuntos montañosos, siendo estos La Sierra Chincua, Sierra Rancho Grande y Sierra Campanario.

La primera se localiza en la parte NW de la sierra y en su composición presenta materiales andesíticos terciarios los cuales están cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos. Las pendientes en la parte montañosa en su mayoría son superiores a los 15° y pueden llegar a alcanzar los 35° en varias laderas, mientras que el piedemonte supera siempre los 5°(Ramírez, 2001).

Las Sierra Rancho Grande-Campanario conforman la mayor parte de la mitad sur de la Sierra de Angangueo y están compuestas por materiales andesíticos del Plioceno. Es un conjunto montañoso que presenta un relieve abrupto, con pendientes que varían desde los 10° hasta los 25°. Para la vertiente occidental los valores de pendiente con cierta frecuencia llegan a los 35°, e incluso más, mientras que en la vertiente oriental eso sucede en pocos sitios muy localizados (Ramírez, 2001).

La ladera en estudio se localiza en el sector NW del poblado de Angangueo, ladera oriental del Cerro de la Virgen de Guadalupe.

Desde la cota de 2,500 a la 2,900, el Cerro Guadalupe presenta 400 m de desnivel topográfico (Figura 21), y pendientes que llegan a superar los 40°.



#### 4.5. Geología Regional

El municipio de Angangueo se encuentra sobre un flujo de lava Andesítico (TmA-TA). Esta unidad es una secuencia volcánica pseudohorizontal, predominantemente andesítico-basáltica, compuesta por lava masiva con niveles de brecha y flujos piroclásticos de la misma composición.

Ocupa casi la totalidad de la superficie del municipio y conforma las sierras de Chincua, Rancho Grande y Campanario, que conforman una estructura alargada orientada NNW-SSE, mejor conocida como Sierra de Angangueo, cubriendo una superficie aproximadamente de 2,000 km<sup>2</sup>, representando la manifestación masiva con que se inicia la actividad volcánica continental del CVTM en el área (Pasquaré *et al.*, 1991); esta unidad está constituida por varios aparatos volcánicos de composición andesítica con una textura porfídica y en algunas zonas, afanítica microcristalina. En su mayoría la andesita se encuentra como sucesión de derrames, aunque en algunos afloramientos se puede encontrar esporádicas brechas andesíticas intercaladas.

Las rocas andesíticas son lavas de color gris oscuro a gris verdoso, con algunas zonas en tonalidades ocres, estructura compacta, masiva, con áreas de intenso fracturamiento.

La Sierra de Angangueo, es una cadena de montañas morfoestructónicas orientadas al noroeste-sureste que varía de 2,400 a 3,640 msnm. La mayor parte del área está formada por la unidad andesítica Angangueo (Figura 22), una clara manifestación de la actividad volcánica masiva del CVTM. Es un macizo formado por estructuras volcánicas de composición andesítica con intercalaciones locales de brechas (SGM, 2000). El espesor que presenta la andesita de Angangueo es muy variable pero dentro del municipio se considera que este no es mayor de los 1,000 m, el cual corresponde al Mioceno según fechamientos realizados al mismo de 17.6 y 13.1 Ma sobre muestras al Sureste, los cuales fueron realizados por la CFE en 1992 (Bustamante, *et al.* 2007).

Dacita el Fraile (TmDA) es un afloramiento de manera aislada, que consiste en una sucesión de domos dacíticos, con niveles ignimbríticos y andesíticos, presentando un color gris oscuro a claro, con estructura masiva, compacta, y de textura de afanítica a porfídica, con plagioclasa, cuarzo y algunos minerales ferromagnesianos. Estos cubren de manera discordante la andesita de Angangueo, la cual fue muestreada en el municipio de Ocampo por Pasquaré y otros (1991), obteniendo dataciones de entre 6.1 a 3.8 Ma, comprendiendo estos al Mioceno tardío y el Plioceno temprano.

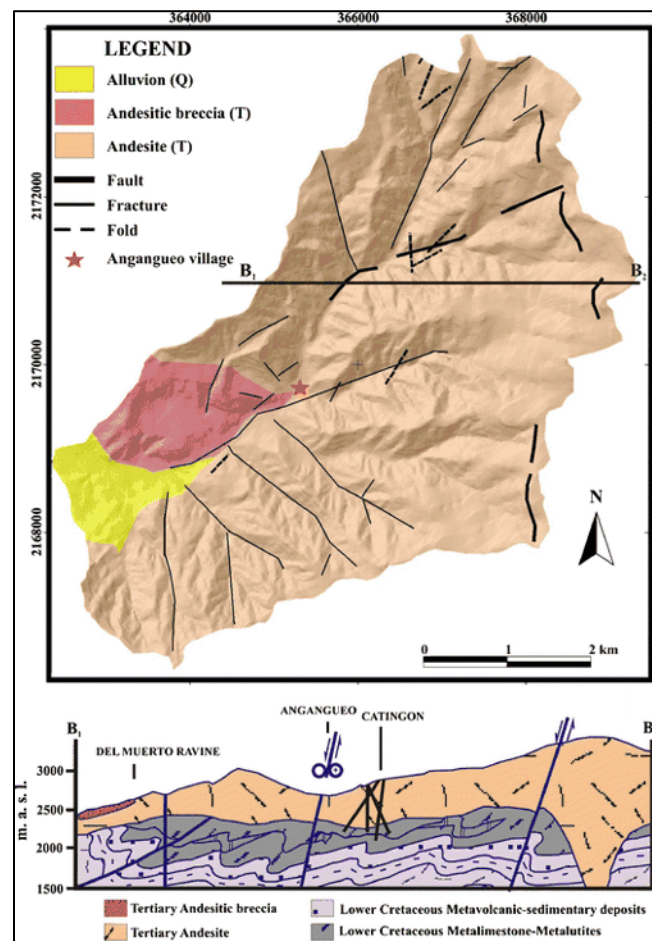


Figura 22. Mapa geológico y perfil, Angangueo, Michoacán, México (modificado del SGM, 2010. Coordenadas en proyección UTM).

Fuente: Imagen tomada de Alcántara-Ayala *et al.* (2011).

## Capítulo 5. Materiales y métodos.

El trabajo se realizó en cuatro etapas, las cuales se describen a continuación:

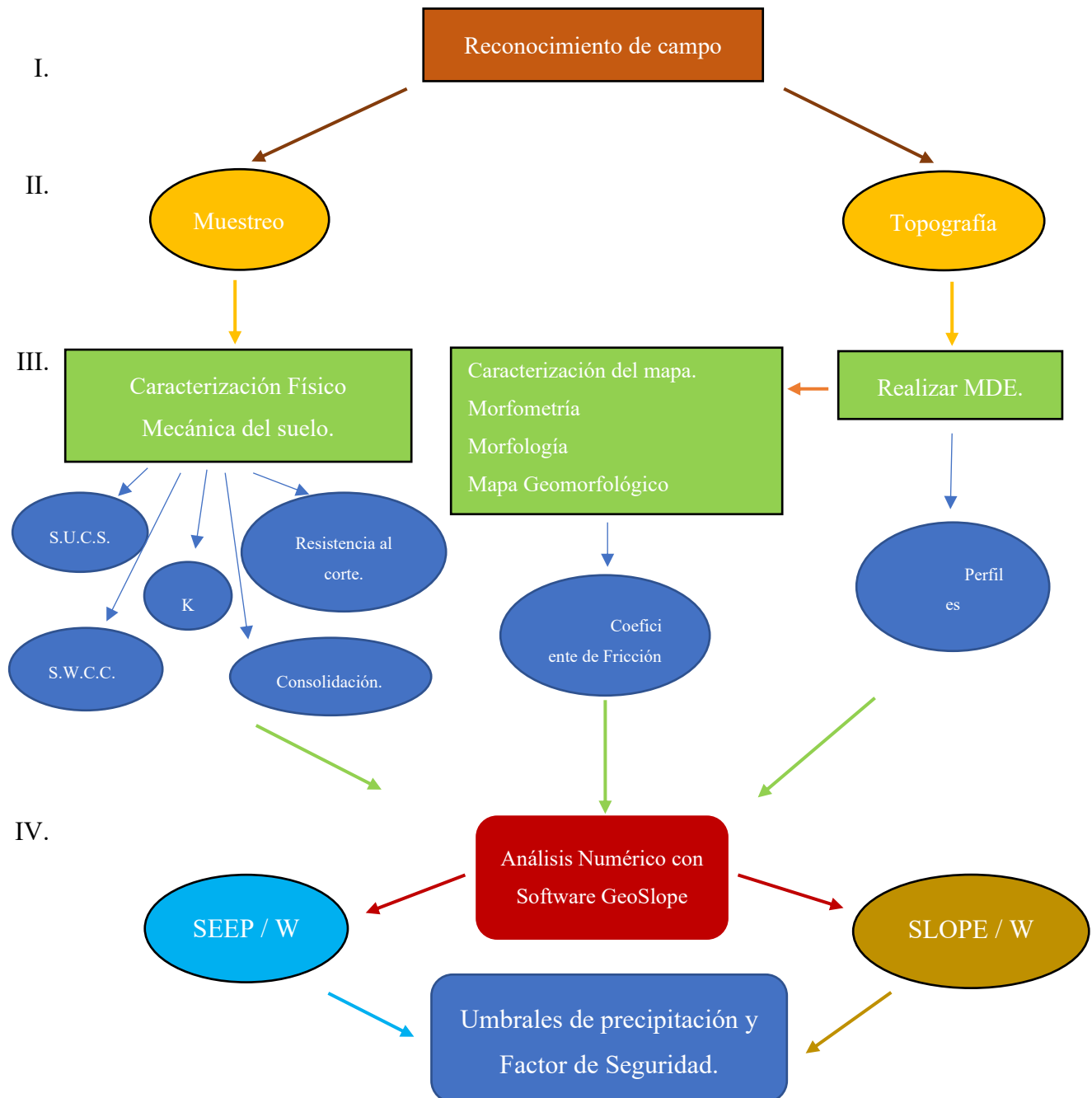


Figura 23. Secuencia en cuatro etapas en las que se realizó el trabajo de investigación.

## 5.1. Reconocimiento de campo.

En la primer etapa del trabajo (Figura 23), “*Reconocimiento de Campo*”, se realizaron visitas a la zona de estudio para la precisión de su ubicación, accesos, descripción de las condiciones actuales de la zona de deslizamiento del evento del 2010, identificación de unidades litológicas y sitios de muestreo (Figura 24).



Figura 24. Vista de la ladera del Cerro Guadalupe sobre la zona del deslizamiento donde se construyó un muro de contención a base de gaviones; se puede observar aun viviendas habitadas en la zona.

## 5.2. Muestreo, topografía y mapas

### 5.2.1. Muestreo

En esta etapa se muestrearon los materiales presentes sobre la ladera y en particular los que se encontraban sobre el PRM. El muestreo se efectuó con base en la norma M.MMP.1.01/03. recopilando el material suficiente para la determinación de humedad y pesos volumétricos de campo, pruebas índice, resistencia al corte, consolidación, y determinación de la Curva Característica Suelo-Agua (Figura 25).





Figura 25. Toma de muestras de suelo de la ladera del cerro Guadalupe.

En esta misma etapa, se midieron *in situ* propiedades mecánicas como la resistencia no drenada a la penetración y cortante de acuerdo con la norma *ASTM D2573*, utilizando el kit de ensayo de inspección sobre el terreno, el cual consta de un penetrómetro de bolsillo 16-T0163 y del comprobador de molinete de bolsillo para ensayo de campo sobre el terreno, ambos de la marca *Controls* (Figura 26).



Figura 26. Medición *in situ* de propiedades mecánicas con penetrómetro de bolsillo y molinete de bolsillo para inspección del terreno.

Fuente: Equipos de ensayo para industria de la construcción CONTROLS.

### 5.2.2. Topografía y mapas temáticos.

Contemporáneamente al muestreo de materiales, se realizó un levantamiento topográfico de detalle el día 01 de julio del 2019, con la finalidad de evaluar la geometría de la ladera en estudio, y determinar con la mejor precisión posible el perfil topográfico con el que se implementó el modelo numérico. La topografía se obtuvo mediante la adquisición de nubes de puntos 3D a través del Escáner Láser Terrestre (ELT) de la marca RIEGL, modelo VZ-1000 (Figura 27);

complementado con una cámara DSLR (*digital single lens réflex*) de la marca NIKON (modelo D700), receptor GNSS, sensores de inclinación, plomada láser y brújula digital.

Para el levantamiento topográfico el ELT se estacionó sobre la vertiente poniente del Cerro El Campanario, ladera opuesta al área de estudio, desde donde se obtuvo el registro de una nube de 22'511,501 puntos 3D, bajo una resolución angular de  $0.04^\circ$  y una frecuencia de 150kHz que permitió medir distancias de hasta 950m. Posterior al escaneo se obtuvieron imágenes RGB que posteriormente fueron sobrepuestas al conjunto de puntos para una mejor visualización del entorno (Figura 27).



Figura 27. Equipo utilizado para obtener la topografía de la ladera fue realizado con el Laser Scanner RIEGL VZ-1000.

Con apoyo del software RiScanPro la nube de puntos 3D fue exportada al formato “LAS”, compatible con los programas ArcGIS 10.6, Global Mapper 19 y CloudCompare, que permitiera la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones tipo Terreno (MDE-T). A partir de este último se obtuvieron los mapas temáticos de: pendientes, orientación y altitud. Estos fueron insumos para el análisis geomorfológico, morfométrico y construcción de perfiles de la ladera en estudio.

En la nube de puntos puede observarse la vegetación, parte de la zona urbana de la comunidad, y principalmente, la parte central que es la zona del deslizamiento de suelo de febrero del 2010 (Figura 28).

En una primera fase del procesamiento, se ajustó la nube de puntos debido a un desfase que presentó en cuanto a sus coordenadas, utilizando en esta fase el programa CloudCompare 2.10.1, que es un software libre para el procesamiento de nubes de puntos para la edición, consulta y visualización de nubes que llegan a presentar millones de puntos (Figura 30); y ayudados de puntos de referencia en *Google Earth Pro*, que ayudaran a referenciar mejor la nube y proceder a su ajuste.

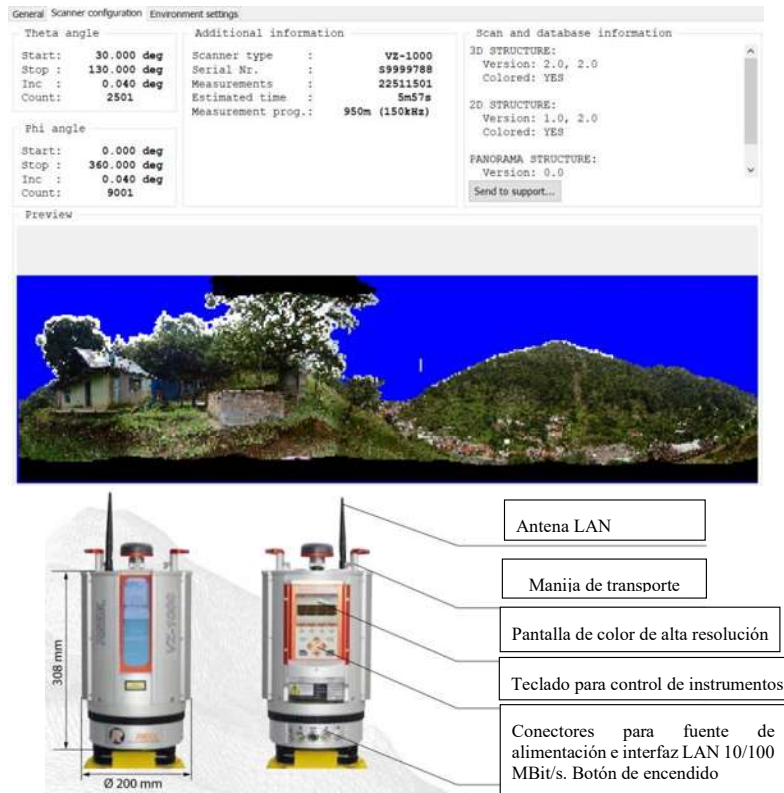


Figura 28. Características de dimensiones y controles del Scanner RIEGL VZ-1000.

Fuente: Imagen propia; <https://www.microgeo.it/public/userfiles/LaserScanner/VZ-1000.pdf>



Figura 29. Nube de puntos del levantamiento topográfico, utilizando el programa CloudCompare.

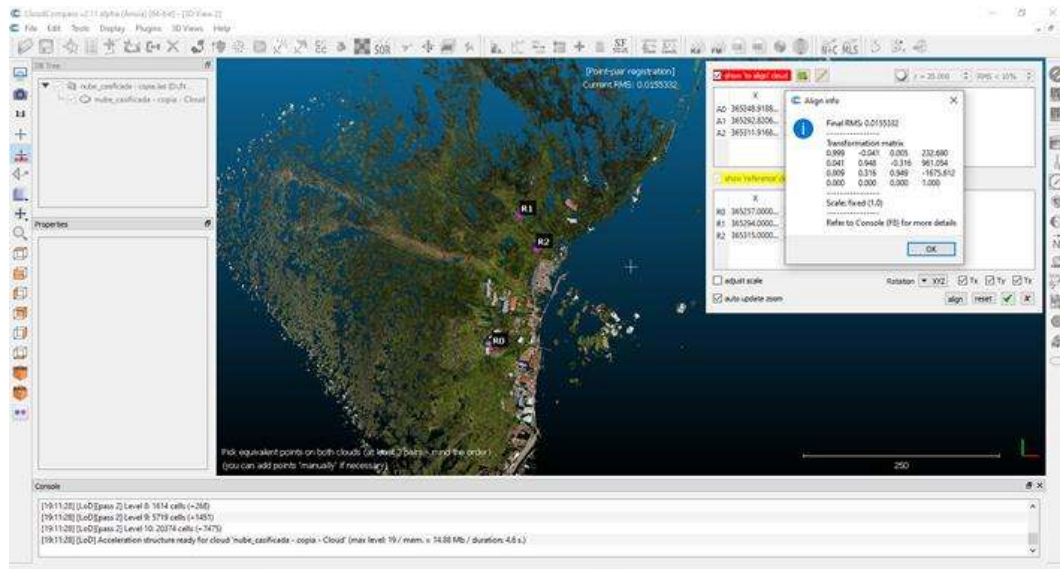


Figura 30. Rectificación de la nube de puntos, utilizando puntos de referencia a partir de Google Earth e identificación de puntos en la nube, basado en las coordenadas UTM.

Después de la rectificación de la nube de puntos, se procedió a efectuar la clasificación de estos, en el programa *Global Mapper 19*, con el fin de mantener solo los puntos correspondientes al terreno natural; clasificándolos en puntos correspondientes a vegetación alta, media y baja; viviendas e infraestructura; y del nivel del terreno natural; previamente delimitando la ladera con un recorte y dejando solo los puntos de interés tal como aparece en la **Figura 31**.

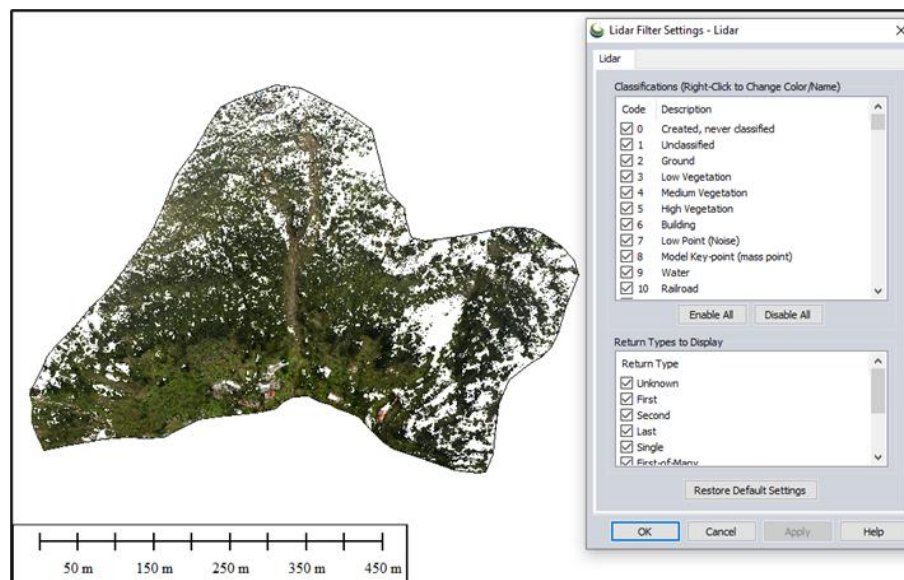


Figura 31. Clasificación de la nube de puntos utilizando el programa *Global Mapper 19*.

Se generaron perfiles para poder visualizar de una mejor manera los puntos y clasificarlos. Utilizando la barra de herramientas del *Módulo Lidar de GlobalMapper* con la opción de filtrar datos (Figura 32), donde se seccionaban los puntos correspondientes en la categoría que correspondieran.



Figura 32. Software GlobalMapper y barra de herramientas utilizada para la clasificación de la nube de puntos.  
Fuente: Blue Marble Geographics, 2018 en Vargas (2020).

El proceso y resultado de la clasificación se presenta en la Figura 33, donde en la primera etapa, se tenía la nube de puntos completa obtenida en el escaneo de la ladera, y terminando la clasificación, dejando solo los puntos correspondientes a la superficie del terreno natural y el perfil del mismo.

El proceso de clasificación es sencillo, pero conlleva mucho tiempo, ya que se deben ir trazando perfiles a lo largo y ancho de la ladera, para poder identificar los puntos correspondientes a cada clasificación requerida, presentando con ello, una mejor apreciación de las formas, como en este caso lo fue de la ladera, y poder revisar detalladamente cada parte del área de estudio, definiendo de una mejor manera la zona donde se presentó el PRM del evento del 2010.

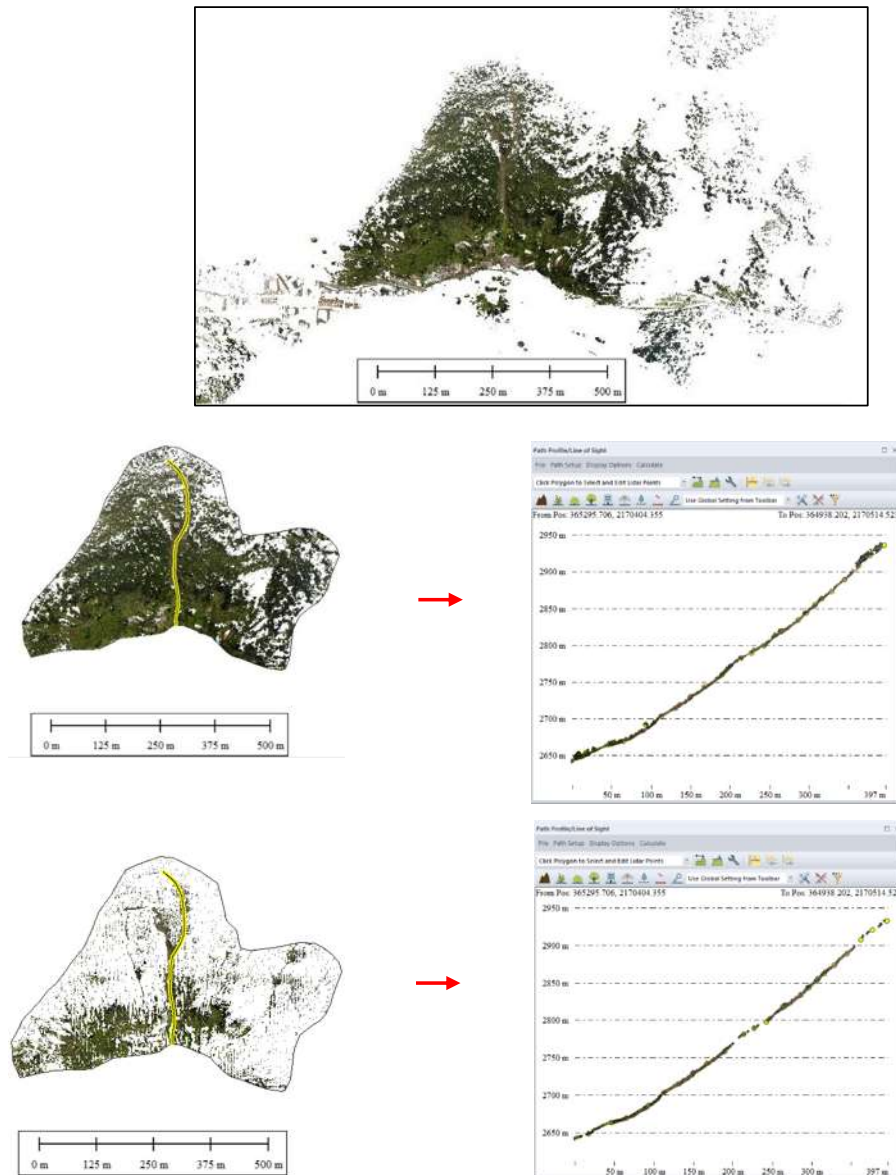


Figura 33. Proceso de clasificación de la nube de Puntos, una vez realizando un recorte de los puntos que se localizan fuera de la zona de estudio y obtención de perfiles de la ladera.

Con los puntos correspondientes a la superficie del terreno, se generó el MDT al procesarlo en el programa de ArcGis10.6, con los archivos que se generaron en GlobalMapper 19, tal como se muestra en la **Figura 34**, y exportando los resultados en formato Grid, Tiif y Shp respectivamente utilizando SIG; y en base a este, se obtuvieron los demás mapas de interés como el de pendientes y orientación.

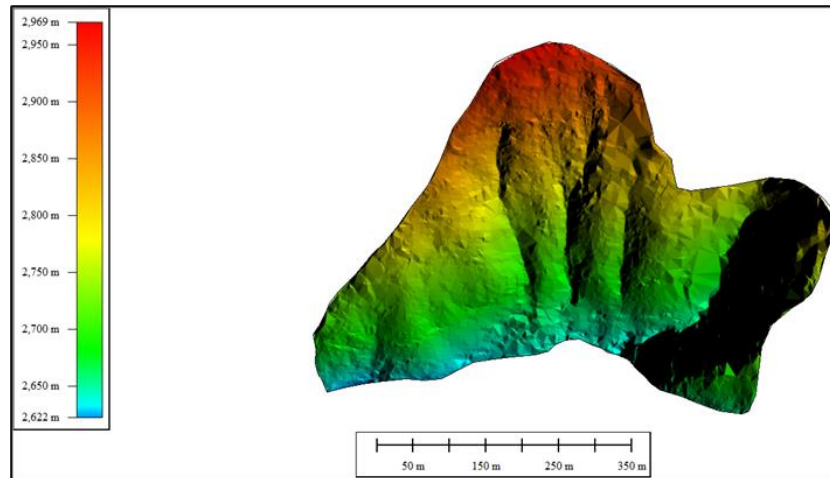


Figura 34. MDT del cerro Guadalupe en el programa GlobalMapper 19.

Con el fin de identificar y generar el mapa geomorfológico, perfil litológico, y conocer de manera detallada la geología en la zona de estudio, se realizaron dos visitas a campo. La primera fue el día 15 de noviembre del 2019 y la segunda el día 03 de febrero del 2020, determinando e identificando la geología y litología local de la ladera, tomando varios puntos de referencia para realizar el mapa litológico, ayudados del levantamiento topográfico realizado previo y los programas como ArcMap 10.6 y AutoCAD 2018; los resultados se muestran en el capítulo 7.

### 5.3. Pruebas físico-mecánicas a los depósitos de suelo.

#### 5.3.1. *Propiedades índice de los suelos estudiados.*

De las muestras obtenidas en campo se determinaron la humedad natural ( $W_c$ ) y peso volumétrico (PVHC) según las normas *M.MMP.104/03*, y *M.MMP.1.08/03*, respectivamente (Figura 35).

Para la obtención del **PVHC**, se labraron pastillas de aproximadamente 12 mm de diámetro y espesor de 44 mm, las cuales fueron pesadas en una báscula (con precisión al centésimo de gramo de la marca OHAUS); y se determinó su volumen mediante el método de mercurio desalojado. La humedad natural (de campo) se obtuvo mediante el secado de 200 gramos de suelo a una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 24 horas. Al finalizar este tiempo de secado, se determinó el

peso seco de la muestra y con apoyo de la siguiente ecuación se evaluó la Humedad Natural de Campo ( $W_c$ ) :

$$W_c \% = \left( \frac{W_h - W_s}{W_s} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

$W_h$  = Peso del suelo húmedo, gr.

$W_s$  = Peso del suelo seco, gr.



Figura 35. Determinación de humedad natural y PVHC.

En la mecánica de suelos la clasificación de los materiales se efectúa empleando alguno de los siguientes métodos: Sistema de Clasificación de suelos: AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), Sistema de Clasificación MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), Clasificación de suelos *Alemana Floss*; La administración de la Aeronáutica Civil (*C.A.A.*); Clasificación de suelos *USDA* (*United States Department of Agriculture*) y Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (**SUCS**).

El más utilizado en México es el **SUCS**, y se conoce que Arturo Casagrande fue quien propuso este sistema como una modificación y adaptación más general al sistema de clasificación de materiales para aeropuertos propuesto en 1942. En este sistema los suelos finos se clasifican según sus límites de consistencia y no en su granulometría fina (Villalaz, 1979; Juárez Badillo, 1980).

Para el presente trabajo los materiales fueron clasificados según el método **SUCS**, tomando como referencias las normas, *M.MMP.1.06/03* (sobre la clasificación de los fragmentos de roca y suelos) y *M.MMP.1.07/03* (para la determinación de los límites de consistencia).



La composición granulométrica se determinó mediante la cuantificación de las proporciones de pesos de material retenido en las mallas (3", 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200), (Figura 36) y llegar a su clasificación por el SUCS.



Figura 36. Determinación de la composición granulométrica de material.

La determinación de los límites de consistencia se realizó con base en la normativa *M.MMP.1.07/07*. Se obtuvieron los límites líquido (**LL**), plástico (**LP**) e índice de plasticidad (**IP=LL-LP**), empleando para ello la copa de Casagrande y moldes de lámina galvanizada de dimensiones conocidas. Estas últimas se emplearon para determinar la contracción lineal (**CL**) y volumétrica (**CV**), respectivamente (Figura 37).

En la clasificación de la fracción fina se utilizó la carta de plasticidad (Tabla 4), con los resultados de la prueba. Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la **CL** y **CV** son las siguientes:

$$CL = \frac{Li-Lf}{Li} * 100 \quad (Ec. 5.2)$$

Donde:

CL= Contracción lineal aproximada al décimo más cercano, en %

Li= Longitud inicial de la barra de suelo húmedo, (la longitud interior del molde, en cm).

Lf= Longitud final media de la barra de suelo seco, en cm.

$$W_c = W - \left( \frac{(V_h - V_s)\gamma_w}{W_s} \right) * 100 \quad (Ec.5.3)$$

Donde:

$W_c$  = Limite de contracción volumétrica, en %.

$W$  = Humedad del suelo en el momento que fue moldeado, (%).

$V_h$  = Volumen de la pastilla de suelo húmedo,  $\text{cm}^3$  (ml).

$V_s$  = Volumen de la pastilla de suelo seco,  $\text{cm}^3$  (ml).

$\gamma_w$  = Densidad del agua,  $\text{gr}/\text{cm}^3$  (gr/ml).

$W_s$  = Peso del suelo seco, (gr).



Figura 37. a) Determinación del límite líquido en suelos con la copa de Casagrande y colocadas en recipientes de aluminio para determinar las diferentes humedades que presenta la muestra de suelo; b) límite plástico con los rollitos de 1mm de diámetro y colocados en las capsulas de aluminio; así como las muestras de CL y CV.

Las pruebas se realizaron para cada una de las muestras de los depósitos de suelo, es decir, del depósito coluvial, el depósito de caída y la parte de suelo de la roca dacita alterada; y los resultados se muestran en el capítulo 7.

Posteriormente se efectuaron las pruebas de consolidación unidimensional (Norma UNE 103-405-94), que sirvió para obtener un parámetro de la permeabilidad de los suelos.

En la **Figura 38** se muestra el proceso de la prueba de consolidación: En una primera fase se obtuvo una muestra remoldeada a partir de la  $W_c$  y PVHC del material; de esta muestra se labró la probeta a utilizar en la prueba de consolidación; a continuación se colocó la probeta dentro de un anillo metálico y entre dos papeles filtro y piedras porosas, una en la parte superior y otra en el



fondo; se determinó su peso húmedo inicial antes de colocarla en el edómetro; posteriormente se aplicaron las cargas y se midió la consecuente compresión desarrollada en la probeta.

El espécimen se mantuvo bajo agua durante la prueba, los incrementos de carga se realizaron cada 24 horas, y posteriormente las descargas se efectuaron en un lapso de 30 min para cada una de las cargas aplicadas. Finalmente, se retiró la muestra y después de secarla en un horno se determinó el peso seco del espécimen de la prueba.

Tabla 4. Clasificación mediante el sistema SUCS. Fuente: Juárez Badillo (1980).

DIVISION MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ④ Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ④ MÁS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO EN LA MALLA N.º 200 ④	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIA Poco o nada de partículas finas	GW Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMETRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%; GW, GP, SW, SP, más del 12%; GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%; Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **	
		GRAVAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	GP Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d GM u Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		GC Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla
			ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas		
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d SM u Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
			ARENAS MAL GRADUADAS, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d SM u Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
			ARENAS MAL GRADUADAS, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d SM u Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
			ARENAS MAL GRADUADAS, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	* d SM u Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
			ARENAS MAL GRADUADAS, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ④ Las partículas de 0,074 mm de diámetro (la malla N.º 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad		
		CL Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.			
		OL Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.) 	
		CH Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas			
		OH Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.			
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	P Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			



Figura 38. Proceso de prueba de consolidación unidimensional.

Uno de los parámetros necesarios para los cálculos de la prueba de consolidación es la Densidad de sólidos ( $S_s$ ) por lo que se procedió a determinarla empleando la norma *M.MMP.1.05/03*; para los tres materiales, utilizando tres muestras por prueba y promediando los valores obtenidos de cada prueba, para obtener el valor correspondiente de  $S_s$  (Figura 39).



Figura 39. Prueba para determinación de densidad de sólidos ( $S_s$ ).

### 5.3.2. Prueba de compresión triaxial

Para esta prueba de compresión triaxial, se usó un espécimen de suelo de aproximadamente 36 mm de diámetro y 76 mm de longitud. Luego, este espécimen es cubierto por una membrana delgada de látex y se coloca dentro de una cámara cilíndrica de plástico que se llena con agua como se muestra en la Figura 40. El espécimen queda sometido a una presión de confinamiento por compresión del fluido en la cámara. Para generar la falla cortante en el espécimen, se aplicó un esfuerzo axial a través de un émbolo vertical de carga.

Existen tres tipos estándar de pruebas triaxiales que son generalmente realizadas (Das, 2001):

1. Prueba consolidada-drenada o prueba drenada (CD)
2. Prueba consolidada-no drenada (CU)
3. Prueba no consolidada-no drenada o prueba no drenada (UU)

Para la presente investigación, solo se realizaron las pruebas de compresión triaxial no consolidada- no drenada (UU), dadas las condiciones del equipo con el que se contaba, pero teniendo en consideración que debería de realizarse la prueba (CD), para obtener presiones efectivas y cohesión efectiva de los materiales que se utilizarían dentro de las propiedades de los depósitos de suelo. El espécimen de prueba es llevado a la falla por la aplicación del esfuerzo desviador  $\Delta\sigma_d$ , sin permitirse el drenaje en ninguna etapa, por tal motivo la prueba se lleva a cabo muy rápido. Debido a la aplicación de la presión de confinamiento en la cámara  $\sigma_3$ , la presión de poro del agua en el espécimen de suelo se incrementará una cantidad  $u_c$ . Habrá un aumento adicional en la presión de poro  $\Delta u_d$ , debido a la aplicación del esfuerzo desviador.

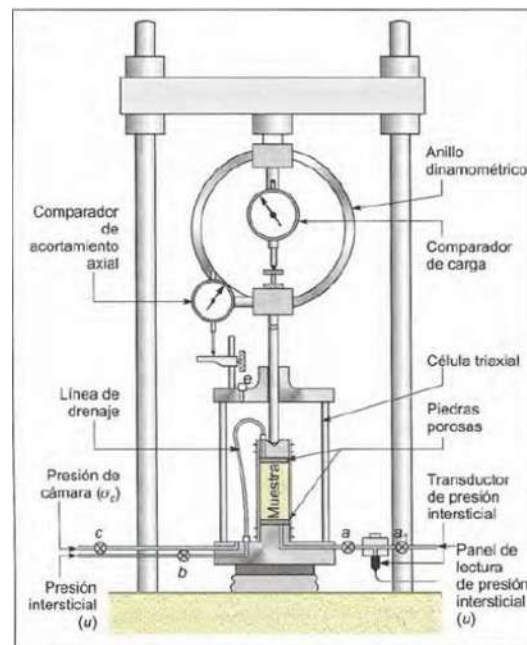


Figura 40. Esquema de ensayo triaxial.

Fuente: González, Ingeniería Geológica (2002).

Las pruebas se realizaron utilizando la normativa *UNE 103402:1998*. Considerando la humedad y peso volumétrico de campo, se realizó el remoldeo de las muestras y posteriormente se labraron los especímenes para la prueba triaxial. Estos especímenes presentan una forma cilíndrica de 3.3 cm de diámetro como mínimo y una altura de 2 a 2.5 veces el diámetro. Se preparan tres especímenes por prueba, y para determinar su volumen se midieron los diámetros de las muestras en su parte superior, central e inferior; luego se cortaron para que cumplieran con la relación antes mencionada, y se determinó su peso y volumen para comprobar que cumplieran con

estos parámetros. Posteriormente, se colocó el espécimen en la cámara triaxial (**ELE International**) colocándole un cabezal encima y cubriéndola con una membrana de látex, ligada perfectamente para evitar la inclusión de agua, la cual, es utilizada para darle el confinamiento a la muestra de suelo (**Figura 41**).

A continuación, se aplicó la carga registrándose contemporáneamente el valor de esta y su respectiva deformación.

Con los resultados de la prueba se construyeron los diagramas de Círculos de Mohr, y con base en su envolvente se determinó la Cohesión (**C**) y ángulo de fricción ( **$\phi$** ).



Figura 41. Proceso de la prueba de compresión Triaxial realizada a las muestras de suelo.

### 5.3.3. Determinación de la curva característica suelo-agua (SWCC)

Una de las partes relevantes en la presente investigación fue el poder determinar la Curva Característica Suelo-Agua (**SWCC**), que consiste en graficar la relación entre el contenido de agua en un suelo (grado de saturación, contenido de humedad gravimétrica o volumétrica) y la succión (tensión del agua) del suelo (Pérez García, 2008). Esta relación tiene otros nombres dependiendo del área de aplicación y se le conoce también como curva de retención del suelo, curva de succión, entre otros más.

Para su obtención se basó en la norma *ASTM D6836-02* (Aprobada en 2008), utilizando el equipo de celda de presión con plato cerámico de alta presión.

Para nuestro estudio se utilizaron el extractor de placa de presión de 15 bares, modelo 1500F1 (**Figura 42**), así como el extractor de placa de presión de 5 bares, modelo 1600 (**Figura 44**); el equipo se montó con la configuración de laboratorio conocida como colector 0700CG23F1 (**Figura 43**); según lo especificado por los manuales proporcionados con el equipo de Soilmoisture

en el que se indica que es un múltiple que combina la estación 0700G2 y la estación 0700G3F1 ([www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)).

La estación **0700G2** se utilizó para operar el extractor de placa de cerámica de 5 y 15 bares (*modelo 1500F1*) con los mismos platos porosos con los que se contaba en el laboratorio.



Figura 42. Extractor de placa de presión 15 bares modelo 1500F1.

Fuente: [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)

Mientras que la segunda *estación 0700G3F1*, se utilizó para presiones de extracción en el rango de 1 bar a 3 bares, con los mismos platos cerámicos de las mismas presiones, en ambos extractores se colocaron 4 placas de cerámica a la vez, lo que permitió analizar aproximadamente 48 muestras de 5,2 cm de diámetro simultáneamente.

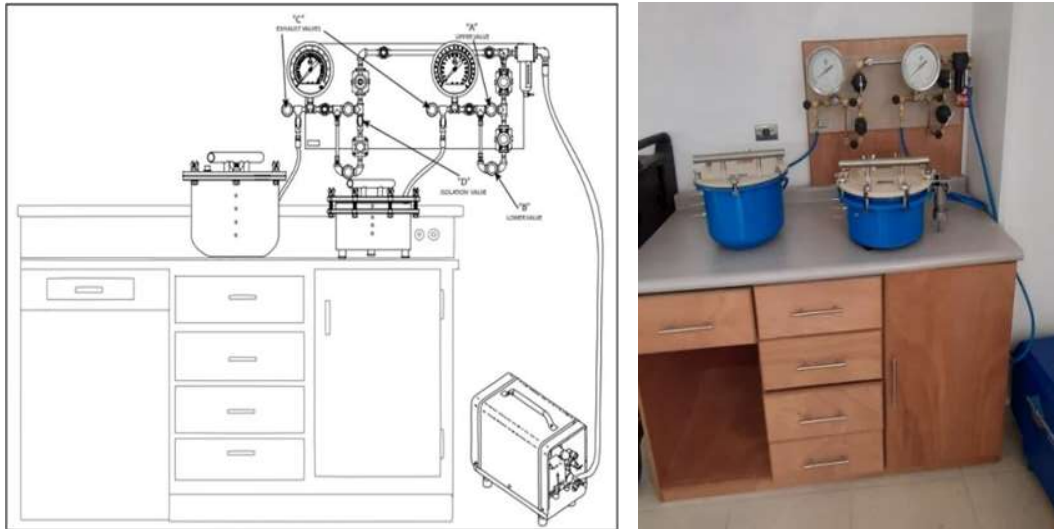


Figura 43. Configuración típica del múltiple 0700CG23F1.

Fuente: [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)

La segunda *estación 0700G3F1* (Figura 45 b), proporciona una regulación de baja presión muy precisa en el rango de 1 a 75 psi, al utilizar un regulador neumático; sin embargo, el equipo tiene la capacidad de realizar pruebas de hasta 5 bares con su regulador de presión con el extractor de placa de presión *modelo 1600*.



Figura 44. Extractor de placa de presión 5 bares modelo 1600.

Fuente: [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)

Esta estación consta de un regulador de presión de 5 a 150 psi y un regulador neumático de 1 a 60 psi; un medidor de prueba de 0 a 100 psi.

En el apéndice se presenta el proceso para la ejecución de una prueba completa para obtener un valor de la SWCC.



En la realización de las pruebas se preparó el material de los suelos que se obtuvieron en el muestreo en campo, secándolo y cribándolo por la malla N°10 (1.68 mm de abertura).

El manejo de las muestras de suelo debe ser cuidadoso para obtener resultados precisos y consistentes.

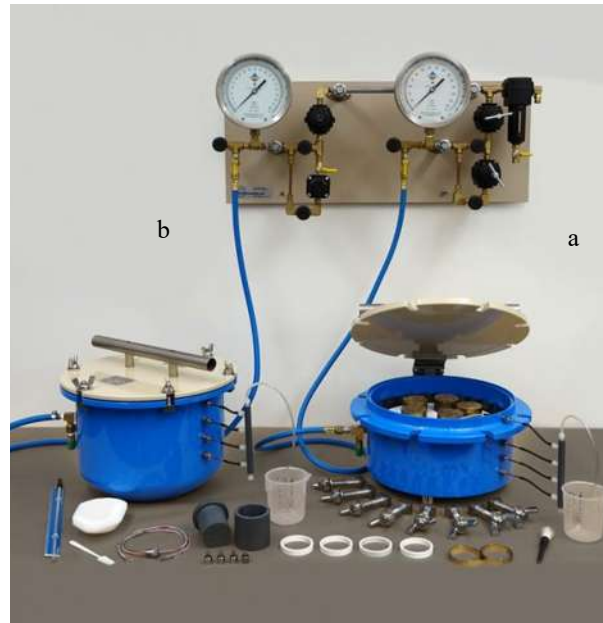


Figura 45. Estación 0700G2 (a) y estación 0700G3F1 (b).

Fuente: [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)

Se realizaron una serie de pruebas con los platos cerámicos disponibles, siendo estos de 1, 3, 5 y 15 bares, como ya se mencionó utilizando los dos extractores (modelos 1500F1 para presiones de hasta 15 bares y el modelo 1600 para presiones de hasta 5 bares de presión de extracción (Fig. 46)). Los resultados de las pruebas efectuadas se presentan en el capítulo 7, y en los anexos de pruebas de laboratorio, se muestran algunas tablas de las pruebas realizadas.



Figura 46. Plato Cerámico para presión de 1 bar y extractores modelo 1600 y 1500F1.

Fuente: [www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com).



#### 5.3.4. Medición de la permeabilidad aparente en campo

Para determinar la permeabilidad aparente en campo, se utilizó el equipo de *mini disk infiltrometer*, el cual tiene una succión ajustable de (0.5 a 7 cm) y un radio de 2.25 cm, con el que se puede tener información adicional del suelo, eliminando los macroporos con un valor de admisión de aire adimensional, menor que la succión del infiltómetro, mediante el control de la infiltración con una pequeña presión negativa o succión.

Dado que al estar el agua bajo succión no pasa a los macroporos como grietas o agujeros, y solo pasa a través del suelo según lo determinan las fuerzas hidráulicas del mismo (Manual Mini Disk Infiltrimeter, 2018).

La infiltración se calcula con el método de Zhang (1997), a partir de la conductividad hidráulica del suelo con la ecuación 5.4.

$$k = \frac{c_1}{A} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

donde

$c_1$  = la pendiente de la curva cumulativa de infiltración vs la raíz cuadrada del tiempo.

$A$  = valor relacionado con los parámetros de van Genuchten para cada tasa de succión en el suelo y radio del infiltómetro.

$$A = \frac{11.65 (n^{0.1}-1) \exp[2.92(n-1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n \geq 1.9$$

$$A = \frac{11.65 (n^{0.1}-1) \exp[7.5(n-1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n < 1.9 \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Donde

$n$  y  $\alpha$  = parámetros del suelo por Van Genuchten,

$r_0$  = radio del disco, y

$h_0$  = Succión en la superficie del disco.

Van Genuchten considera 12 clases de textura obtenidos de Carsel y Parris (1988), como se muestra en la [Tabla 5](#).



Tabla 5. Parámetros de Van Genuchten. Fuente: Manual Mini Disk Infiltrometer (2018) y López Alegría; 2020.

Textura	Radio		$\Lambda$								
	$\alpha$	$n/h_0$	-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	
Arena	0.145	2.7	2.8	2.4	1.7	1.2	0.9	0.6	0.5	0.3	
Arena arcillosa	0.124	2.3	3.0	2.8	2.4	2.1	1.8	1.6	1.4	1.2	
Franco arenoso	0.075	1.9	3.9	3.9	3.9	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0	
Marga	0.036	1.6	5.5	5.7	6.3	6.9	7.5	8.3	9.0	9.9	
Limo	0.016	1.4	7.9	8.2	8.7	9.3	9.9	10.5	11.2	12.0	
Franco limoso	0.02	1.4	7.1	7.4	7.9	8.5	9.2	9.9	10.6	11.5	
Franco arcilloso arenoso	0.059	1.5	3.2	3.5	4.2	5.1	6.2	7.4	8.9	10.7	
Franco arcilloso	0.019	1.3	5.9	6.1	6.6	7.2	7.9	8.6	9.3	10.1	
Franco arcilloso limoso	0.01	1.2	7.9	8.1	8.5	8.9	9.4	9.9	10.4	10.9	
arcilla arenosa	0.027	1.2	3.3	3.6	4.1	4.7	5.4	6.1	7.0	8.1	
Arcilla limosa	0.005	1.1	6.1	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	
Arcilla	0.008	1.1	4.0	4.1	4.3	4.5	4.7	5.0	5.2	5.5	

#### 5.4. Análisis Numérico con software GeoSlope.

Se implementó un modelo numérico utilizando el software *GeoSlope 2018 R2*, en particular con los módulos Seep/W y Slope/W, **Figura 47**.

- Slope/W para el cálculo de estabilidad de taludes
- Seep/W para el cálculo de redes de flujo

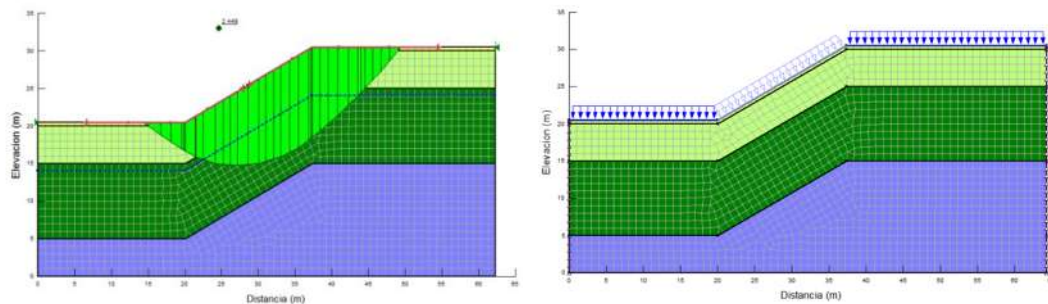


Figura 47. Análisis de estabilidad con Seep/W y Slope/W en GeoStudio.

Fuente: Rodríguez Puentes, J.I. (2016).



#### **5.4.1. Características de Slope/W.**

Es un software que permite el cálculo del factor de seguridad (**FS**) de taludes o laderas en tierra y en roca; analizando problemas sencillos o complejos que presentan gran variedad de formas de superficie de falla, condiciones de presión de poro, propiedades del suelo, métodos de análisis y condiciones de carga, empleando el equilibrio límite para modelar tipos de suelos heterogéneos siendo muy usado en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

#### **Métodos de cálculo:**

El programa permite realizar el cálculo de estabilidad a través de una gran variedad de métodos: Ordinario (Fellenius), Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, Cuerpo de Ingenieros Americanos (I y II), Lowe-Karafiath, Sarma.

#### **Metodologías para el Análisis de la Estabilidad**

Para el análisis de movimientos de laderas, durante muchos años se han utilizado Métodos de Equilibrio Límite (MEL), con los que se determina el FS a través de un análisis regresivo para obtener los valores de resistencia al cortante en el momento de la falla. Para el empleo de este sistema se supone que, para el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

Este análisis lo podemos realizar al estudiar directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas, siendo este el que se implementó en el presente trabajo por ser el más empleado. Hay varios métodos para mejorar los sistemas de dovelas que inicialmente fueron desarrollados por Petterson y Fellenius (1936), como lo es el método de Bishop (1955) y Janbú (1954), los cuales han sido muy utilizados en los últimos años; y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967); ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos, como en el caso de esta investigación (Tabla 6).



Tabla 6. Métodos de análisis de estabilidad. Fuente: Suarez (2009).

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ( $\phi = 0$ ).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

#### 5.4.2. Características de Seep/W.

El programa permite realizar los cálculos de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis: Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso y Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

#### Geometría y estratigrafía:

Es igual al proceso realizado por el módulo de Slope/W del programa GeoStudio, ya que la introducción de los condicionantes geométricos son versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría.



### **Condiciones de contorno del problema:**

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello dispone de las siguientes opciones: *Head* (Altura piezométrica =Altura de cota+ altura de presión), *Total Flux* (Caudal Filtrado), *Press Head* (Altura de presión) y *Unit Flux* (Flujo unitario) (*Seepage Modeling with Seep/W, 2012*).

Para la modelación en el presente trabajo de investigación, se utilizó el modelo saturado/ no saturado, en función de la conductividad hidráulica calculada con los datos que se obtuvieron en la SWCC de las pruebas de laboratorio.

#### ***5.4.3. Proceso en la modelación.***

En la modelación se representaron las condiciones que presentaba la ladera previo al evento en febrero del 2010, tomando como referencia la precipitación atípica durante el 1 al 5 de febrero, y con ello, conocer el comportamiento que presentaba la zona de desprendimiento durante esos días de lluvia, causando la infiltración sobre los depósitos de suelo y llevando a la inestabilidad de los materiales; para lo cual se realizó el modelado del perfil de la zona de la siguiente manera:

En primera instancia se debió definir las condiciones que iría presentando la zona a consecuencia de la precipitación durante el lapso de 5 días, por lo que el primer módulo del programa GeoStudio 2018 R2 que se utilizó fue el de Seep/W, donde se establecieron las condiciones de precipitación así como las características geométricas y los parámetros mecánicos de los depósitos de suelo. Por lo que dentro del módulo Seep/W, se indicó que se realizaría un análisis de tipo transitorio dado el fin que se perseguía en la investigación, el cual fue el conocer el comportamiento que presentaba la ladera con las condiciones ya mencionadas, las cuales nos confirmen en primer lugar, si la precipitación fue el detonante del PRM, y si se cumplía esto, ahora conocer en cuanto tiempo y con qué cantidad de precipitación se generaba para ver si fue tal como aconteció en febrero del 2010.

Por lo que se indicó que el lapso de tiempo de análisis fueran los 5 días de precipitación, en el apartado de tiempo, así como la cantidad de lluvia que precipitó cada uno de esos días, luego de esto, se dibujó la geometría a analizar, que para esta investigación el interés principal fue sobre la



zona superior de la ladera, donde se presentó el movimiento en masa que posteriormente evolucionó a un flujo de detritos, conociendo con ello el momento tal que se presentara un decaimiento en la estabilidad de los depósitos de suelo y se llegara al punto que se presente la falla, y por ende, el movimiento de material involucrado.

Para obtener la geometría de la zona se utilizó una de las características del programa, la cual es el permitir el importar la geometría que se desea analizar mediante un archivo DXF de AutoCad, tomando las dimensiones de la zona para realizar el análisis, utilizando el programa de Global Mapper en el trazado del perfil de la zona de desprendimiento y exportándolo como un archivo en formato DWG, para procesarlo en el programa de AutoCAD 2018, modificándolo para representar las condiciones previas al evento de remoción en masa, y una vez obtenido ese perfil se exportó al módulo de Seep/W.

Dentro del programa de GeoStudio R2 y en el módulo de Seep/W, se definieron los materiales y sus propiedades hidráulicas, indicando los datos que se obtuvieron de la SWCC para los depósitos de suelo coluvial y de caída, ya que son los dos materiales que se movilizaron durante el evento del 2010; mientras que para el depósito de la roca dacítica no se le determinó la SWCC debido a que se aprecia en campo que la zona fungió como superficie impermeable y como la superficie donde se produjo el deslizamiento de los materiales suprayacentes; por lo que su permeabilidad no afectó su estabilidad dadas sus propiedades mecánica e hidráulicas.

Para colocar los datos de la SWCC, estos se definieron en la pestaña de Fn. Contenido Vol. de Agua, al agregarla y definiendo el nombre según el material correspondiente e introduciendo los datos de la succión matricial vs contenido volumétrico de agua; y mediante la utilización de los datos de la SWCC, se estimó la conductividad hidráulica basada en el método de Fredlund y Xing.

El siguiente paso fue el definir las condiciones de borde o contorno del modelo; una vez realizado esto se procedió a efectuar el análisis en el módulo Seep/W.

Los resultados que se obtuvieron durante las pruebas en el módulo Seep/W se utilizaron ahora en el análisis con el módulo de Slope/W, con la finalidad de determinar la estabilidad de los materiales en la ladera, y esto se realizó de una manera fácil ya que dentro de las características



del programa GeoStudio R2, es la integración entre los módulos del programa con la finalidad de llegar a un análisis integral de los parámetros que se desean conocer.

Dentro del módulo de Slope/w se indicaron las propiedades de los materiales ahora en relación de sus propiedades mecánicas, así como sus condiciones de frontera y la superficie de deslizamiento; cabe mencionar que en el módulo de Slope/W se pueden resolver problemas sencillos en cuanto a presiones de poro al indicar las propiedades hidráulicas necesarias para tal fin, sin embargo en situaciones complejas en las que se requiera considerar un análisis transitorio en relación al tiempo inicial o variaciones del mismo, en dichos casos se debe de utilizar el módulo de Seep/W para poder llevar a cabo un análisis más detallado.

En nuestro caso como ya se mencionó, se utilizaron los resultados que se obtuvieron en el análisis en Seep/W en cuanto a la variación de flujo de manera transitoria por la precipitación atípica durante los 5 días, y las modificaciones a los 2 y 8 días de precipitación, para con ello, calcular el **FS** utilizando Slope/W a lo largo del análisis transitorio dado el umbral de precipitación utilizado.

La vinculación de los módulos se realizó por medio de un análisis precedente en cuanto a la presión de poro para tomarlo de referencia y poder realizar el análisis de estabilidad en Slope/W

El tipo de análisis que se utilizó a la hora de calcular el FS fue en base al método de Morgenstern y Price (1965) (**Figura 48**) en el que se establece una relación entre los componentes de las fuerzas de interconexión (E) de tipo  $X = \lambda f(x)E$ , donde  $\lambda$  es un factor de escala y  $f(x)$ , es la función de la posición de E y de X, que estas definen una relación entre las variaciones de la fuerza X y de la fuerza E al interior de la masa deslizante. La función  $f(x)$  se escoge arbitrariamente (constante, senoide, semisenoide, trapecio, fraccionada) e influye poco sobre el resultado, pero se debe verificar que los resultados obtenidos para las incógnitas sean físicamente aceptables.

En este método la masa se subdivide en franjas infinitesimales, a las cuales se imponen las ecuaciones de equilibrio en la traslación horizontal y vertical, y de rotura en la base de las franjas. Se llega a una primera ecuación diferencial que une las fuerzas de conexión incógnitas E, X, el coeficiente de seguridad FS, el peso de la franja infinitésima  $dW$  y el resultado de las presiones neutras en la base  $dU$ .



Se obtiene la llamada “ecuación de las fuerzas”:

$$c' \sec^2 \frac{\alpha}{F_s} + tg \varphi' \left( \frac{dW}{dx} - \frac{dX}{dx} - tg \alpha \frac{dE}{dx} - \sec \alpha \frac{dU}{dx} \right) = \frac{dE}{dx} - tg \alpha \left( \frac{dX}{dx} - \frac{dW}{dx} \right) \quad (Ec.5.6)$$

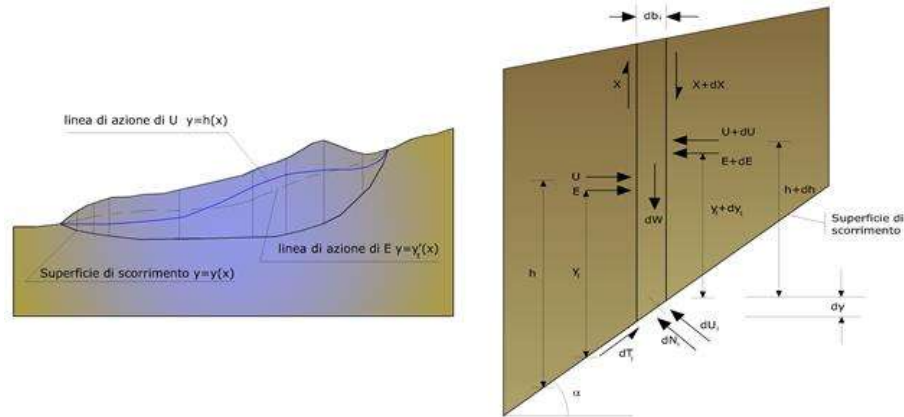


Figura 48. Acciones en la i-ésima rebanada según las hipótesis de Mongester y Price y representación del conjunto.

Fuente: <https://www.geostru.eu/>

Una segunda ecuación, llamada “ecuación de los momentos”, se escribe imponiendo la condición de equilibrio a la rotación respecto a la base:

$$X = (d(E \cdot \gamma)) / dx - \gamma dE / dx \quad (Ec. 5.7)$$

éstas dos ecuaciones se extienden por integración a toda la masa implicada en el deslizamiento.

Este método de cálculo satisface todas las ecuaciones de equilibrio y se aplica a superficies de cualquier forma.

#### 5.4.4. Umbral de precipitación.

En la última década se ha visto como la precipitación ha llegado a ser un peligro meteorológico, porque se presentan cada vez con mayor intensidad y duración, en zonas y épocas del año en las cuales no se presentaban, considerándolo algo inusual como lo acontecido en el presente trabajo.

En el presente estudio las estaciones que se encuentran en la región se localizan muy alejadas del cerro Guadalupe como se muestra en la **Tabla 7**, en el que se puede observar que se tienen 8



estaciones en operación, de las cuales la estación climatológica más cercana es la de Senguio, ubicada a 13.6 km del cerro Guadalupe.

Tabla 7. Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Fuente: Red de estaciones climatológicas CONAGUA, (2018).

ESTACIONES OPERANDO						
Calve	Nombre	Ubicación	Altura (msnm)	Años de registro		Distancia aprox. al C.G. (km)
16121	SENGUIO	E= 358305.45m, N= 2182448.00m	2291	32	1969-2016	13.64
15197	CUESTA DEL CARMEN	E= 374277.13m, N= 2152474.45m	2768	38	1974-2015	20.36
16192	LA ENCARNACION	E= 353646.41m, N= 2147095.67m	1734	38	1974-2015	26.08
16258	PRESA TUXPAN	E= 3244494.89m, N= 2161218.66m	1743	28	1982-2015	22.49
16514	JARIPEO	E= 344538m, N= 2173549m	1887	29	1987-2015	20.64
15070	PRESA BROCKMAN	E= 380539m, N= 2186343m	2929	48	1969-2017	22.2
16061	LAGUNA DEL FRESNO	E=351738.22m, N= 2191785.34m	2095	70	1947-2016	25.03
16036	PRESA_EL_BOSQUE (CFE)	E=354733.35m, N= 21433821.71m	1905	52	1952-2015	28.65
ESTACIONES SUSPENDIDAS						
Calve	Nombre	Ubicación	Altura (msnm)	Años de registro		Distancia aproxima al C.G.
16079	MELCHOR OCAMPO	E=360156.67m, N= 2165915.80m	2323	18	1961-1988	6.71
15230	PALO AMARILLO	E=372440.42m, N= 2173206.56m	3059	11	1977-1987	8
15334	PALO SECO	E=378324.75m, N= 2159574.28m	2935	10	1982-1993	17.31
16134	TUXPAN	E=347899.04m, N= 2164178.15m	1788	42	1941-1985	18.28
16033	CHINCUA	E=365035.71m, N= 2186819.83m	24321	41	1966-2006	16.5
16213	IRUMBO	E=345057.10m, N= 2178869.22m	2195	26	1978-2007	21.95
16152	CIUDAD HIDALGO	E=337558.40m, N=2180873.23m	2332	67	1922-1988	29.28

Para el caso de estudio nos basamos en la estación utilizada en el trabajo realizado por Figueroa (2013), el cual realizó el análisis de ocho estaciones meteorológicas que contaban con pluviómetro para medición de la lluvia que se encontraban cercanas al municipio de Angangueo, y conocer la aleatoriedad de la ocurrencia del fenómeno que se presentó de febrero del 2010. Utilizó la estación meteorológica “Chinca-Senguio” (Figura 49) dado que contaba con mejores datos al estar en operación y ser la más cercana a la zona en estudio, presentando los datos de precipitación atípica durante los días del evento del 1 al 5 de febrero del 2010 presentando una duración de 56 horas, lo que produjo severas afectaciones en el municipio de Angangueo, y que dichas lluvias representaron para el municipio el 35% de la precipitación media anual correspondiente a 360 mm (Tabla 8), por lo que en esta estación se basó para tomar los registros empleados en los análisis del presente estudio.



Figura 49. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis pluviométrico.  
 Fuente: Figueroa (2013).

Tabla 8. Registro de la lluvia de febrero de 2010 por el pluviógrafo “Chincua-Senguio”, para los días del uno al cinco. Fuente: Estación 16033 Chincua-Senguio.

Hp registro del pluviógrafo "Chincua-Senguio"					
Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Total
2 mm	38 mm	29 mm	168 mm	123 mm	360 mm

En el histograma de precipitación diaria que se muestra en la **Figura 50**, podemos observar cómo se presentaron precipitaciones durante los días 13 al 17 de enero del 2010 con valor máximo de precipitación de 16 mm en los días 15 y 16 de enero que en suma representan 47 mm, dichos valores no son de gran relevancia a los que se apreciaron en los primeros días del mes de febrero.



Figura 50. Histograma de precipitación en la estación 16033 Chincua-Senguio del 12/01/2010 a 13/02/2010.  
 Fuente: Datos de la Estación 16033 Chincua-Senguio.



La precipitación que se analizó, es referente a los primeros días del mes de febrero, donde se observa cómo se comenzó a presentar la precipitación durante el día 01 de febrero con un valor de 2 mm, y que se fue prolongando en los siguientes días hasta el 5 de febrero.

Durante el 04 de febrero se tuvo un registro de 168 mm de precipitación, siendo este valor el máximo del que se tuvo registro en el evento del 2010. Motivo por el cual entre el final del 3 de febrero o inicio del 4 del mismo se presentó el PRM en la ladera SE del Cerro Guadalupe.

Estas precipitaciones se consideraron atípicas dado que no se habían presentado en dichas temporadas del año, como lo demuestra el histograma en la **Figura 51** desde el 2005 al 2010.

Cabe mencionar que, en Suarez (2009) tomado en Figueroa (2013), refiere que una magnitud de anomalía climática se puede realizar a partir de una relación entre la precipitación de la anomalía y la lluvia promedio. Teniendo en cuenta esto, si utilizamos de referencia el valor de precipitación del día 4 de febrero del 2010; se obtiene un valor de  $M_A$  (magnitud de la anomalía climática) de 3.175.

Este valor indica que la anomalía climática es de importancia ya que el valor mayor a 2 relaciona a la generación de deslizamientos como se menciona en Figueroa 2013, el cual también indica que entre mayor sea  $M_A$  la denudación por deslizamiento es mayor.

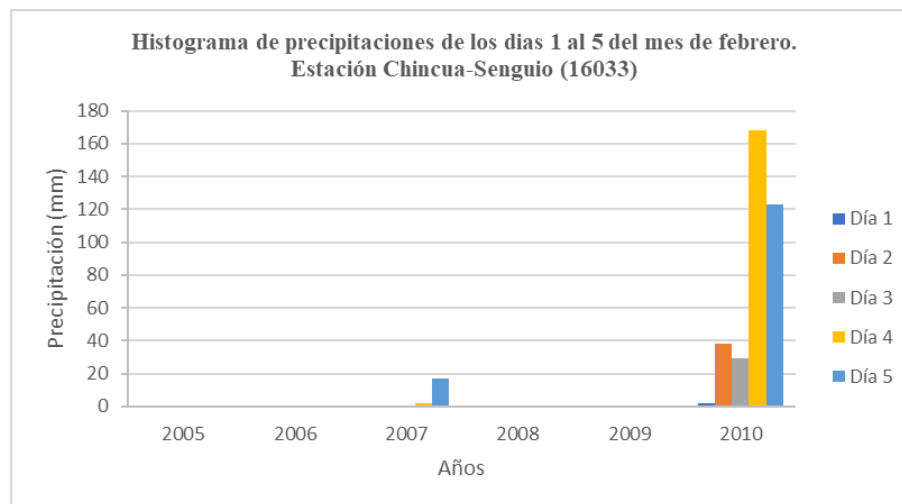


Figura 51. Histograma de precipitación en la estación 16033 Chincua-Senguio del 2005 al 2010.

Fuente: Datos de la Estación 16033 Chincua-Senguio.



Además del análisis efectuado para la precipitación atípica que se suscitó en la región, esta se modificó en cuanto al tiempo de duración de la misma, pero manteniendo la cantidad de lluvia precipitada en el lapso de tiempo considerado, el cual fue de 2 y 8 días de duración.

En relación a la distribución de la precipitación para 2 y 8 días, se muestran en la [Tabla 9](#), donde se observa la distribución de la precipitación en relación al tiempo, así como el caudal utilizado para cada tiempo considerado en los análisis realizados en el presente estudio; y las gráficas de los mismos ([Figura 52](#)).

Los resultados del análisis de la modelación numérica implementando los resultados de los umbrales considerados se presentan en el capítulo 7.

Tabla 9. Datos utilizados en el análisis de la distribución de precipitación para 2, 5 y 8 días.

Umbral (días)	Tiempo (días)	Caudal de agua (m <sup>3</sup> /seg/m <sup>2</sup> )
<b>2</b>	0.4	0.000000026
	0.8	0.000000980
	1.2	0.000000826
	1.6	0.000004912
	2	0.000003892
<b>5</b>	1	0.000000023
	2	0.000000440
	3	0.000000336
	4	0.000001944
	5	0.000001424
<b>8</b>	1.6	0.000000013
	3.2	0.000000310
	4.8	0.000000216
	6.4	0.000001144
	8	0.000001024

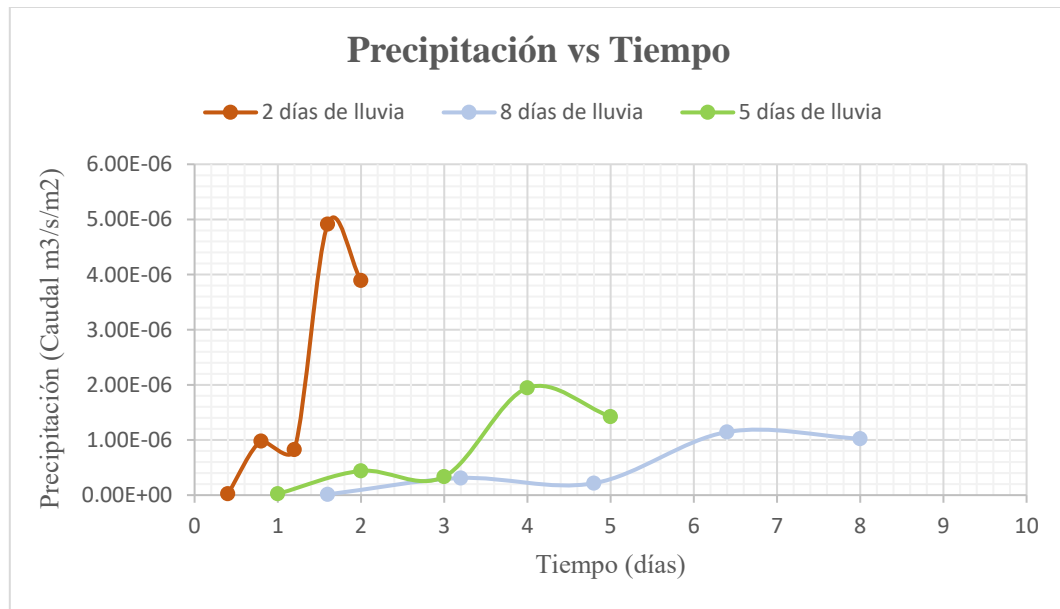


Figura 52. Grafica de la precipitación en relación a los tiempos de duración del caso real de 5 días y de los modificados para 2 y 8 días.



### 6.1.2. Pendientes

La clasificación de los rangos de pendientes en la ladera se realizó de la siguiente manera: Pendientes planas en un rango de 0-7°, Suaves 7-15°, Moderadas 15-25°, Pronunciadas 25-40° y Muy pronunciadas > 45°.

Presentándose en su mayoría rangos de pendientes de pronunciadas en su parte central a muy pronunciadas para la zona superior, siendo esta la zona en donde tuvo origen el deslizamiento que evolucionó a flujo de detritos a lo largo de la ladera; estos rangos de pendientes se observan en la **Figura 54**.

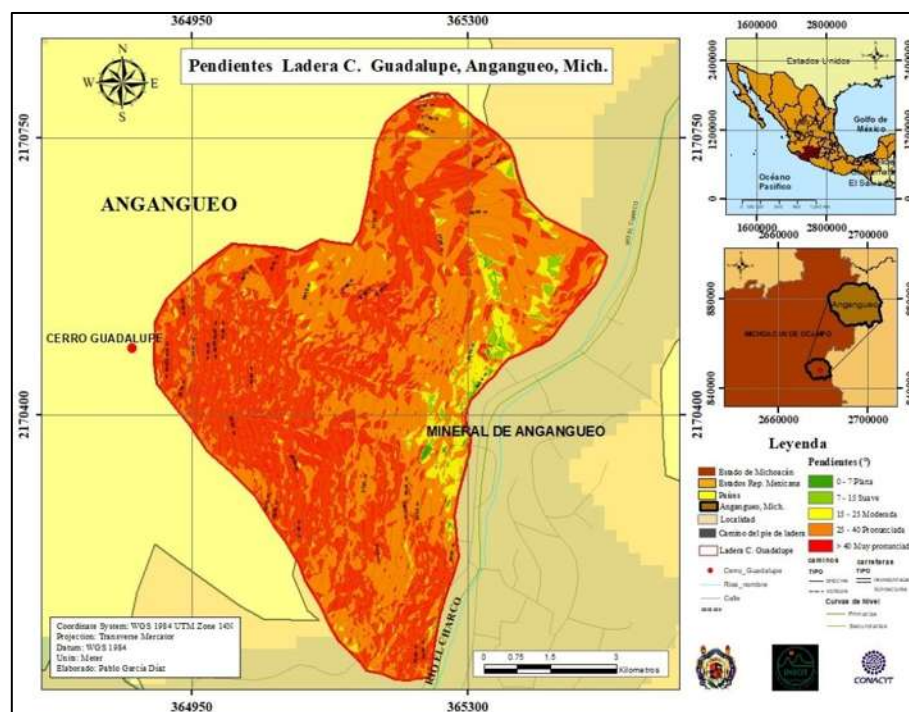


Figura 54. Mapa de pendientes del Cerro Guadalupe en Angangueo, Michoacán.

### 6.1.3. Orientación de la ladera

Se realizó el mapa de orientaciones de la ladera en estudio en el que se observó que esta presenta una orientación predominante hacia el Este y Sureste.

En general sobre la zona superior se tiene una orientación hacia el sur y suroeste. Sobre la zona central esta tiene una orientación sureste, y mientras que para la zona inferior de la ladera en el mapa (**Figura 55**) se observan orientaciones hacia el este.





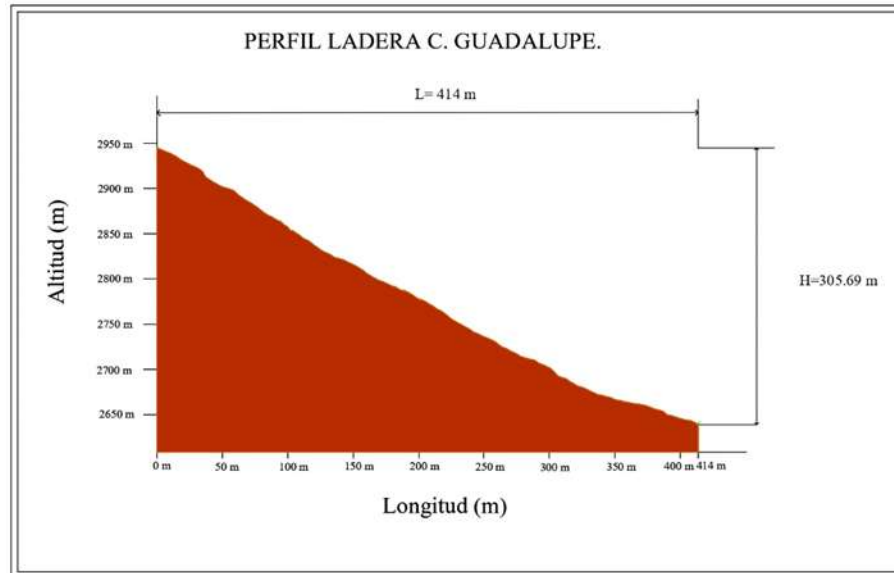


Figura 56. Morfometría ladera Cerro Guadalupe.

Como se mencionó, la ladera tiene una orientación SE sobre el cerro Guadalupe, en la que se analizó el PRM ocurrido en febrero del año 2010. Con el fin de conocer de mejor manera las características que presenta la zona, se llevó a cabo un levantamiento topográfico, teniendo como resultado que el área a estudiar con el recorte que se efectuó a la nube de puntos es de 20.73 ha, con un perímetro de aproximadamente 2,081.69 m, presentando grandes pendientes en la parte alta de la ladera llegan a superar los 40°, mientras que para la parte media, se tienen pendientes que van en un rango de 25° a 40° y solo la parte baja tiene pendientes de 15° a 25°.

Algunos datos obtenidos sobre la morfometría de la ladera se muestran en la [Tabla 10](#).

Tabla 10. Datos morfométricos de la ladera del cerro Guadalupe, Angangueo, Michoacán.

Parámetros morfométricos de la ladera del cerro Guadalupe.	
Área (km <sup>2</sup> ):	0.207
Perímetro (km):	2.082
Longitud del PRM (km):	0.392
Pendiente promedio (%):	25-40
Elevación media (msnm):	2,795
Altitud mínima (msnm):	2,622
Altitud máxima (msnm):	2,969
Orientación promedio (%):	SE

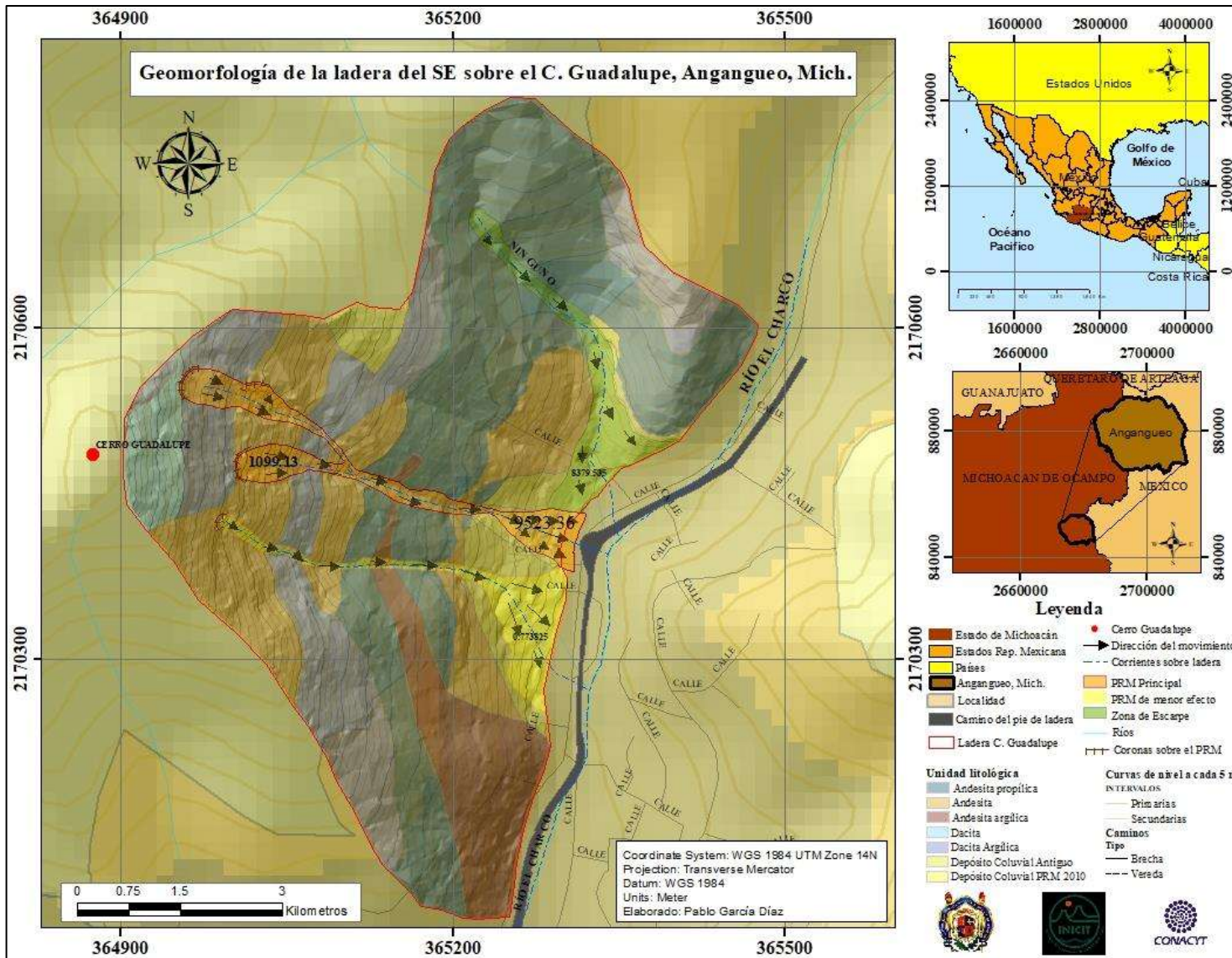


Figura 57.

Geomorfología de la ladera del cerro Guadalupe.

En la **Figura 57** se muestra el mapa de la morfometría de la ladera SE del Cerro Guadalupe, observando el PRM principal remarcado en un polígono de color rojo, con sus dos zonas de desprendimiento, la primera se aprecia sobre la parte más elevada y más hacia el NW de la ladera, mientras que la otra, a una menor elevación y hacia el sur de la primer zona, además de un deslizamiento de menor relevancia el cual se muestra en un polígono de color amarillo sobre el sector sur de la ladera.

En la zona Norte de la ladera se encuentra una gran depresión morfológica, la cual corresponde a una corriente de agua intermitente y que llega a desembocar sobre el Río Charco, que fluye sobre las faldas de la ladera, y que además, sobre esta zona se encuentra parte de la localidad de mineral de Angangueo.

## 6.2. Geología local.

Como se mencionó, la geología es uno de los factores condicionantes de los PRM, es por ello, que en el presente trabajo se llevó a cabo su determinación durante los trabajos de campo, identificando la litología presente en la zona de estudio al obtener varios puntos de control los cuales se presentan en la **Figura 58**.



Figura 58. Ubicación de puntos de control para determinar la geología y litología de la zona de estudio del cerro Guadalupe, en Angangueo Michoacán.

La litología que se encontró en la ladera es la siguiente:

**A .Andesitas** de más de 212 m de espesor. Esta presenta diferentes grados de alteración hidrotermal de propílica a argílica; la primera aflora sobre la base en su sector sur sobre las coordenadas X= 365253 m, Y= 2170091 m y Z= 2611 msnm, con un espesor de 37 m aproximadamente; se observa con buena estructura en tonalidades marrones, verdes y blancas. La muestra de mano presenta un color gris con cristales de cuarzo en un 40%, feldespatos en un 20% y fenocristales y piroxenos en un 10%, inmersos en una matriz afanítica (Figura 59); y vuelve a observarse sobre las coordenadas X=365093 m, Y=2170476 m y Z= 2769 msnm, con un espesor de aproximadamente 10 m.



Figura 59. Afloramiento de la roca andesita argílica sobre la base del Cerro Guadalupe en su sector sur, apreciándose al circular por la vialidad de la calle Guerrero.

La andesita propilitica y sana, se localiza sobre la parte media de la ladera en una forma alternada, las cuales presentan piroxenos y una textura afanítica, con presencia de epidota de color verde que altera al anfíbol masivo y muy fracturado en un color café-amarillento con manchas de color naranja en las fracturas de la misma, la textura es afanítica con poca porosidad en la roca intemperizada mientras que en la roca sana presenta una coloración gris con manchas rojizas, y se observan piroxenos con la misma textura afanítica con un fracturamiento tipo enrejado (Homnky) (Figura 60), entre las coordenadas X=365209 m, Y=2170343 m y Z=2655 msnm a la X= 365063 m, Y=2170508 m y Y=2772 msnm, presentando un espesor de más de 165 m esta parte de la unidad de andesitas.



Figura 60. Depósito de Andesita con una notada diferencia en su grado de alteración.

**B. Dacitas**, presentan alteración hidrotermal del tipo argílica muy intemperizado con diferentes grados de alteración (Figura 61). La dacita argílica exhibe un color marrón/ocre muy fracturado, mostrando un **RQD** menor del 10% y llegando a convertirse en un suelo SM, además, en algunos puntos se aprecia fragmentación mecánica, conocida como descamación o exfoliación esferoidal (por la formación de escamas u hojas de forma curvadas en la roca, que se separan sucesivamente en la masa rocosa proveniente de la matriz rocosa original, llegando a dejar a esta en una forma esferoidal cada vez menor (Figura 62)).

La dacita sana representa una franja de un espesor superior de 12 m, que presenta un color grisáceo, con desarrollo de plagioclasas de unos 2 mm, con poca alteración hidrotermal de argílica a propilítica en color verde, además de que su composición mineralógica es de cuarzo + feldespato + piroxeno + piritita, con una textura afanítica.



Figura 61. A) Roca con poca alteración presentando color café-rojizo poco alterada con planos de fracturas (orientación  $345^{\circ}\text{N}/72^{\circ}$ ;  $40^{\circ}\text{N}/78$ ) y B) Roca dacita color amarillento alterada hidrotermalmente y con fracturación de forma enrejada.

Esta unidad se localiza entre las coordenadas  $X= 365063$  m,  $Y=2170508$  m y  $Z=2772$  msnm y  $X=364935$  m,  $Y=2170422$  m y  $Z= 2808$  msnm, correspondiente a un espesor superior de 70 m.



Figura 62. Depósito de dacita muy alterada y fracturación mecánica esferoidal.

Esta unidad presenta un afloramiento en las coordenadas  $X=365093$  m,  $Y=2170476$  m ,  $Z=2769$  m, representando un espesor superior a los 21 m, teniendo un contacto con la unidad de andesita como se muestra en la **Figura 63**.



Figura 63. Afloramiento de dacita argílica alterada hidrotermalmente muy fracturada y en contacto con la unidad de andesitas.

**C. Depósitos de suelos Coluvial.** Esta unidad litológica está compuesta por líticos de composición andesítica y dacítica, de forma angulosa-subangulosa con diferentes tamaños, comprendidos entre 0.10 m a 1.0 m, inmersos en una matriz arenosa de grano fino en un color café marrón (**Figura 64**). Esta unidad se puede observar sobre todo el perfil de la ladera, pero presentando una variación en su espesor de 0.5 m a 2 metros en promedio, pero que en algunas

zonas se llega a observar un espesor de hasta 6 m; la unidad se puede observar desde las coordenadas  $X=365301$  m,  $Y=2170400$  m y  $Z=2643$  msnm y  $X=364932$  m,  $Y=2170559$  m y  $Z=2888$  msnm.

Además, del depósito coluvial que se movilizó en el evento del 2010, el cual se puede apreciar sobre la base del cerro en el sector SE y uno depósito coluvial antiguo (Figura 65).



Figura 64. Depósito coluvial sobre la coordenada  $X=365093$ m,  $Y=2170476$ m y  $Z=2769$  msnm, de un espesor superior a los 6 m, presentando clastos de composición andesítica de forma angulosa con tamaños de 0.10 m a 0.90 m inmersos en una matriz de suelo arenoso de color café.



Figura 65. a) Afloramiento donde se aprecia el depósito de andesita y en la parte baja del mismo un depósito coluvial antiguo; b) Depósito de material coluvial movilizado en el deslizamiento del 2010.



**D. Suelos sobre la zona del deslizamiento.** Estos se aprecian en las coordenadas X=364954 m, Y=2170546 m y Z=2880 msnm (Figura 66). El perfil, justo en la zona de desprendimiento, está compuesto por el depósito coluvial que presenta una variación en el espesor que va desde 0.35 m a 2.00 m, siendo este espesor mayor en los flancos, seguido de un depósito de caída de lapilli con espesor 0.35m a 1.0 m, correspondiendo este a un suelo arenoso con presencia de limos, seguido de un depósito de suelo degradado de la roca dacítica argílica (que presenta nodos ferromagnesianos) cuyo espesor es de aproximadamente 0.5 m a 1.5 m, ya que después de este espesor la roca esta menos intemperizada hidrotermalmente, por lo que es más densa y de textura afanítica presentando un color marrón-ocre; este perfil se observa en la Figura 67.

La pendiente que se tiene es considerablemente elevada de aproximadamente entre 49° a 54° entre estos depósitos de suelo.

Con los datos recabados en campo y el mapa topográfico de la ladera se elaboró el mapa litológico (Figura 68) y el perfil de este (Figura 69).



Figura 66. Se presenta un depósito coluvial, un depósito de caída de lapilli; lo cuales fueron los materiales que se movilizaron sobre la superficie de la roca dacita alterada hidrotermalmente durante el deslizamiento del 2010.



Figura 67. Perfil estratigráfico sobre la zona del deslizamiento en la ladera SE del Cerro Guadalupe

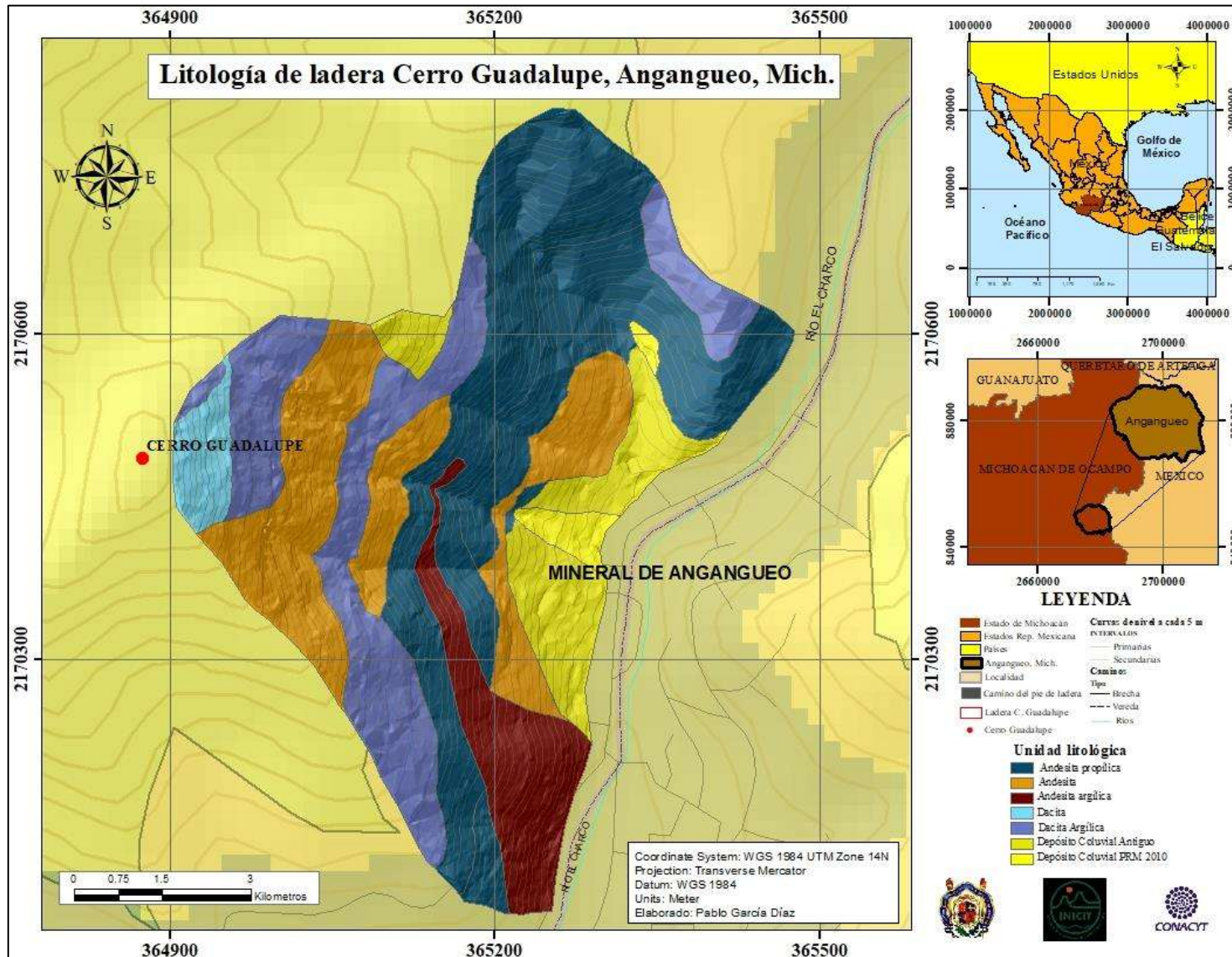
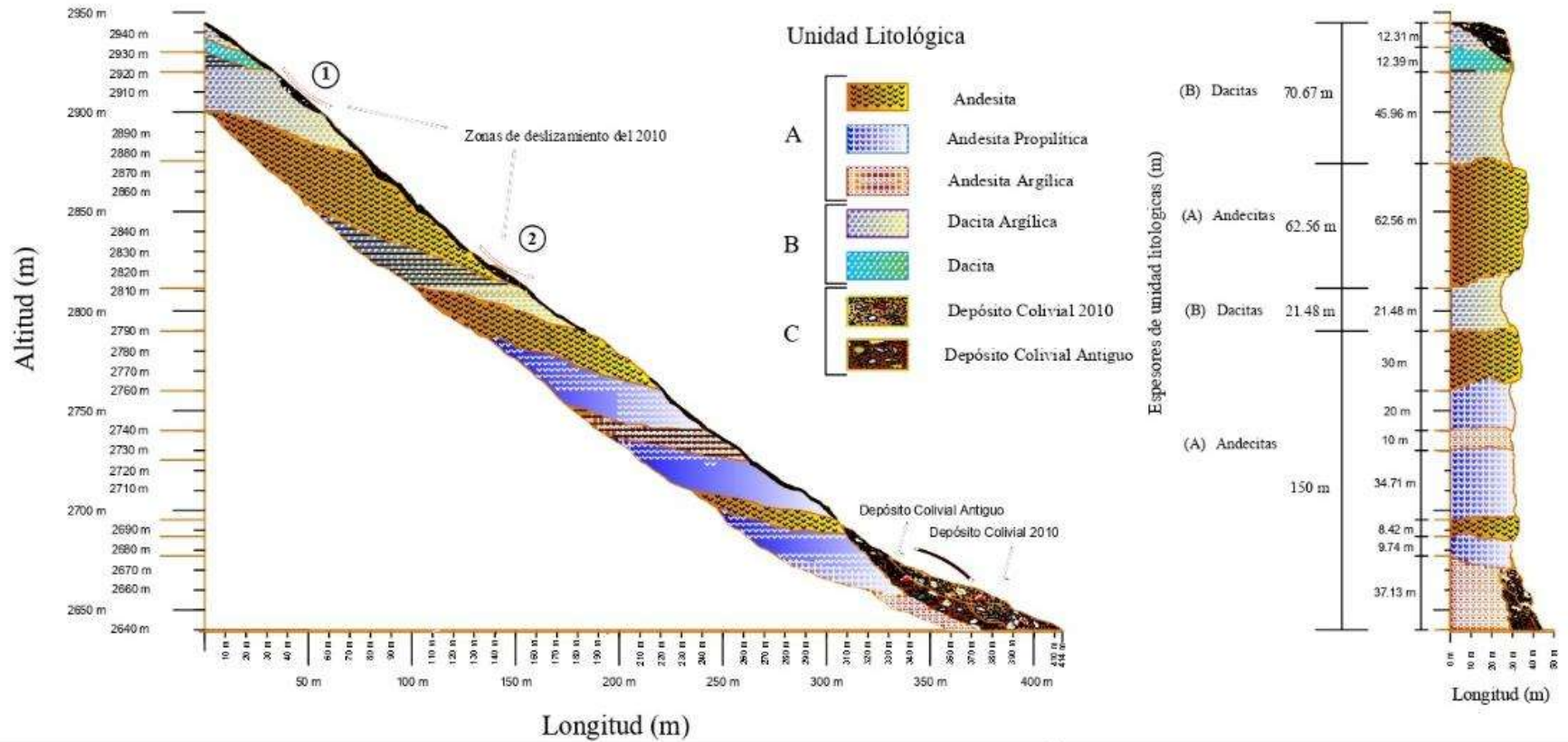


Figura 68.

Mapa Litológico del cerro Guadalupe, en Angangueo Michoacán.

### Perfil litológico de la ladera SE del cerro Guadalupe en Angangueo, Mich.



La andesita presente en la ladera pertenece a los flujos de lava Andesítica (TmA-TA) y su edad corresponde al Mioceno, mientras que los depósitos de dacita pueden ser pertenecientes a la unidad de Dacita el Fraile (TmDA) ya que se presenta de manera aislada sobre la región y que aparece de manera discordante en el municipio de Angangueo y su edad pertenece al Mioceno tardío y el Plioceno temprano por dataciones realizadas a muestras obtenidas en el vecino municipio de Ocampo.

**Elaboró: Ing. Pablo García Díaz**

Figura 69. Perfil litológico obtenido con los datos recabados en las visitas a campo.

## Capítulo 7. Caracterización del deslizamiento

### 7.1. Tipos de Inestabilidad

#### 7.1.1. Tipología

El PRM que se presentó sobre la ladera SE del Cerro Guadalupe, inició como un deslizamiento traslacional (*Planar Slide*) con orientación NW-SE, sub superficial con plano de ruptura a no más de 3m de profundidad. Este último corresponde al espesor total del material colapsado (suelo, coluvial, y roca intemperizada). La continuidad del movimiento traslacional descendente sobre la pendiente pronunciada, en conjunto con la sobresaturación provocada por la lluvia intensa, generó la licuefacción del material en movimiento transformándose en un flujo de detritos (*Debris Flow*) (Figura 70). Este último consistió en la mezcla de material mal clasificado y de distintos tamaños (desde arcillas hasta grandes clastos), incluyendo materia orgánica; que se desplazaron ladera abajo arrastrando material de fondo del barranco y arrancando otro más de las paredes, con lo que se incrementó el volumen, velocidad y fuerza de impacto. Con capacidad de transportar troncos de árboles, rocas e incluso autos en suspensión (Figuroa, 2013).

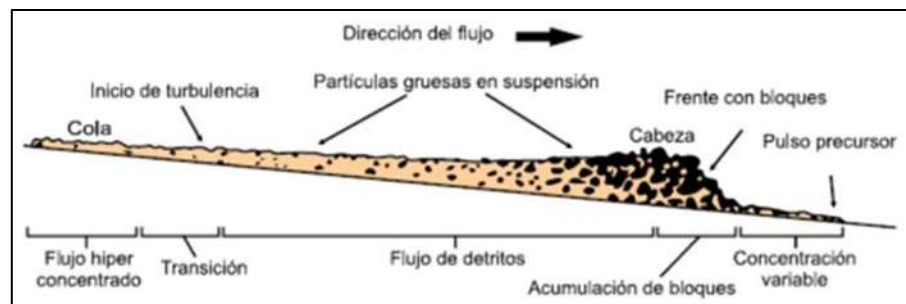


Figura 70. Corte esquemático típico de un flujo de detritos.

Fuente: "Movimientos en masa en la región andina", 2007 en Bucarey Aichele, N. C. (2018).

#### 7.1.2. Morfología y morfometría

El Deslizamiento presentó dos zonas de desprendimiento identificadas en campo por sus respectivos escarpes de desprendimiento. La primera (1) se presentó con dos coronas de desprendimiento: la primera ubicada a una altitud de 2, 915 msnm y la segunda a 2,855 msnm;



está última mantenía aún el cuerpo deslizado, es decir, no alcanzó a transformarse en flujo de detritos. La segunda (2) zona de desprendimiento y movimiento traslacional, se encuentra a una altitud menor siendo esta de 2,870 msnm hacia el sur de la ladera. Las masas deslizadas de manera traslacional evolucionaron, como ya se mencionó, a un flujo de detritos aproximadamente a partir de la cota 2,775, canalizándose dada la morfología cóncava y continuando el flujo hasta el pie de la ladera en donde se dispersó en forma de abanico coluvial. Una parte de este abanico llegó al cuerpo del río Charco, transformándose ahora en un flujo hiperconcentrado que desbordó el canal, fluyendo sobre las calles hasta depositarse en el atrio del templo de la Inmaculada Concepción, en el centro histórico del poblado de Mineral de Angangueo, todo esto se muestra en el mapa geomorfológico (Figura 71).

Además del **PRM** principal, se presentó uno de menor dimensión y paralelo a éste, hacia el sur, con menor área de desprendimiento, pero un movimiento descendente muy similar, al ser canalizado dada la morfología en la zona media al presentar un ancho menor, pero en la zona del pie de ladera abarco un área mayor en forma de abanico como se pudo observar sobre el mapa geomorfológico.

Los resultados morfométricos muestran que el área del **PRM** es de 0.952 ha (9,523.36 m<sup>2</sup>), teniendo una longitud de 392 m, medida de la corona principal a la zona de acumulación en el pie de ladera, donde actualmente se encuentra el muro de contención basado en gaviones. Como se puede apreciar se tienen dos zonas de desprendimiento dentro del mismo PRM de tipo traslacional, si se tomara la segunda zona de desprendimiento hasta la zona de acumulación, se tiene una longitud de 315.693 m, que de la misma forma se toma la medida desde la corona hasta el pie de la ladera.

El perímetro de todo el **PRM** es de 1,099 m, en un desnivel superior a los 280 m. Las pendientes sobre la zona de desprendimiento y movimiento traslacional son superiores a 40° llegando a 54° en la zona de la corona principal, mientras que en la parte media y baja presenta pendientes de entre 25°-40°.

La zona del desprendimiento presenta una superficie plana (LC), la zona media tiene una superficie cóncava (CC), y para la zona del pie de la ladera se tiene un perfil convexo (CV) Figura 72.

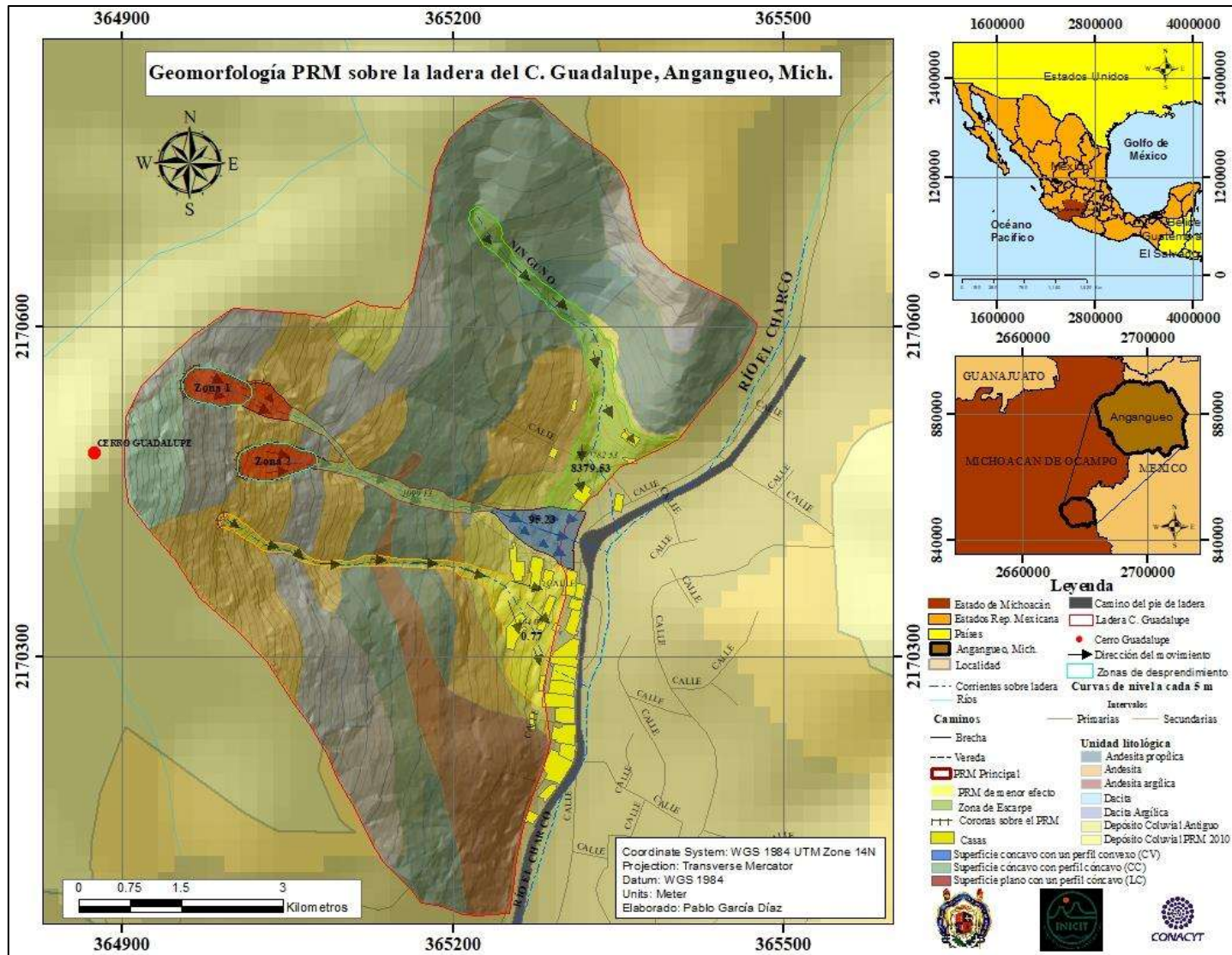


Figura 71. Mapa de la morfología del deslizamiento sobre la ladera del Cerro Guadalupe.

Como ya se mencionó, durante el evento de febrero del 2010 se pudo apreciar un segundo PRM dentro de la ladera Sureste del Cerro Guadalupe, mucho más pequeño que el PRM principal, y que no tuvo tantas afectaciones. Este presenta un área aproximada de 0.774 ha (7740 m<sup>2</sup>), con un perímetro de 864 m y una longitud de 330 m. Tiene una zona de desprendimiento menor y acumulación un poco mayor, debido a la morfología de la zona y que fue modificado por los mismos habitantes para utilizarlo como un campo de futbol pequeño; este movimiento del material presentó el mismo sentido que el del PRM principal.



Figura 72. Imagen de la ladera en que visualizamos su morfología.

Se sabe que el ángulo del desplazamiento  $\alpha$  es el que determina el volumen de material de un flujo y su velocidad, ya que a menor ángulo, el volumen total puede ser mayor, pero la velocidad del movimiento tiende a ser menor. Sin embargo, la velocidad depende de la pendiente de la zona de desprendimiento. La ladera en estudio presenta pendiente superior a 27°; y la longitud del recorrido de 380.65 m como lo observamos en el perfil morfométrico (Figura 73).

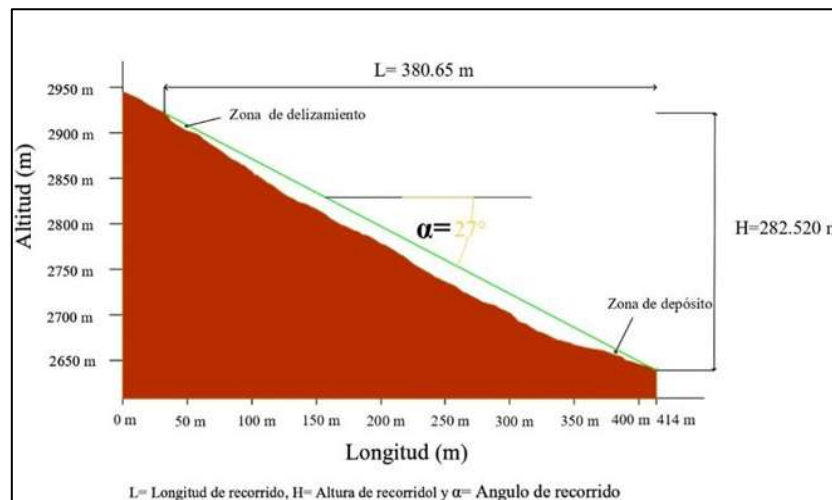


Figura 73. Perfil morfométrico del deslizamiento de la ladera en estudio.





## 7.2. Caracterización del deslizamiento

En la **Tabla 11** se presentan los parámetros morfométricos del **PRM** sobre la ladera del cerro Guadalupe, y con esto conocer de una mejor manera las dimensiones que presenta el proceso de remoción en masa.

Tabla 11. Parámetros morfométricos del deslizamiento en el Cerro Guadalupe del 2010.

Parámetros morfométricos del proceso de remoción en masa (PRM).		
Zona de Deslizamiento	1	2
Ancho de la masa desplazada $W_d$ (m):	30.74	32.71
Ancho de la superficie de la falla $W_r$ (m):	31.15	32.45
Longitud de la masa deslizada $L_d$ (m):	63.65	72.35
Longitud de la superficie de falla $L_r$ (m):	53.85	60.85
Profundidad de la masa desplazada $D_d$ (m):	6 aprox.	5 aprox.
Profundidad de la superficie de falla $D_r$ (m):	4.5 aprox.	3 aprox.
Longitud total $L$ (m):	65	75
Volumen de desplazamiento ( $m^3$ ):	9,434.83	7,405.17
$Vol_{des} = (D_r \times W_r \times L_r) F_{ex}$	F <sub>ex</sub> = Factor de expansión del suelo 1.25-1.30	

### 7.2.1. Energía Cinética del PRM

La energía cinética se representa mediante el símbolo  $E_c$  (a veces también  $E_-$  o  $E_+$  o incluso  $T$  o  $K$ ) y su fórmula clásica de cálculo es  $E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  donde  $m$  representa masa (en Kg) y  $v$  representa velocidad (en m/s). La unidad de medida de la energía cinética es Joules (J):  $1 J = 1 kg \cdot m^2/s^2$ .

Con base en el perfil morfométrico (**Figura 73**) se tiene que la altura de la ladera ( $H$ ) es 283 m, y la longitud ( $L$ ) de 381 m.

Si se considera una masa de 1 kg y una velocidad de 0.05 m/s se tendría una energía cinética de 0.00125 J

$$E_c = \frac{1}{2} * 1 \text{ kg} * (0.05 \text{ m/s})^2 = 0.00125 \text{ J} \quad (Ec. 7.1)$$

$$Pendiente \text{ de la ladera} = \frac{283 \text{ m}}{381 \text{ m}} = 0.742 \text{ o } 74.2\%$$



Y la energía potencial gravitatoria se determina utilizando la formula siguiente:

$$E_p = m * g * h = 1\text{kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 283\text{m} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Donde:

m = masa (kg)

g= gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

h= altura (m)

Si consideramos una masa de suelo de 1 kg y la altura que presenta la ladera de 283 m, la energía potencial que se tendría sería de 2,776.23 J.

$$E_p = 1 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 * 283 \text{ m} = 2,776.23 \text{ J} \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Al realizar la suma de estas energía se tiene la energía mecánica.

$$E_m = E_p + E_c = 2,776.23 \text{ J} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

En base a los datos obtenidos del peso volumétrico de los depósitos de suelo y considerando como más desfavorable el del depósito coluvial con un valor de  $1.99 \text{ g/cm}^3$  ( $1990 \text{ kg/m}^3$ ), multiplicándolo por el volumen deslizado sobre la zona 1 de desprendimiento, siendo este de  $9,334.83\text{m}^3$ . Se tiene una masa de 18775311.7 kg, resultando en una energía cinética de 23469.14 J; y una energía potencial de  $5.1572 \times 10^{10}$  J. Por lo que la energía mecánica generada corresponde a  $5.1572 \times 10^{10}$  J.

Esta sería la energía con la que se presentó el movimiento de la masa de suelo sobre la superficie de la ladera sin considerar la fricción y ningún otro agente de transporte, ya que si se considerara lo anterior, este valor se vería reducido, al impactar la masa de suelo sobre la vegetación y además la fricción sobre la superficie de deslizamiento a lo largo de la pendiente de la ladera.

Sobre el tema se hace mención en Figueroa (2013), que dado el relieve escarpado y de una topográfica irregular predominante en la zona de estudio, este se ve reflejado en mayor energía potencial, por consiguiente mayores fuerzas de impacto sobre la infraestructura de las zonas que se ven afectadas por PRM; y considerando los elevados ángulos de las laderas como en el caso de la del Cerro Guadalupe en hacia el SE, con inclinación superior a los  $40^\circ$  en la zona de



deslizamiento, y aunado a la cantidad de lluvia, son relevantes para presentarse una alta cantidad de energía cinética; la cual deberá ser mitigada mediante obras de contención y retención de los deslizamientos y flujos de detritos sobre ladera.

### **7.3. Modelización numérica.**

#### **7.3.1. Propiedades Físico-Mecánicas.**

Se obtuvieron parámetros físico-mecánicos de los suelos que se vieron involucrados en el PRM, y se identificó la columna litológica en la zona de desprendimiento que se describe a continuación, de la base a la cima.

- (i) Regolito o capa de roca dacítica argílica suelta e intemperizada, ligeramente consolidada, y fracturada de una textura fanerítica presentando un color marrón, con espesor medio de 1.5 m, que sobreyace a la roca sana de la cual se origina.
- (ii) Depósito de caída de textura arena-limosa (SM), permeable y no consolidado, de espesor promedio de 1 m; color beige-amarillento y que en presencia de humedad tiene un color café-claro.
- (iii) Depósito coluvial conformado por fragmentos líticos angulosos y subangulosos, de entre 10 cm y 20 cm de diámetro promedio, inmersos en una matriz areno-limosa de color café-rojizo y espesor promedio de 2 m. Sobre los depósitos de suelo se tiene la capa vegetal la cual varía también en su espesor de entre 0.15 m a 0.20 m.

Todos estos depósitos se muestran en la **Figura 67** del capítulo 6.

#### **7.3.2. Resultados de las pruebas Físico-Mecánicas**

Los valores de PVHC y Humedad de Campo ( $W_c$ ) revelan que el depósito coluvial tiene un mayor contenido de agua con un 23.91%, mientras que el depósito de regolito o roca dacítica intemperizada apenas presenta 12.86 % de agua. Esta diferencia de humedad podría significar que el contacto entre estas dos unidades funcionó como superficie de debilidad o de deslizamiento de los materiales superiores (coluvial y de caída). La propuesta anterior se refuerza con el hecho de que el regolito, aunque se observe fuertemente intemperizado, presenta mayor densidad que el material sobreyacente e inhibe el flujo de agua. Los depósitos de caída y coluvial, son menos



densos (Tabla 12) y permiten mayor flujo de agua, siendo por ello más susceptibles a presentar bajas resistencias mecánicas durante periodos de lluvia excepcional.

En la clasificación de los suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se obtuvo lo siguiente:

Tabla 12. Propiedades físicas de los materiales involucrados en el PRM.

Estrato	Wc	PVHC	PVSS	Granulometría	LL	LP	Ip	Clasificación de la fracción fina	Ss	SUCS
	(%)	(gr/cm <sup>3</sup> )	(gr/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)	(%)			
Depósito Coluvial	23.91	1.99/2.39	1.22	Fc= 15, G=22, S=33 y F=30	34.8	4.22	10.58	ML	2.61	SM-Fc
Depósito Caída	21.65	1.838	1.19	G=22, S=42 y F=36	33.85	5.35	8.5	ML	2.65	SM
Depósito Dacita	12.86	2.240	1.31	G=13, S=66 y F=21	38.19	29.8	8.39	ML	2.69	SM

Wc=Contenido de agua natural; PVHC=Peso Volumétrico Húmedo de Campo, PVSS= Peso Volumétrico Seco Suelto; SUCS= Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; S= arenas, Fc= Fragmentos de roca chicos; G=gravas; F=finos; LP=Límite de Plasticidad; LL= Límite Líquido; IP= Índice Plástico, ML= Limo de ligera plasticidad; Ss=Densidad de sólidos; SM=arena limosa.

La granulometría de los materiales involucrados destaca que la textura predominante en todos ellos es la arena (S). En el caso del depósito coluvial se tienen además fragmentos de roca que van de 1 a 20cm. Con base en los resultados de los límites de consistencia, se observa que en los tres tipos de estratos el material fino corresponde a un limo de baja plasticidad (ML) (Tabla 12).

La prueba de consolidación Unidimensional (Norma UNE 103 405 94), se efectuó para cada una de las muestras. En la Figura 74 se muestra el desarrollo detallado y resultado obtenido para el depósito coluvial que alcanzó un esfuerzo de preconsolidación de 0.85 Kg/cm<sup>2</sup>; este valor se obtuvo gráficamente al ubicar un punto de máxima curvatura sobre el que se traza una recta tangente (flecha verde); posteriormente, a partir de ese mismo punto de máxima curvatura se traza una horizontal (flecha amarilla); luego se traza la bisectriz de las rectas antes mencionadas (flecha negra); y se prolonga la recta de la curva normalmente consolidada (flecha morada), para finalmente, determinar el esfuerzo de preconsolidación con la intersección entre esta recta y la bisectriz, proyectando esta intersección en el eje de las abscisas.

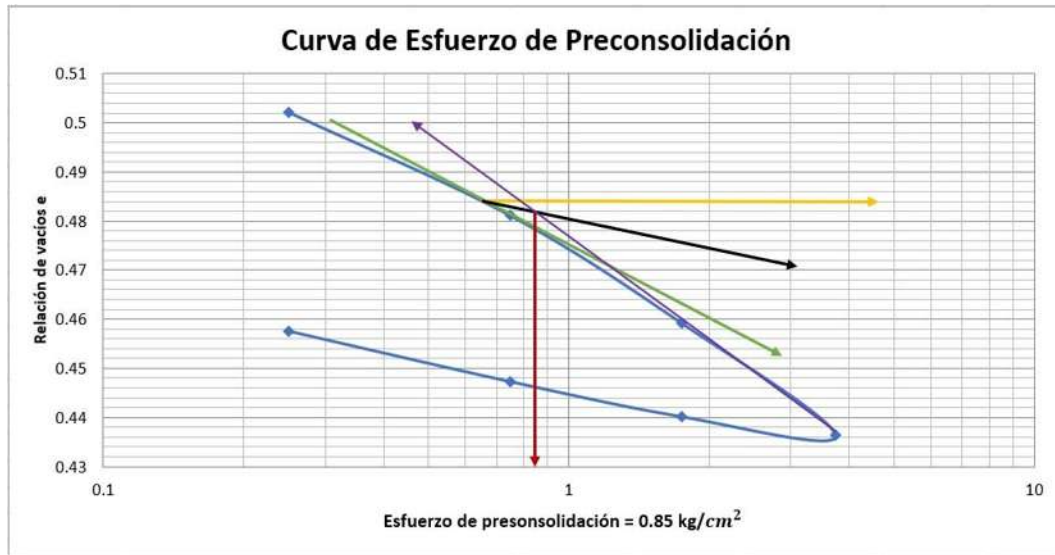


Figura 74. Curva del esfuerzo de Preconsolidación del depósito coluvial, en el que se aprecia un esfuerzo de preconsolidación de  $0.85 \text{ kg/cm}^2$ , que se determina gráficamente.

El coeficiente de permeabilidad  $k$ , se determinó con los resultados de la prueba de consolidación presentando un valor de  $3.0206 \times 10^{-10} \text{ cm/seg}$  para el depósito coluvial, los resultados de las otras dos muestras de suelo se pueden apreciar en la [Tabla 16](#).

Para conocer otra de las propiedades mecánicas, como lo es, el esfuerzo cortante, se realizó la prueba de compresión triaxial no consolidada- no drenada (UU), teniendo los resultados que se muestran en la [Tabla 13](#).

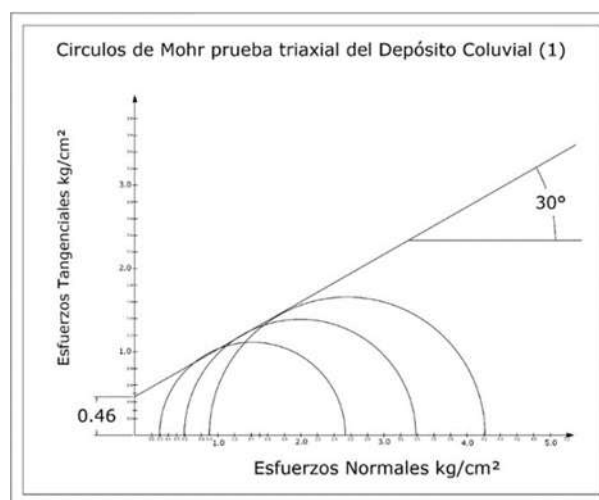


Figura 75. Círculos de Mohr para el depósito coluvial, obtenidos a partir del resultado de la prueba triaxial no consolidada no drenada (UU).



Tabla 13. Parámetros de resistencia generados a partir de la prueba triaxial (UU).

Resultados de pruebas triaxiales 1						
Depósito	$\sigma_3$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Max. (kg/cm <sup>2</sup> )	Centro (kg/cm <sup>2</sup> )	Radio (kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo de fricción ( $\phi$ )	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )
Coluvial	0.3	2.23	1.42	1.12	30	0.46
	0.6	2.783	1.992	1.392		
	0.9	3.31	2.555	1.655		
Caída	0.3	2.92	1.76	1.46	31	0.5
	0.6	3.09	2.145	1.545		
	0.9	3.718	2.759	1.859		
Dacita alterada (Regolito)	0.3	6.05	3.32	3.02	50	0.75
	0.6	8.4	4.8	4.2		
	0.9	10.237	6.018	5.118		

El ángulo de fricción ( $\phi$ ) y cohesión (C), parámetros que regulan la resistencia al esfuerzo cortante, se muestran muy similares en el depósito coluvial y de caída de lapilli (Figura 75); siendo, valores inferiores a los alcanzados por el regolito. Lo anterior reafirma la idea e hipótesis de que la superficie de debilidad se desarrolla en el contacto entre el regolito y el depósito de caída de lapilli.

Cabe mencionar que los valores del  $\phi$  y C, se obtuvieron de las pruebas de compresión triaxial no consolidada- no drenada (UU), y se utilizaron para el presente estudio como datos en la modelación, teniendo en consideración que la prueba que se debería de realizar es la Consolidada- Drenada (CD), debido a que se deben utilizar presiones efectivas y no las presiones totales que son las que se obtiene con la prueba (UU).

Pero se pudieron utilizar estos valores, debido a que no es tanta la diferencia que se aprecia con los resultados de la prueba triaxial CD, en relación al tipo de suelo como se puede apreciar en la Tabla 14, donde se muestra una comparación entre los resultados del ángulo de fricción, obtenidos para ensayos de compresión triaxial de las pruebas UU, CU y CD; realizados a diferentes tipos de suelos, y que comparándolos con los resultados obtenidos en las pruebas que se efectuaron en el presente trabajo, estos son muy similares a los que se tienen para arenas limosa suelta y densa en la prueba de compresión triaxial CD, con valores del ángulo de fricción en un rango de 27° a 35°, por tal motivo se les considero adecuados para utilizarlos en la modelación, dados los valores que se obtuvieron se encuentran dentro de ese rango.



Tabla 14. Valores representativos del ángulo de fricción interna  $\phi$ . Fuente: Bowles, Joseph E. (1988).

Soil	Type of test*		
	Unconsolidated-undrained, U	Consolidated-undrained, CU	Consolidated-drained, CD
<b>Gravel</b>			
Medium size	40–55°		40–55°
Sandy	35–50°		35–50°
<b>Sand</b>			
Loose dry	28–34°		
Loose saturated	28–34°		
Dense dry	35–46°		43–50°
Dense saturated	1–2° less than dense dry		43–50°
<b>Silt or silty sand</b>			
Loose	20–22°		27–30°
Dense	25–30°		30–35°
<b>Clay</b>	0° if saturated	3–20°	20–42°

La curva característica Suelo-Agua (SWCC), fue calculada para los depósitos coluviales y de caída de lapilli a partir de la aplicación de cuatro valores de succión: 1, 3, 5 y 15 bares; es decir 100, 300, 500 y 1500 kPa, respectivamente; los resultados se muestran en la [Tabla 15](#) y [Figura 76](#).

En el apartado de anexos se podrá consultar el procedimiento detallado de la prueba y resultados obtenidos en las etapas intermedias.

Tabla 15. Resultados de pruebas para la SWCC de los depósitos coluvial y de caída.

Estrato	Prueba	Presión de aíre	Presión de aíre	Humedad volumétrica
Depósito	(#)	(Bar)	(kPa)	$\theta$ (%)
Coluvial	2	1	100	36.461
	1	3	300	34.158
	3	5	500	32.459
	4	15	1500	29.5
Caída	6	1	100	36.371
	1	3	300	34.766
	2	5	500	34.444
	4	15	1500	26.84

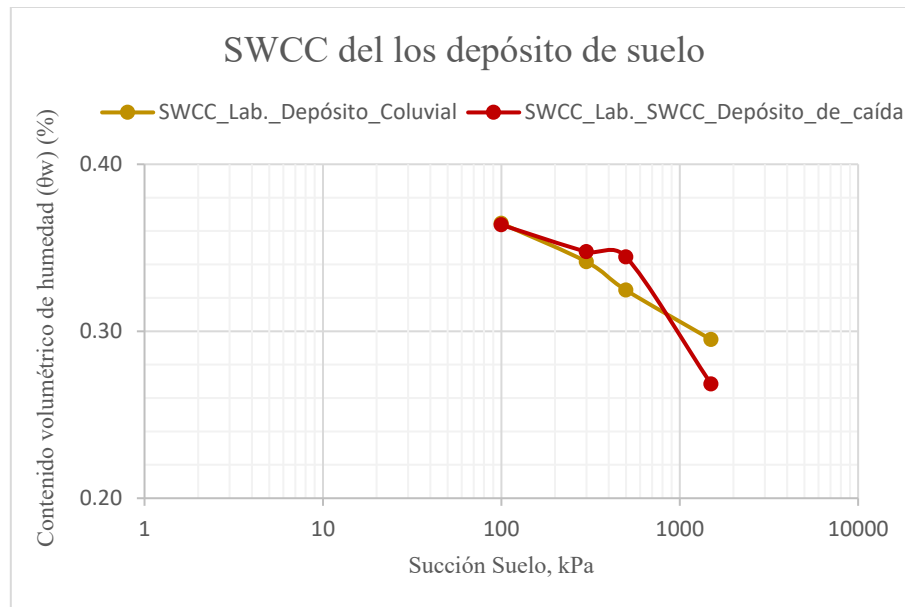


Figura 76. Curva característica suelo-agua de los depósitos de suelos coluvial y de caída.

Como se podrá notar, los cuatro valores obtenidos fueron insuficientes para desarrollar completamente la SWCC. Para obtener puntos adicionales se recurrió a la ecuación 7.5 propuesta por Fredlund y Zing (1994). Este modelo establece que la SWCC se correlaciona con la fracción fina (FF) y el índice de plasticidad (IP) a través de las ecuaciones 7.6 y 7.7 (Pereira *et al.*, 2005 en Chai y Khaimook, 2020).

$$w(\psi) = \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{Cr}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10000000}{Cr}\right)} \right] X \frac{w_s}{\left\{ \ln \left[ \exp + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (Ec. 7.5)$$

Donde

$w(\psi)$  = Contenido de humedad,

$\psi$  = Succión matricial,

$w_s$  = Contenido de humedad saturado y,

$Cr$  = Factor de corrección entre la succión del suelo y el contenido de humedad residual del suelo.



$a$ ,  $m$  y  $n$  = son los parámetros de montaje donde  $a$  se relaciona al valor de entrada de aire en el suelo ( $\psi_{aev}$ ),  $m$  se relaciona con el grado residual de saturación en la SWCC ( $S_r$ ) y  $n$  se relaciona con la tasa de desaturación del suelo ( $\delta_s$ ) (Figura 77).

Mediante la implementación de las ecuaciones propuestas por Perera *et al.*, (2005) se obtuvieron cada uno de los parámetros  $a$ ,  $n$  y  $m$  a utilizar en la ecuación de Fredlund y Xing .

$$a = 32.835 \times \ln (FF.IP) + 32.438(kPa) \quad (Ec. 7.6)$$

$$n = 1.421 \times (FF.IP)^{-0.3185} \quad (Ec. 7.7)$$

$$m = -0.2154 \times \ln (FF.IP) + 0.7145 \quad (Ec. 7.8)$$

Donde **FF** se expresa en forma decimal y **Cr** = 500 (kPa)

Basados en la literatura referente a la predicción de la SWCC, clasificados de acuerdo con su enfoque de predicción, en modelos físico-empírico y de regresión de parámetros funcionales.

En el presente trabajo se implementó el modelo de regresión de parámetros, que supone que los parámetros de una ecuación de SWCC, se puede correlacionar con las propiedades del suelo; por lo que se basó en el modelo de Perera *et al.* (2005), y mejorado por Huston *et al.* (2006); los cuales realizaron un ajuste para mejorar la SWCC obtenida con el modelo de Perera *et al.*(2005), para converger con un punto de datos medido en la SWCC.

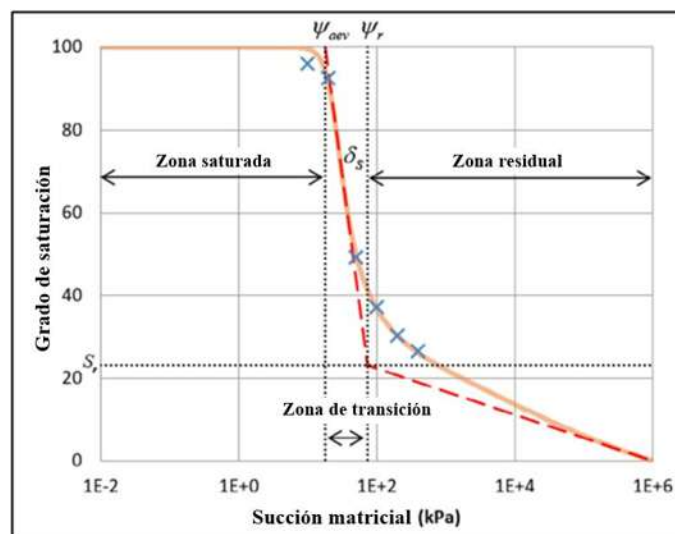


Figura 77. Zonas en la SWCC y valores característicos.

Fuente: Chai, J y Khaimook, P (2019).

Las ecuaciones antes mencionadas se utilizaron con la finalidad de predecir la SWCC, al emplear para ello los valores obtenidos en laboratorio, y basados en el estudio de Houston *et al.* (2006), “*Determination of SWCC using one point suction measurement and standard curves*”; este método de un punto implica medir la succión y su humedad existente en una muestra, donde este par de valores se interpreta que representa un punto en el SWCC, y correlacionarlo con la familia de curvas de secado como se muestran en la **Figura 78**, para los diferentes tipos de suelo (Perera *et al.*, 2005), por lo que se utilizan como una referencia para poder trazar la curva más adecuada a las características de los suelos estudiados.

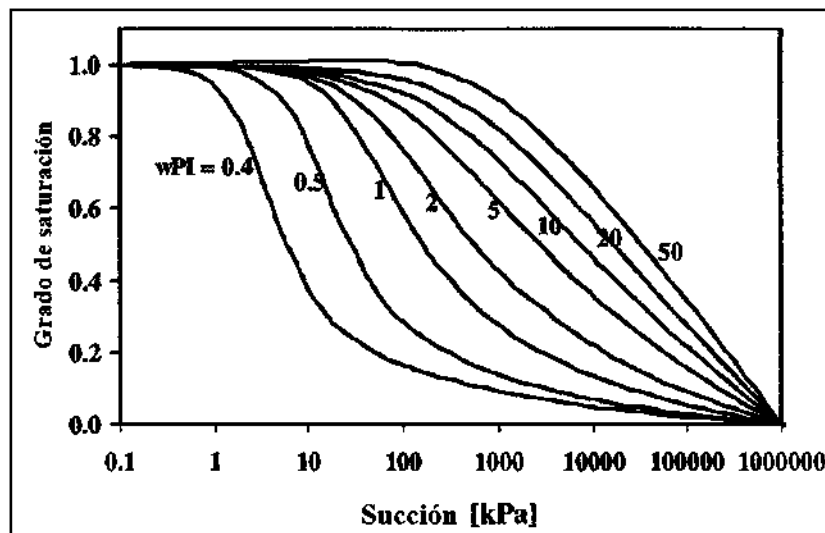


Figura 78. Familia de curvas de secado para suelos plásticos.

Fuente: Perera *et al.* (2005).

Luego, se dibujó una SWCC a través del punto para cada depósito de suelo como si se interpolara dentro de la familia de curvas, por lo que esto se realizó dejando los puntos obtenidos de la prueba y se obtuvieron las curvas correspondientes para cada depósito de suelo como se muestra en la **Figura 79**.

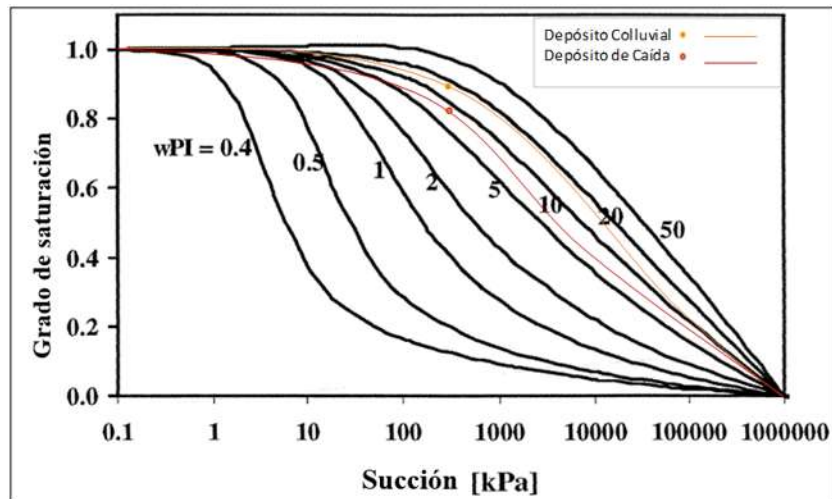


Figura 79. Comparación de los puntos obtenidos en las pruebas de laboratorio y curvas interpoladas de los mismos para los depósitos de suelo coluvial y de caída, sobre la familia de curvas de secado para suelos.

Fuente: Modificada de Perera *et al.* (2005)

La contraparte analítica del procedimiento gráfico ya antes descrita, es continuando el tipo de suelo siendo este plástico dados los resultados de las pruebas de límites de consistencia. La curva interpolada gráficamente se puede utilizar para estimar un valor aparente interpolado de  $wPI$  que para la ecuación de Fredlund y Xing corresponde a  $FF.IP$ . Este valor aparente de  $wPI$ , que es diferente del  $wPI$  real, se usa luego con las ecuaciones antes mencionadas, pero cambiando el valor de  $FF.IP$  por el valor obtenido de  $wPI$  y con ello obtener los parámetros de ajuste sustituyéndolos en la ecuación de Fredlund y Xing, para calcular la succión correspondiente al grado de saturación medido, y hasta que la succión calculada concuerda con la succión medida; hasta entonces los parámetros de ajuste serán apropiados, y de no ser así, el  $wPI$  interpolado debe ajustarse ligeramente hacia arriba o hacia abajo hasta que se obtenga una coincidencia.

Utilizando como punto de convergencia en nuestro estudio el valor de 300 kPa, al comparar como se presentaba un buen ajuste de este valor con la familia de curvas de secado presentadas por Perera *et al.*, 2005 (Figura 79); tomando como criterio en su utilización, además de lo antes mencionado, el análisis realizados de las propiedades volumétricas de los depósitos de suelo, y correlacionando la porosidad de ellos con el grado de saturación, además de observar el comportamiento que presentan los demás puntos obtenidos en el laboratorio con el ajuste en relación a la familia de curvas de secado y el tipo de suelo (SM).



Por lo que los valores que se obtuvieron de la interpolación de las gráficas fueron de  $w_{PI} = 14.5$  para el depósito coluvial y de  $w_{PI} = 6.7$  para el depósito de caída de lapilli, correspondientes al valor de 300 kPa de succión. En la **Tabla 16** se tienen los resultados en la determinación de la SWCC ajustada para los depósitos coluvial y de caída, así como de manera gráfica como se observa en las **Figuras 81 y 82**.

Ambas graficas cumplen con la condición que menciona la metodología en relación a que la gráfica pasa por un punto obtenido en base a las pruebas de laboratorio, que para el caso del depósito coluvial corresponde con 300 kPa de succión y un contenido de humedad volumétrica de 34.2 %, mientras que para el caso del depósito de caída este valor concuerda con la succión de 300 kPa y un contenido de humedad volumétrica de 34.7%.

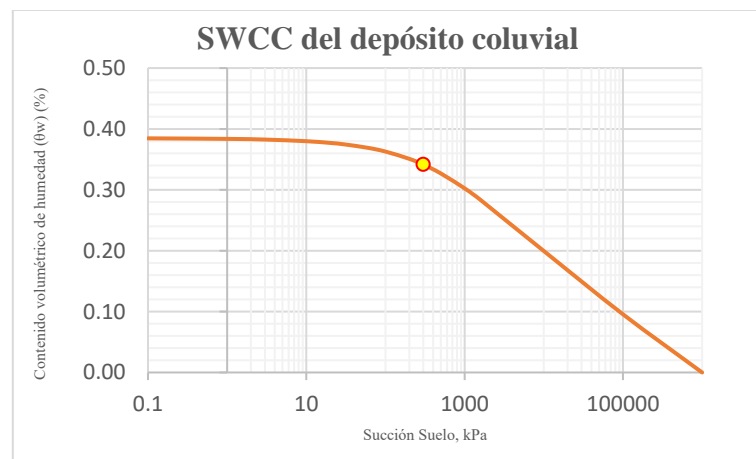


Figura 80. SWCC del depósito coluvial utilizando la predicción basada en los métodos de Perera et al. 2005 y Huston et al. 2006.

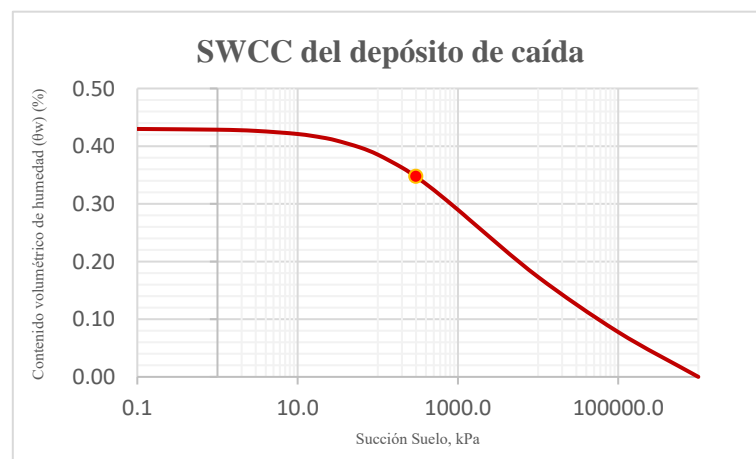


Figura 81. SWCC del depósito de caída utilizando la predicción basada en los métodos de Perera et al. 2005 y Huston et al. 2006.



Tabla 16. Valores obtenidos en la predicción de la SWCC al aplicar la ecuación de Fredlund y Xing (1994), con los parámetros obtenidos según la metodología de Huston *et al.* (2006), modificada de Perera *et al.* (2005). Para el depósito coluvial y de caída.

Presión de Aire	Coluvial	Caída
	$w(\Psi)$	$w(\Psi)$
kPa	(%)	(%)
0.1	0.385	0.430
1.0	0.384	0.429
3.0	0.383	0.426
10.0	0.380	0.421
20.0	0.377	0.415
30.0	0.375	0.410
60.0	0.369	0.398
100.0	0.363	0.385
200.0	0.351	0.363
300.0	0.342	0.347
500.0	0.327	0.324
1000.0	0.302	0.290
1280.0	0.293	0.277
1500.0	0.286	0.269
10000.0	0.200	0.173
100000.0	0.096	0.078
1000000.0	0.000	0.000

En la **Figura 82** se observa el ajuste que presentan las curvas de ambos depósitos de suelo con las pruebas de laboratorio donde se obtuvieron los puntos experimentales de la SWCC.

Estas graficas de SWCC se utilizaron en la modelación numérica en el programa de *GeoStudio 2018 R2*.

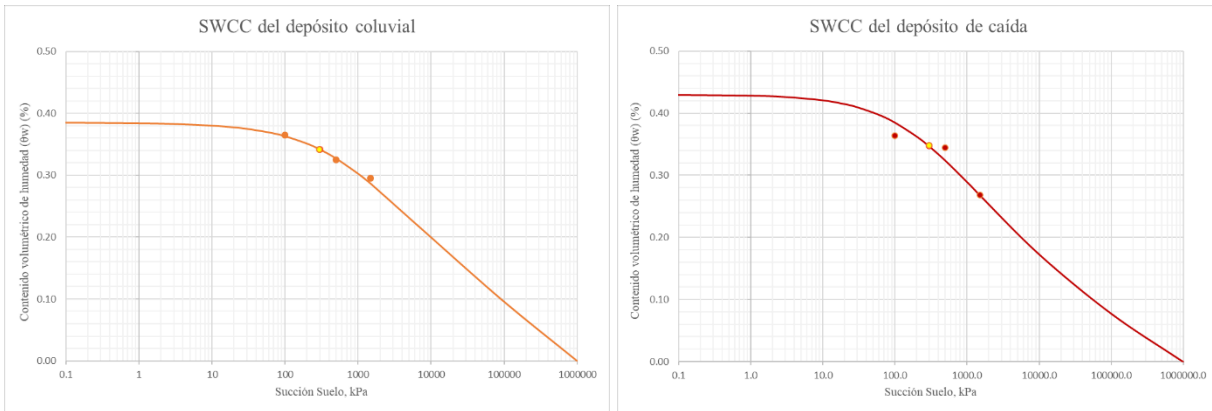


Figura 82. Comparación de las SWCC con los datos obtenidos en laboratorio y la predicción basada en el punto de 300kPa obtenida por medio de los métodos de Perera *et al.* 2005 y Huston *et al.* 2006.

En la **Tabla 17** se muestran los resultados de las pruebas que se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos, las cuales se utilizaron en la parte de modelación para indicar los parámetros de los suelos en cada uno de los depósitos correspondientes.

Tabla 17. Resultados de las pruebas en laboratorio de mecánica de suelos.

Depósito	Angulo de fricción	Cohesión	Esfuerzo de preconsolidación	Permeabilidad (Derivado del Ensayo consolidación)	Permeabilidad Aparente (Campo)	Curvas SWCC (Basados en el modelo de Perera et al. 2005 y Houston et al.,2006) Contenido de humedad a una succión de 300 kPa
-----	grados (°)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	K (m/seg)	K (m/seg)	
<i>Coluvial</i>	30	0.46	0.85	3.0206E-10	5.5401E-06	0.342 % (Fig. 78)
<i>Caída</i>	31	0.5	1.1	4.49147E-10	1.34405E-06	0.347 % (Fig. 79)
<i>Dacita alterada</i>	50	0.75	1.1	2.40328E-11	-	-

## 7.4. Implementación del modelo.

### 7.4.1. Infiltración (Seep/W)

El modelo numérico para el análisis de la infiltración de la ladera en estudio se efectuó mediante el módulo Seep/W de GeoStudio 2018 R2, partiendo de la reconstrucción del perfil topográfico registrado sobre la zona de desprendimiento (Figuras 83 y 84). En la Figura 85 se muestra el cuadro de diálogo para registrar los tipos y propiedades físico-mecánicas de los materiales a considerar en el análisis (Tabla 18), y en la Figura 86 se observa el registro de la conductividad hidráulica y SWCC.

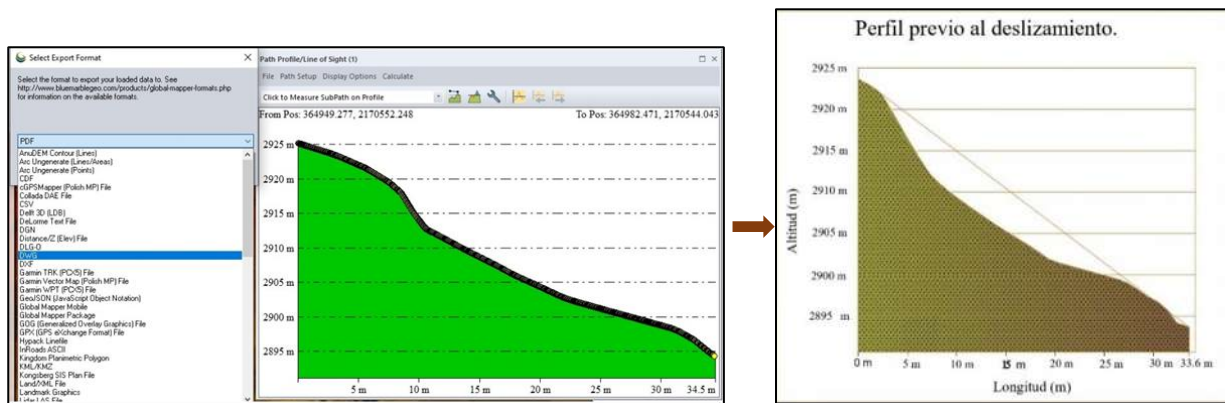


Figura 83. Exportando el perfil de la zona de desprendimiento del PRM que se generó en el programa de Global Mapper al programa de AutoCAD 2018 para modificarlo a sus condiciones previas al deslizamiento.

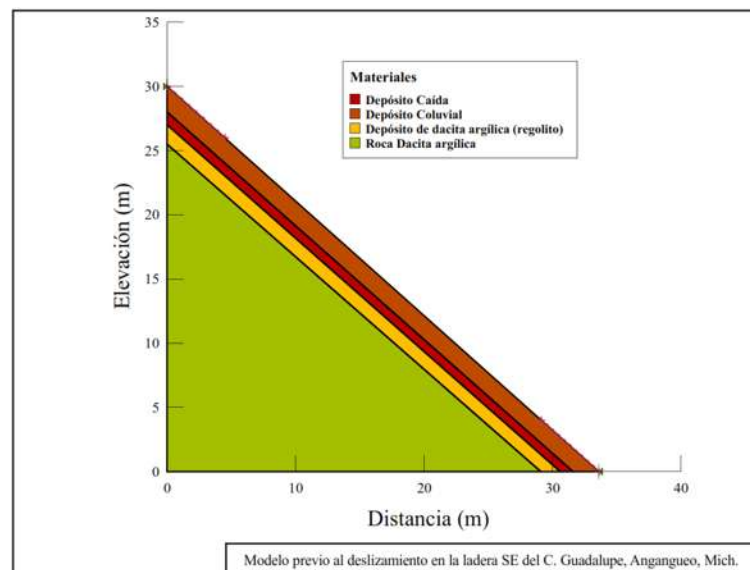


Figura 84. Perfil modificado a las condiciones previas al deslizamiento del 2010, dentro del programa de GeoStudio 2018 R2.

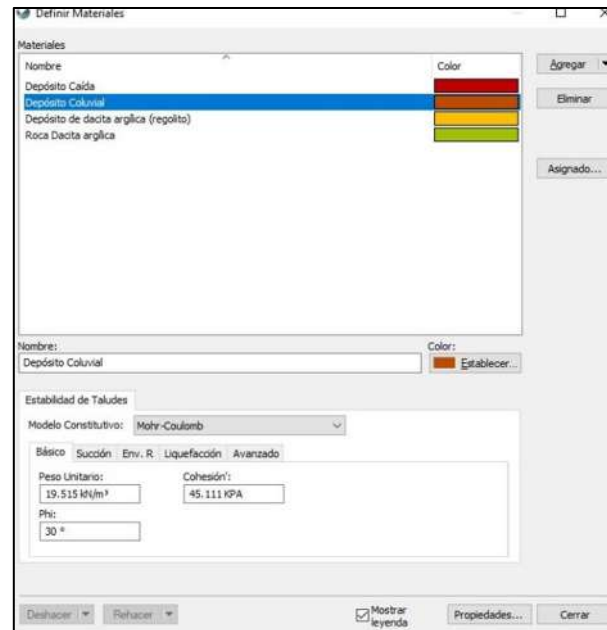


Figura 85. Definir materiales en el programa de GeoStudio 2018 2R en el módulo de Seep/W.

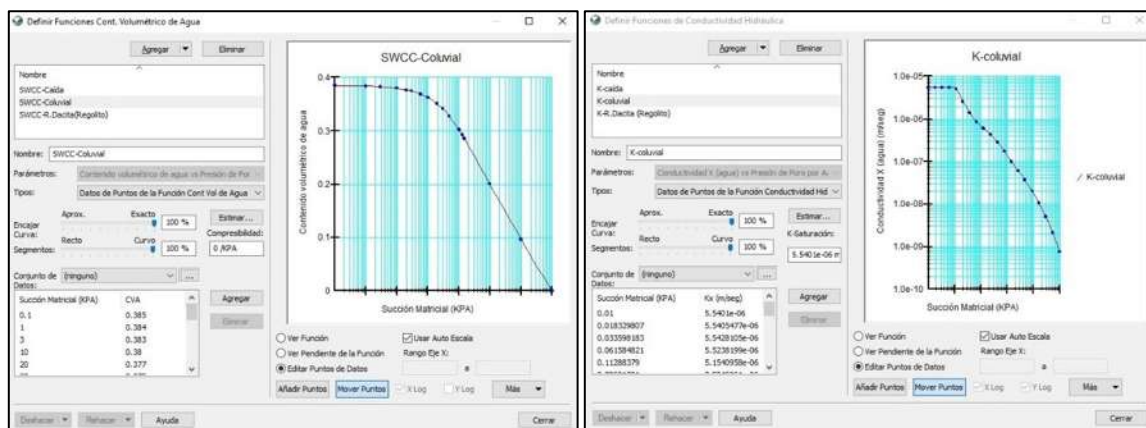


Figura 86. Los datos de la SWCC se definieron en la pestaña de Fn. Contenido Vol. de Agua al agregarla y calcular su función de conductividad hidráulica en relación de los datos de la SWCC de cada material en su estimación, requiriendo en este apartado la permeabilidad ( $k_{sat}$ ) por lo que se utilizó la obtenida en campo con el infiltrómetro de membrana.

Las condiciones límite que se utilizaron en el modelo se muestran en la [Figura 87](#) considerando la duración de la precipitación registrada antes, durante y después del evento ([Figura 88](#)); una superficie impermeable que corresponde al contacto litológico entre el regolito y el depósito de caída de lapilli ([Figura 89](#)); y la frontera de filtración según la dirección del flujo en la frontera inferior del modelo ([Figura 89](#)).



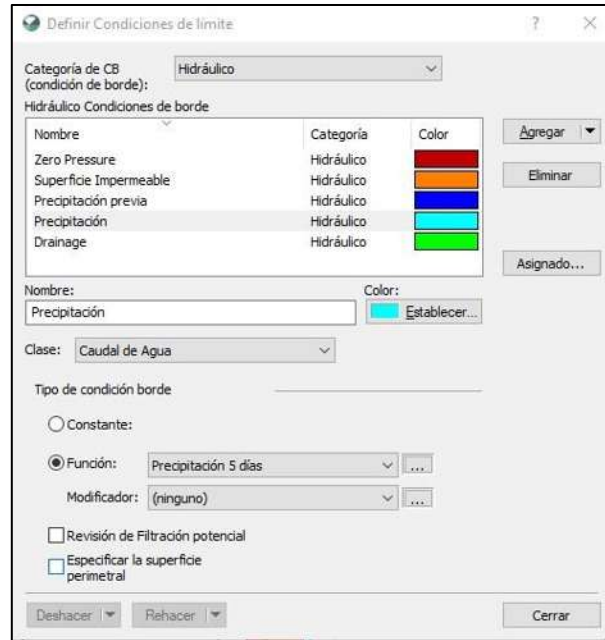


Figura 87. Condiciones límite para el modelo.

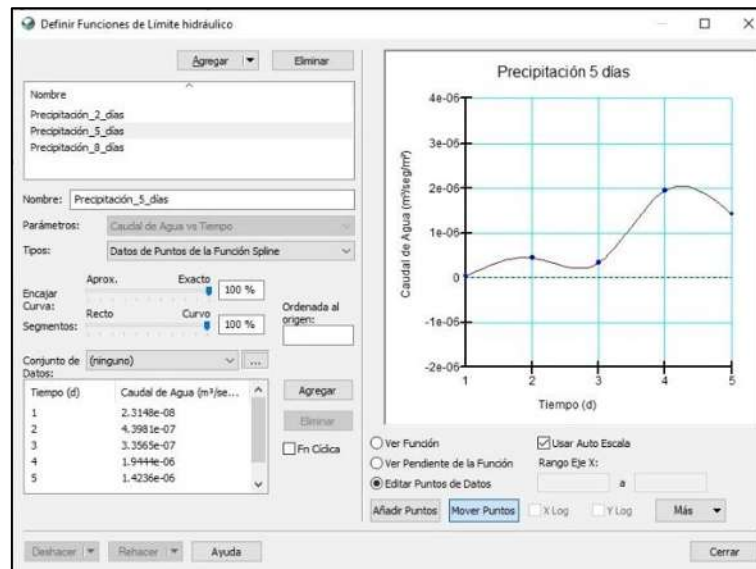


Figura 88. Función para la precipitación durante el evento del 2010 en Anganguco, Michoacán.

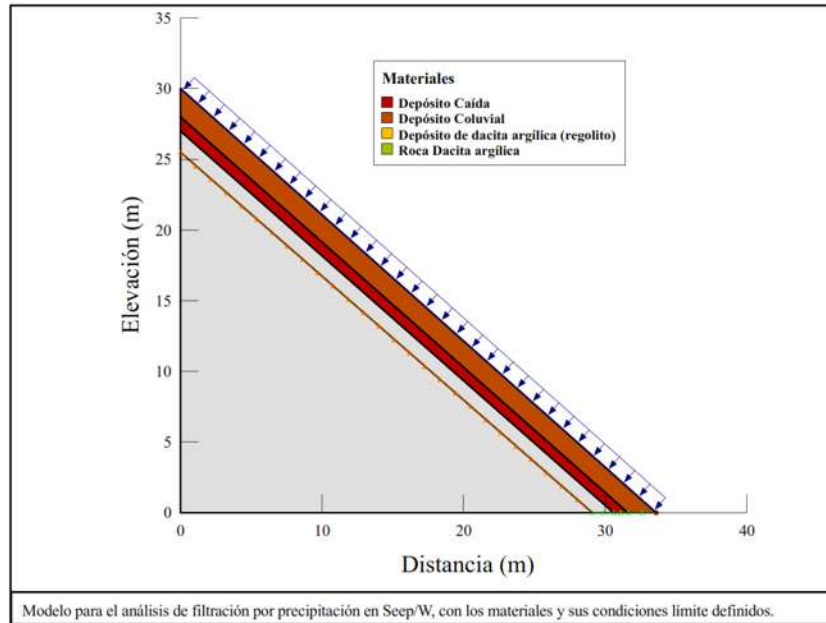


Figura 89. Modelo final del perfil de suelo con las condiciones a considerar para su análisis de flujo por precipitación en Seep/W del programa GeoStudio 2018 R2.

Tabla 18. Resultados de pruebas de laboratorio utilizadas en la modelación numérica.

Depósito	Espesor (m)	PVHC (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)	Permeabilidad $k$ (m/s)
Coluvial	2.0	19.515/23.737	45.111	30	5.5401E-06
Caída	1.0	18.025	49.033	31	1.34405E-06
Dacita argílica (regolito)	1.5	21.967	73.550	50	Impermeable



#### **7.4.1.a Infiltración con intensidad de precipitación real.**

En los resultados obtenidos (Figura 90) se aprecia que durante el primer día de precipitación el agua comenzó a ocupar los poros de los depósitos coluvial y de caída de lapilli, e inicia una trayectoria de flujo en dirección paralela a los contactos litológicos. Nótese que la magnitud del flujo es mayor sobre el depósito coluvial (Figura 90 a), en correspondencia con las propiedades hidráulicas del material. Este comportamiento es común y que se mantiene similar durante los días subsecuentes, variando solo en la zona media y baja esa velocidad dado el incremento en la precipitación durante los días 3 al 5 (Figuras 90 c, d y e).

Realizando la comparación con la presión de poro (PWP) que se presentan durante los días de precipitación, podemos observar cómo durante el 1<sup>er</sup> día (Figura 90 a), se tuvieron valores sobre la frontera superior del modelo de -20 kPa, mientras que en la parte central se tiene valores de entre -10 kPa y -8 kPa; y sobre la frontera inferior con valores de -2 kPa. Dichos valores se incrementan durante el 2<sup>do</sup> día de análisis de la precipitación (Figura 90 b), con valores en la frontera superior de 200kPa, para la parte central del modelo de 220kPa; y de 20kPa en la frontera inferior. Durante el 3<sup>er</sup> día de precipitación, se obtuvieron PWP de 80 kPa en la zona alta del modelo (Figura 90 c), mientras que la zona baja presentó un valor de 0 KPa, cuyo valor en dicha zona se incrementó de manera considerable durante el 4<sup>to</sup> y 5<sup>to</sup> días (Figura 89 d y e), con PWP de 1800 kPa y 1400 kPa; mientras que para zona media de 1400 kPa y 1200 kPa, y para la zona baja se mantuvo en 200 kPa en ambos días.

Por lo visto en el análisis, se aprecia como la PWP fue incrementándose cada día y cuyo valor más alto se presentó durante el 4<sup>to</sup> día de precipitación (Figura 89 d) con un valor de 1800 kPa, siendo esta la fecha en que se presenta el colapso de la ladera.

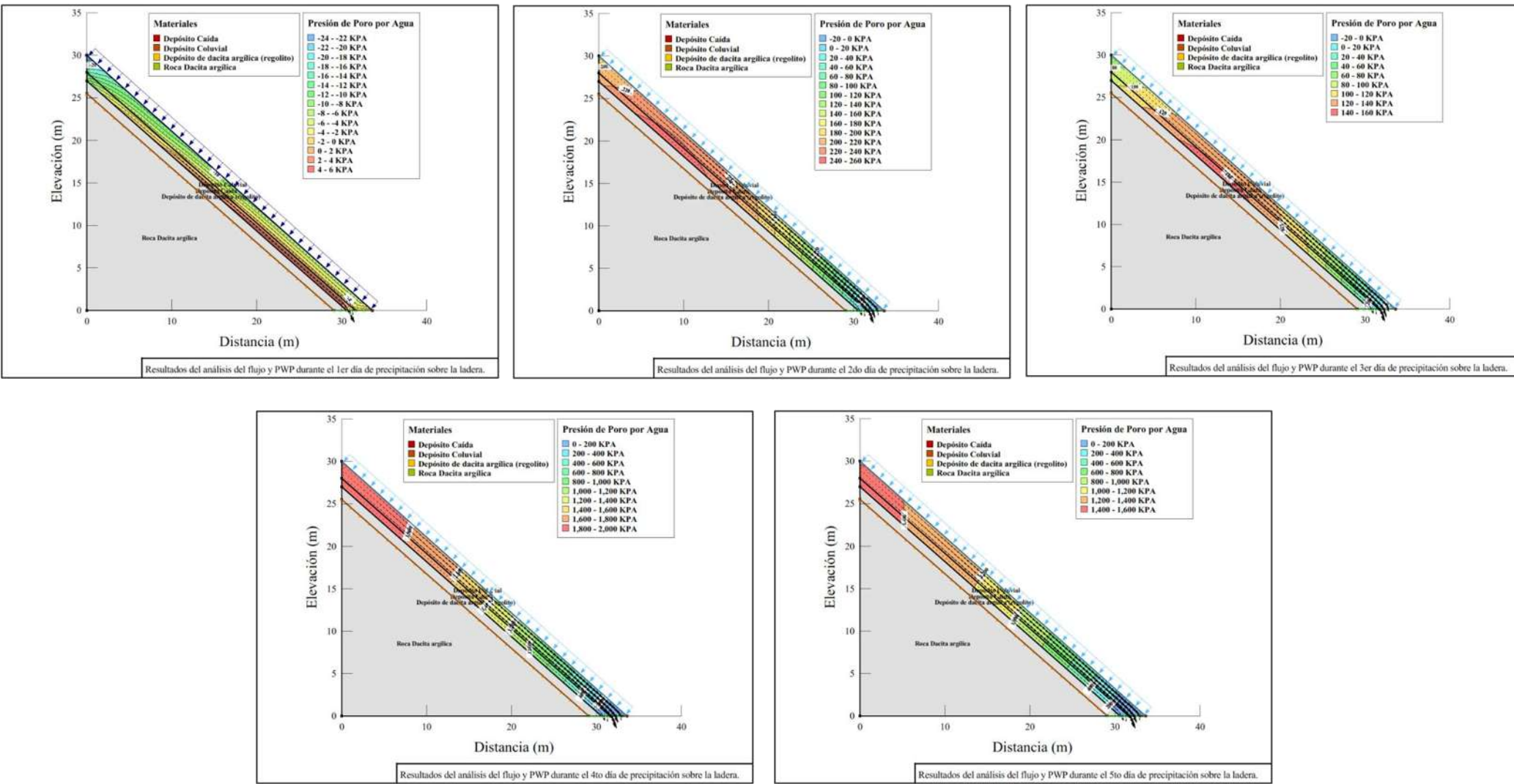


Figura 90. Comportamiento del flujo por la lluvia sobre el modelo en Seep/W, durante los 5 días de precipitación



#### ***7.4.1 b. Intensidad muy alta (2 días de precipitación)***

Con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico de la ladera para diferentes valores hipotéticos de intensidad de lluvia, se realizó el mismo análisis anterior conservando la precipitación total registrada, pero variando tiempos de 2 y 8 días.

Los resultados bajo la variante de 2 días de precipitación (**Figura 91**) revelan que se alcanzan valores de presión de poro positiva del orden de hasta 5,000 kPa; es decir, 2.5 veces más altas que las máximas alcanzadas en la variante real de 5 días. Estas condiciones tan desfavorables se tienen en apenas 39 horas (1.635 días) de lluvia (**Figura 90 d**), con lo que se demuestra la susceptibilidad de la ladera ante intensidades atípicas de precipitación.

#### ***7.4.1. c. Intensidad baja (8 días de precipitación)***

De manera similar se realizó el análisis variando el tiempo de precipitación a 8 días en el modelo. Obteniendo los resultados que se muestran en la **Figura 92** para el comportamiento de la filtración de la lluvia precipitada sobre la ladera y a su vez el comportamiento de la PWP sobre los estratos de suelo.

En esta condición la ladera registra presiones de poros positivas no mayores a los 1,000 kPa; es decir, 50% más bajas que las registradas en el día del colapso en condiciones reales. Además, es de destacar que este valor máximo se registra en el 8º día, al final del periodo analizado (**Figura. 92 e**).

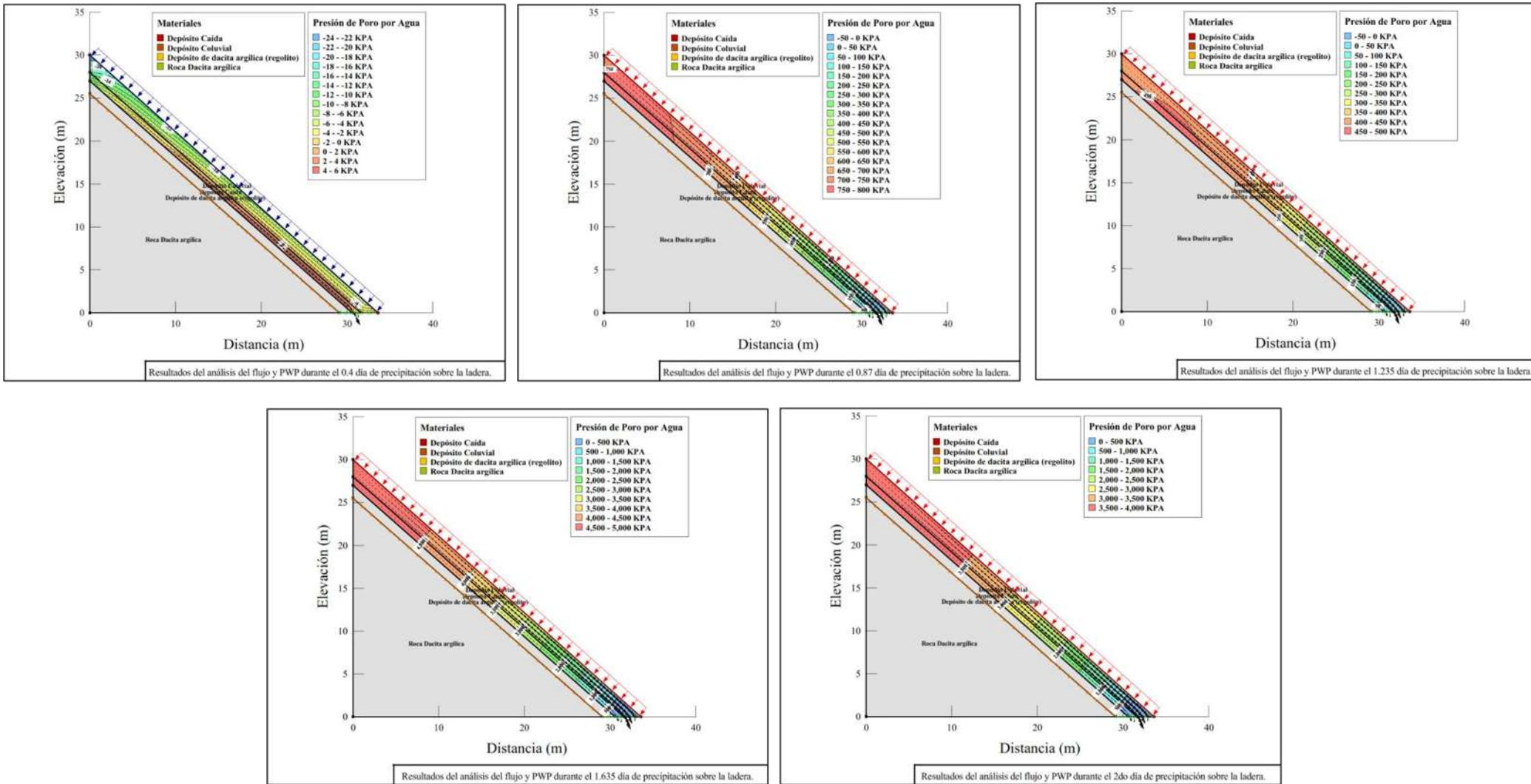


Figura 91. Comportamiento del flujo y de la presión de poro (PWP) sobre el modelo utilizando una precipitación de 2 días en Seep/W.

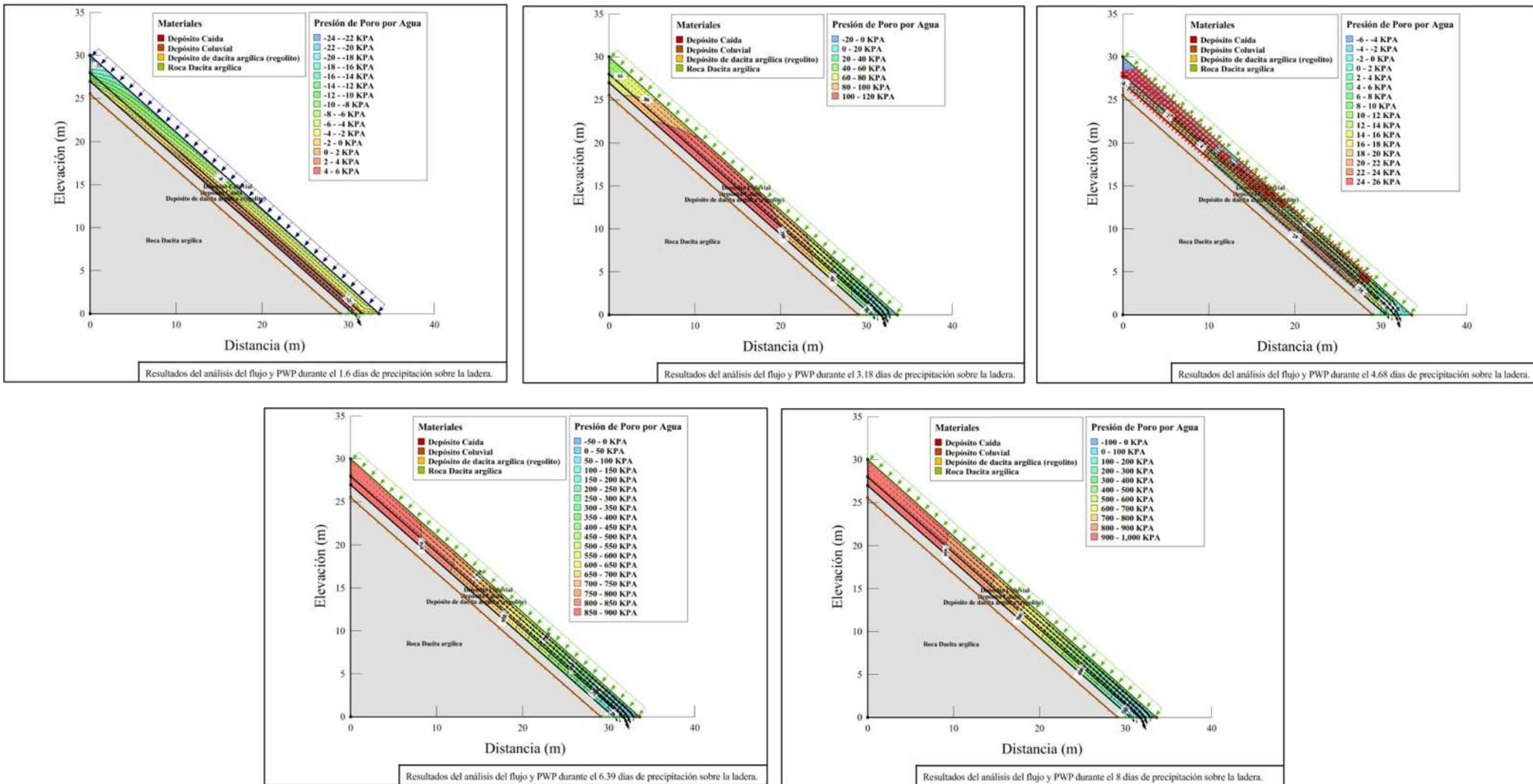


Figura 92. Comportamiento del flujo y la presión de poro (PWP) sobre el modelo utilizando una precipitación de 8 días en Seep/W

Con los resultados que se obtuvieron en el análisis de la precipitación atípica de 5 días en el evento de febrero del 2010, y los análisis de situación hipotéticas en 2 y 8 días de precipitación, se realizó la gráfica de infiltración (Caudal) vs el tiempo que se muestra en la **Figura 93**. Podemos apreciar cómo se presenta una gran intensidad para el análisis considerando una duración de 2 días de lluvia, mientras que por el contrario, para el análisis de 8 días, la intensidad es menor al tener un mayor tiempo de lluvias, es muy similar a lo que ocurre al graficar la PWP que presenta el modelo a lo largo del tiempo, tal como se muestra en la **Figura 94**.

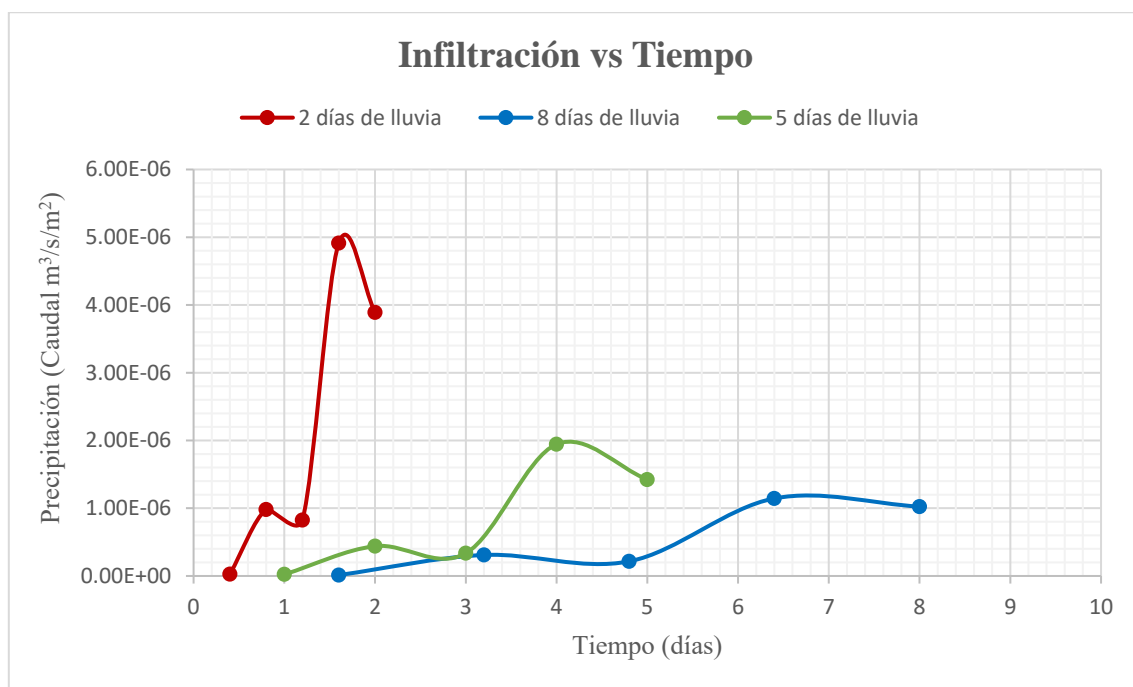


Figura 93. Comportamiento que presentaron los análisis de la Precipitación sobre el tiempo de cada umbral analizado.



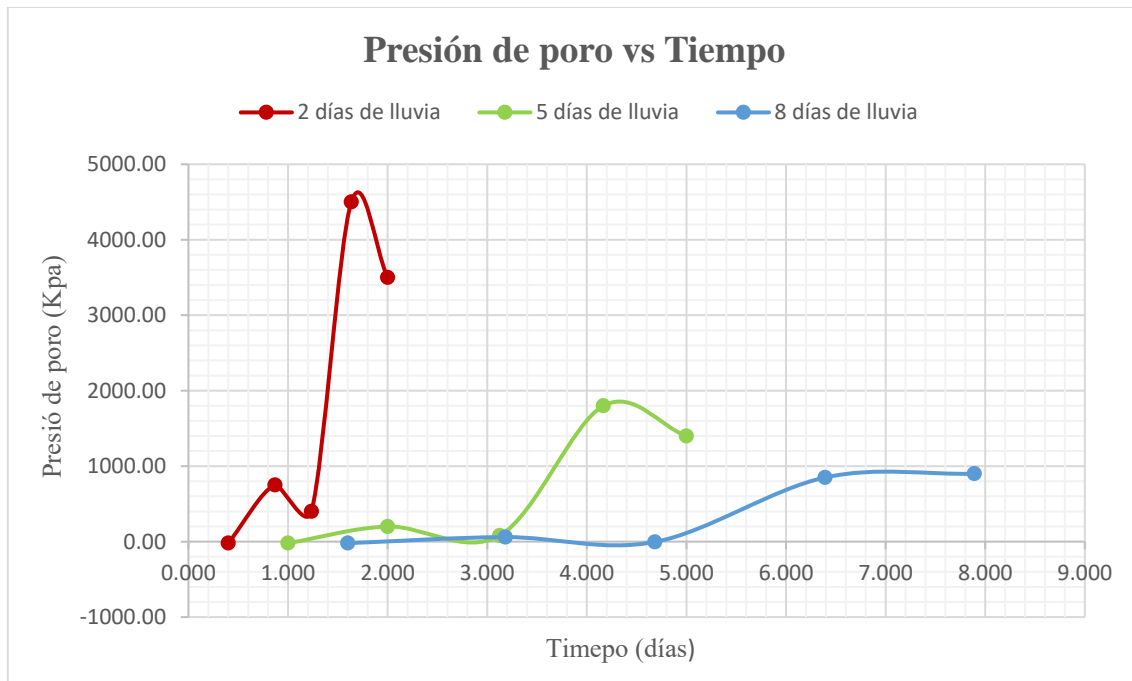


Figura 94. Comportamiento de la presión de poro en relación con los tiempos utilizados en el análisis.

#### 7.4.2. Estabilidad (Slope/W)

Los resultados precedentes derivados del análisis de la filtración en conjunto con la geometría del perfil, fueron empleados para el análisis de la estabilidad de los depósitos sobre la ladera utilizando el módulo de Slope/w.

Las propiedades de los materiales se muestran en la **Figura 95**. El análisis de estabilidad se basó en el modelo de Mohr-Coulomb que requiere los parámetros de **peso unitario del suelo** ( $\text{kN/m}^3$ ), **cohesión** (kPa) y **Phi** ( $^\circ$ ) (también conocida como ángulo de fricción). Esto para cada uno de los materiales, cuyos datos se obtuvieron de las pruebas de laboratorio y en el caso de la roca sólo se indicó que se trata de un lecho rocoso (impermeable).

Se indicaron las condiciones de contorno siendo estas: los límites de la superficie de deslizamiento, las cuales se aprecian en forma de triángulos en color verde en la parte superior e inferior del modelo, así como dibujando la entrada y salida de las superficies de deslizamiento, las cuales se aprecian de color rosa de la misma forma en la zona superior e inferior en el modelo, todo esto se puede apreciar en la **Figura 96**.

Al realizar el análisis en el módulo de Slope/W se obtuvo como resultado lo siguiente:

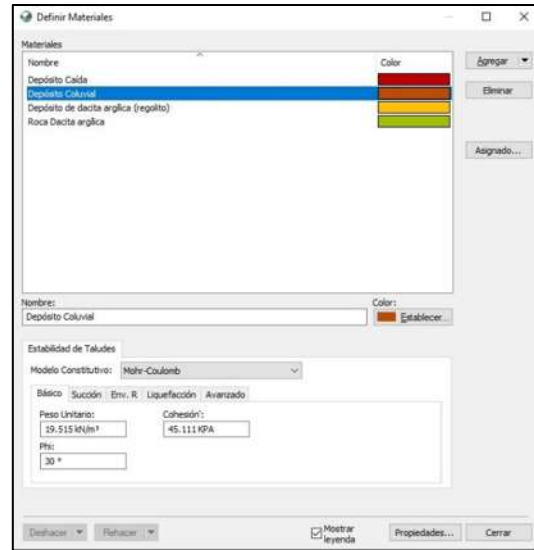


Figura 95. Definición de materiales dentro del análisis en Slope/w.

#### 7.4.2.a. Factor de seguridad durante la precipitación real.

En la **Figura 97** se muestran los resultados del Factor de seguridad (FS) obtenidos durante los 5 días de precipitación. Se aprecia que el FS durante el 1<sup>er</sup> día (**Figura 97 a**) osciló entre 3.379 y 4.279, por lo que para ese momento la ladera permanecería estable y sin riesgos de que se produjera un deslizamiento. Estos valores de FS se vieron afectados para el 3<sup>er</sup> día de la precipitación (**Figura 96 c**) presentando un descenso hasta 2.629, no obstante, la ladera permanecía estable. Sin embargo, durante el final del 3<sup>er</sup> día (3.75 día) se observa un descenso mayor que conduce a un FS de 0.926 ( $<1$ ), y que se aprecia en la **Figura 97 d**, por lo que se perdería la estabilidad y se puede llegar a presentar el PRM sobre la ladera al movilizarse los depósitos de suelo coluvial y de caída. En el 4to día, el FS presentó aún estados muy críticos con valores menores a 1 (**Figura 97 d**) continuando con la inestabilidad. Los resultados del FS para el 5<sup>to</sup> día revelan que a pesar del descenso en la precipitación la ladera no recuperó su estabilidad y el FS continuó con valores inferiores a 1, en específico de 0.860 (**Figuras 97 e y 98**).

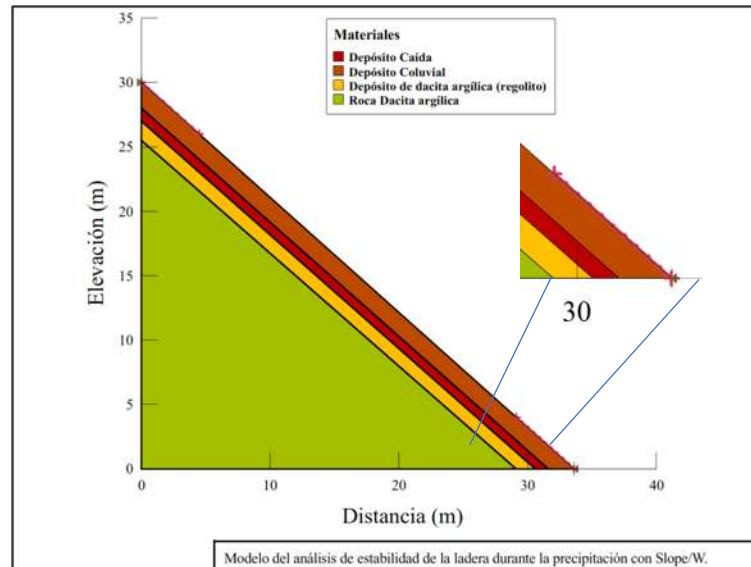


Figura 96. Modelo con las condiciones para su análisis de estabilidad en Slope/W del programa GeoStudio 2018 R2.

Los resultados obtenidos en la modelación nos indican que el PRM se pudo presentar a finales del 3<sup>er</sup> día e inicios del 4<sup>to</sup> día, ya que los valores concuerdan con lo acontecido durante el evento que provocó el movimiento y flujo de detritos de los depósitos de suelo sobre la ladera del Cerro Guadalupe en febrero del 2010; y cumpliendo con ello la hipótesis que se persiguió en el trabajo de investigación.

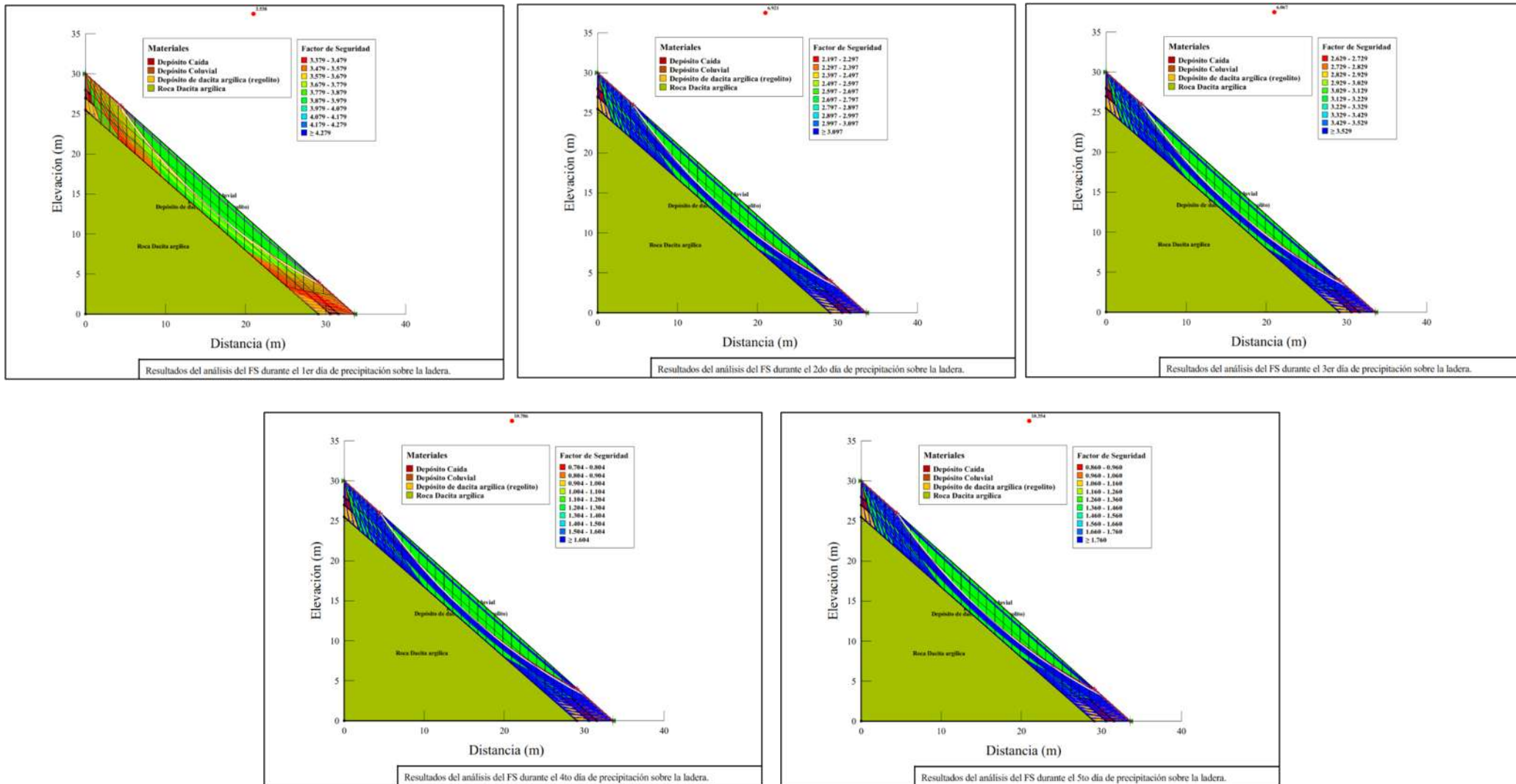


Figura 97. Resultados del FS para el modelo en Slope/w, durante los 5 días de precipitación.

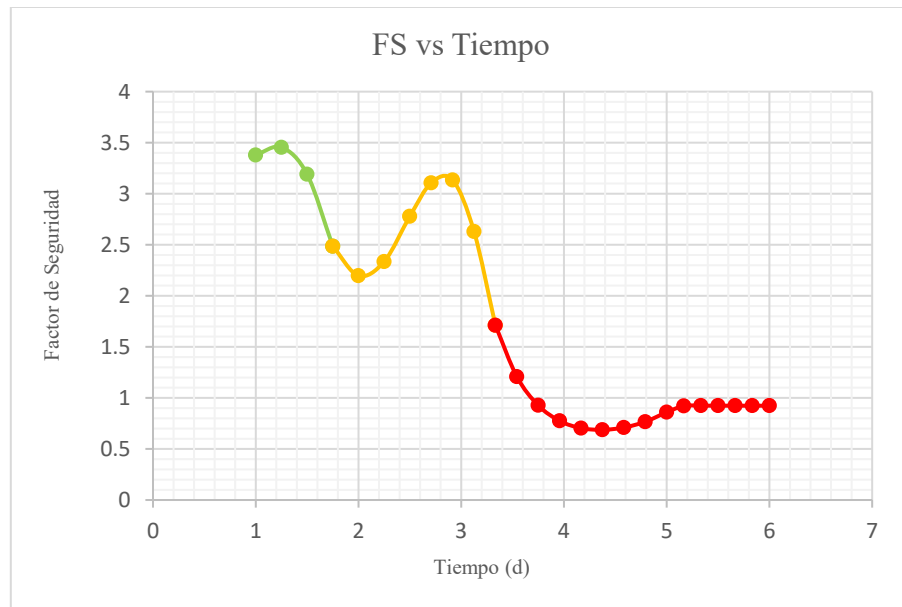


Figura 98. Análisis del FS durante los 5 días de precipitación Slope/W.

#### 7.4.2.b. Factor de seguridad durante el umbral de 2 días de precipitación.

Los resultados para los FS considerando una precipitación de 2 días de duración se muestran en las Figuras 99 y 100. En las primeras horas del primer día se observan valores elevados de 3.379 de FS (Figura 99 a), pero con un descenso muy acelerado. Esto último provocó que para las 19hrs (0.8 día) de iniciada la precipitación hipotética, el FS cayera hasta valores de 1.279, una disminución de casi el 38%(Figura 99 b). Con lo que ya se aprecia el efecto que va teniendo la precipitación, y que se ve reflejado de una manera más significativa para el 1.386 días de precipitación, al obtenerse el decaimiento en el FS, con un valor menor de 1 siendo este de 0.758, lo que repercutiría en la inestabilidad de los depósitos de suelo y generándose el PRM. Continuando el decaimiento de la estabilidad con un valor de 0.350 durante el 1.6 días (Figura 99 d), llegando al final del análisis de 2 días de precipitación con un valor mínimo aun por debajo de 1 siendo este de 0.403, por lo que se continuaría con la desestabilización de los depósitos. El comportamiento del FS para la precipitación durante 2 días de análisis se observa en la Figura 100.

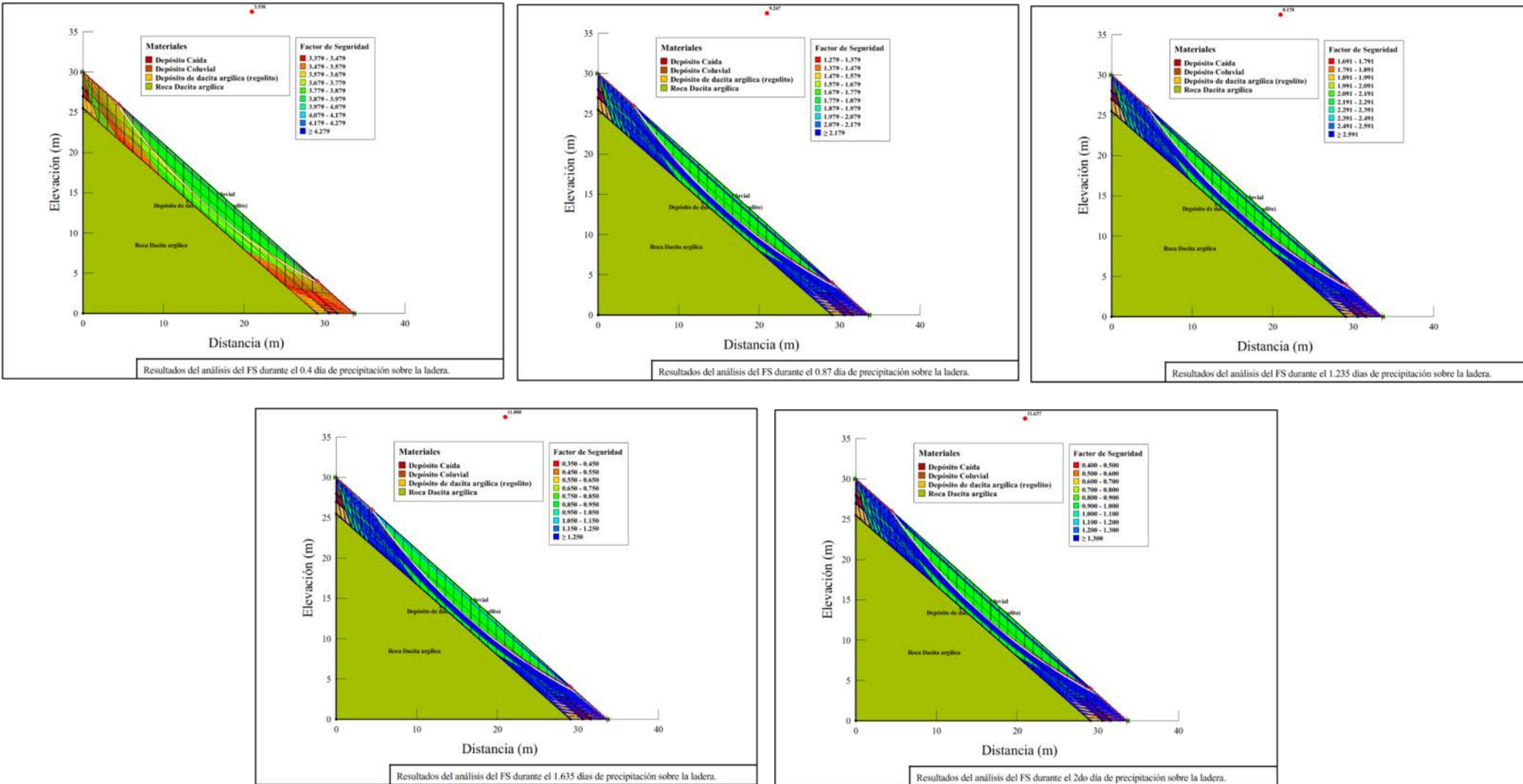


Figura 99. Resultados del FS para el modelo en Slope/w, durante los 2 días de precipitación.

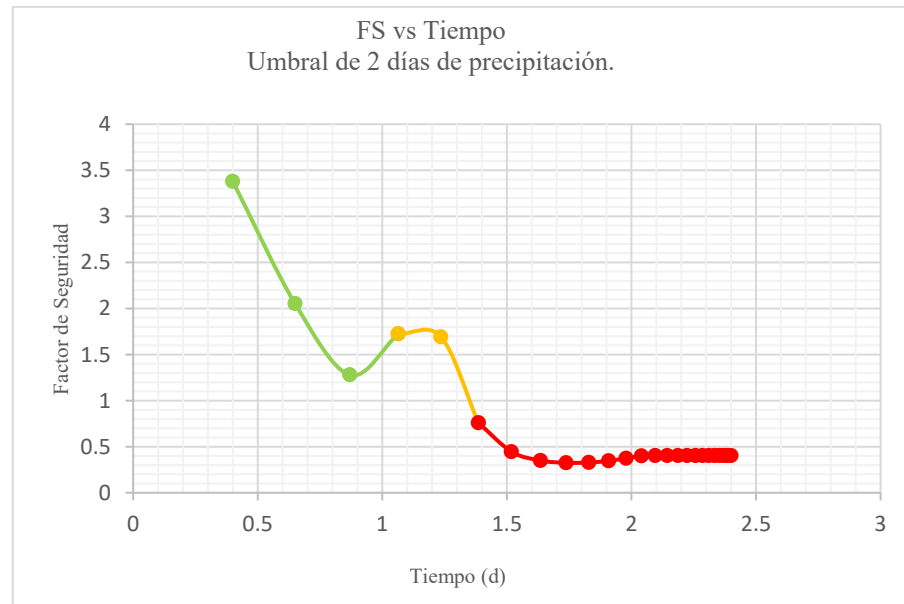


Figura 100. Valores obtenidos de FS para la precipitación de 2 días.

#### ***7.4.2.c. Factor de seguridad durante el umbral de 8 días de precipitación.***

Por otra parte, la modelación de la precipitación hipotética con un umbral de 8 días y mismo volumen arroja valores del **FS** de entre 3.5 y 2.7 para los primeros 5 días (**Figuras 101 y 102**) considerando con ello una estabilidad aceptable de los depósitos de suelo en el modelo. A partir del final del 5<sup>to</sup> día, el descenso de la estabilidad es tan fuerte que en 24 horas se pasa de un **FS** de 3.3 a 1.4 (42% de decaimiento). El valor más crítico se tiene en el séptimo día con un FS de 1.037, para después observar una recuperación ligera que le permite a la ladera llegar con un FS de 1.2, suficiente para considerarla como estable. Con este resultado en la modelación se comprueba que si el volumen de lluvia que precipitó durante el evento del 2010 en la zona de estudio se hubiera presentado durante un mayor tiempo (menor intensidad), la estabilidad de la ladera estaría en un rango crítico, pero no se llegaría a presentar el PRM al darle el tiempo suficiente para que la lluvia fluyera sobre los depósitos de suelo.

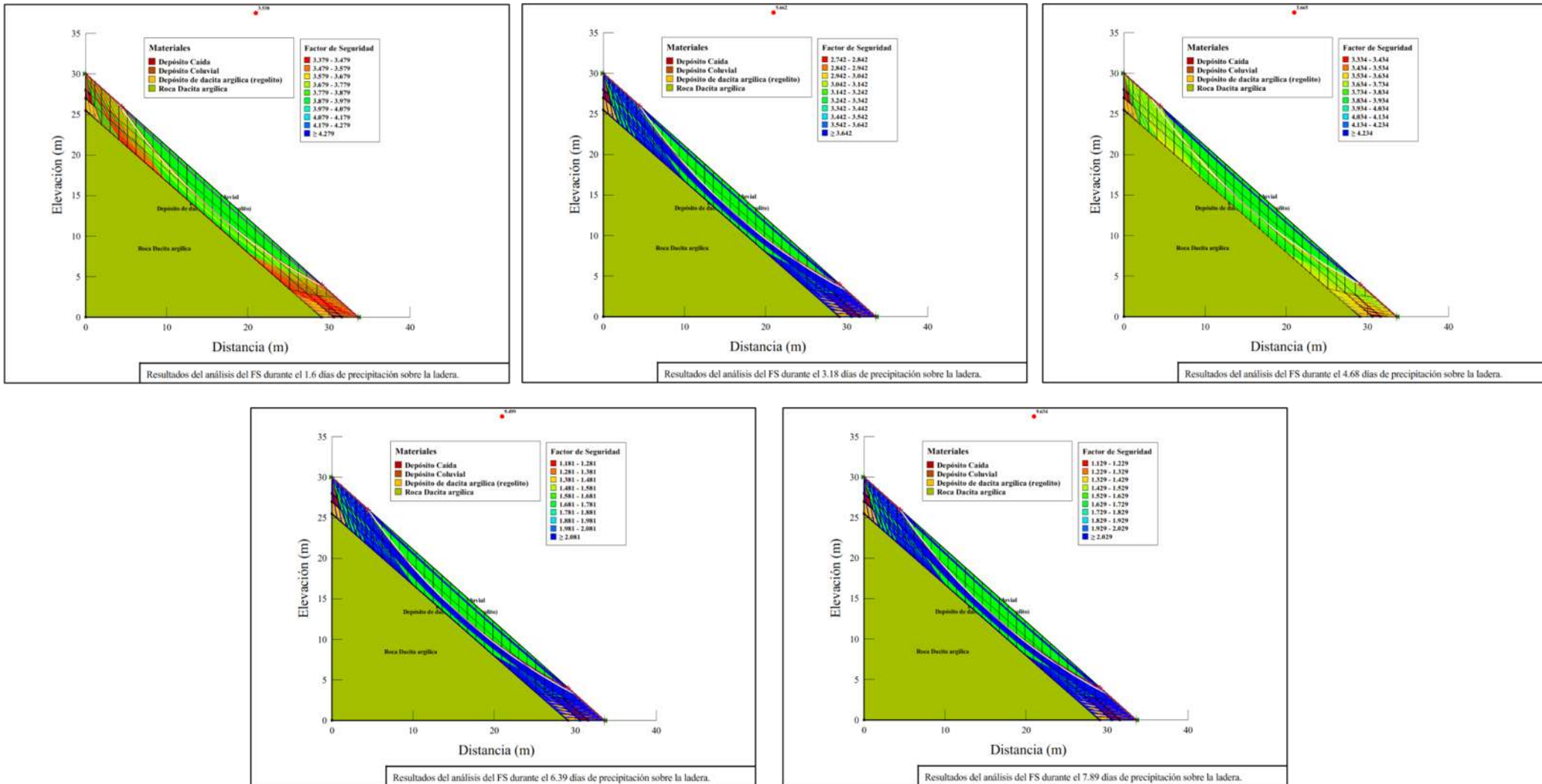


Figura 101. Resultados del análisis del FS para el modelo en Slope/w, durante 8 días de precipitación.



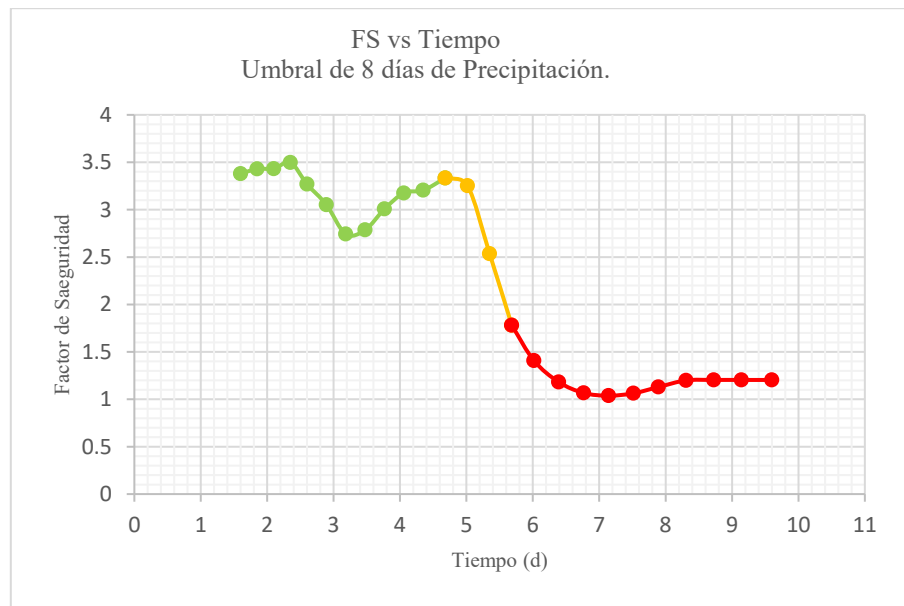


Figura 102. FS por el modelo para 8 días de precipitación.

#### 7.4.3. Resultados de los análisis con el umbral de precipitación.

De los resultados obtenidos durante el análisis, se obtuvo que la cantidad de lluvia con la que se presentaría el PRM según los datos obtenidos mediante el análisis de Seep/W, sería durante el **3.75** días, y que para ese tiempo se presentan **111.625**  $\text{lt}/\text{m}^2$  de lluvia precipitada, momento en el que el valor del FS fue de **0.926**, causando el PRM sobre la ladera sureste del Cerro Guadalupe del municipio de Angangueo, Michoacán.

Mientras que para los análisis con umbrales modificados en el tiempo de 2 y 8 días de precipitación, pero conservando la misma cantidad de lluvia precipitada durante el evento del 2010, se obtuvo que para el umbral de 2 días de precipitación, el FS con el que se presentaría la desestabilización de la ladera fue de 0.758; ocurriendo durante el 1<sup>er</sup> (1.36 días), y se tendría una cantidad de lluvia precipitada de  $73.562 \text{ lt}/\text{m}^2$  para ese momento, esto debido a una gran intensidad de la precipitación en un corto tiempo. Para el análisis de precipitación en una prolongación en el tiempo de 8 días, se tendría un FS crítico de 1.037 presentándose durante el 7<sup>mo</sup> día de precipitación (7.14 días), correspondiendo a una cantidad de lluvia precipitada de  $204.373 \text{ lt}/\text{m}^2$ . Estos resultados se muestran en la [Tabla 19](#).



Tabla 19. Resultados de la modelación en Slope/w mostrando los valores donde ocurre la inestabilidad de los depósitos de suelo a causa de las precipitaciones consideradas.

Umbral de Precipitación (días)	Tiempo Falla (días)	FS	Volumen de Precipitación (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Hp (lt/m <sup>2</sup> )
2	1.386	0.758	0.074	73.562
5	3.75	0.926	0.112	111.625
8	7.141	1.037	0.204	204.373

Con los resultados obtenidos de los análisis en el módulo Seep/w y utilizándolos en el módulo Slope/w se obtuvieron los FS; y de acuerdo con los caudales utilizados para cada uno de los umbrales de precipitación, se obtuvieron los resultados que se muestran en la [Tabla 20](#) y las gráficas en las [Figuras 103, 104 y 105](#).

Tabla 20. Resultados de los análisis sobre el comportamiento que va teniendo el FS en relación al caudal precipitado en los umbrales de precipitación utilizados.

Umbral de Precipitación (días)	Tiempo (seg)	FS	Caudal (m <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> )
2	34560	3.379	2.56481E-08
	75180	1.279	9.79815E-07
	106740	1.691	8.25648E-07
	141300	0.350	4.91244E-06
	172800	0.400	3.89161E-06
5	86400	3.379	2.31481E-08
	172800	2.197	4.39815E-07
	270000	2.629	3.35648E-07
	360000	0.704	1.94444E-06
	432000	0.860	1.42361E-06
8	138240	3.379	1.31481E-08
	275040	2.742	3.09815E-07
	404640	3.334	2.15648E-07
	552240	1.181	1.14444E-06
	681840	1.129	1.02361E-06

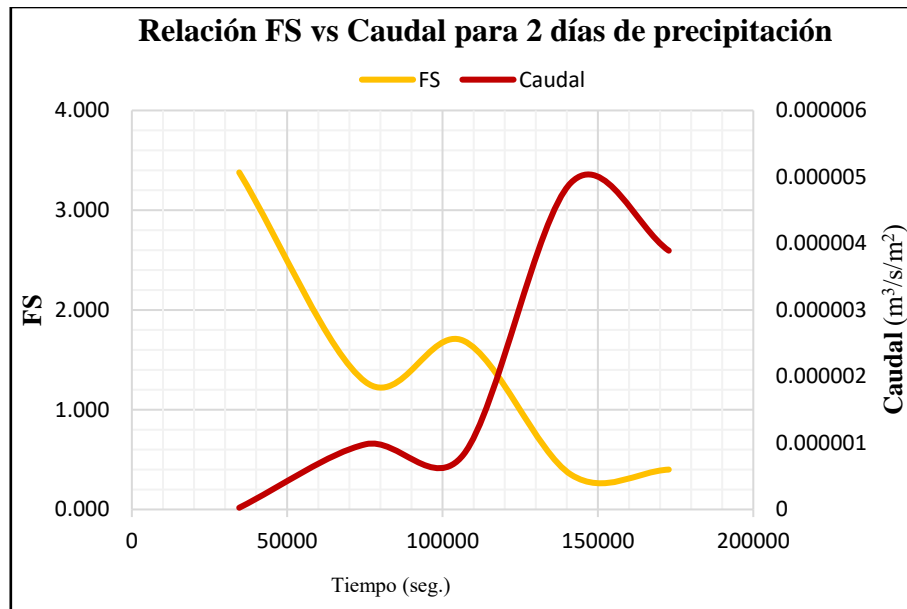


Figura 103. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 2 días.

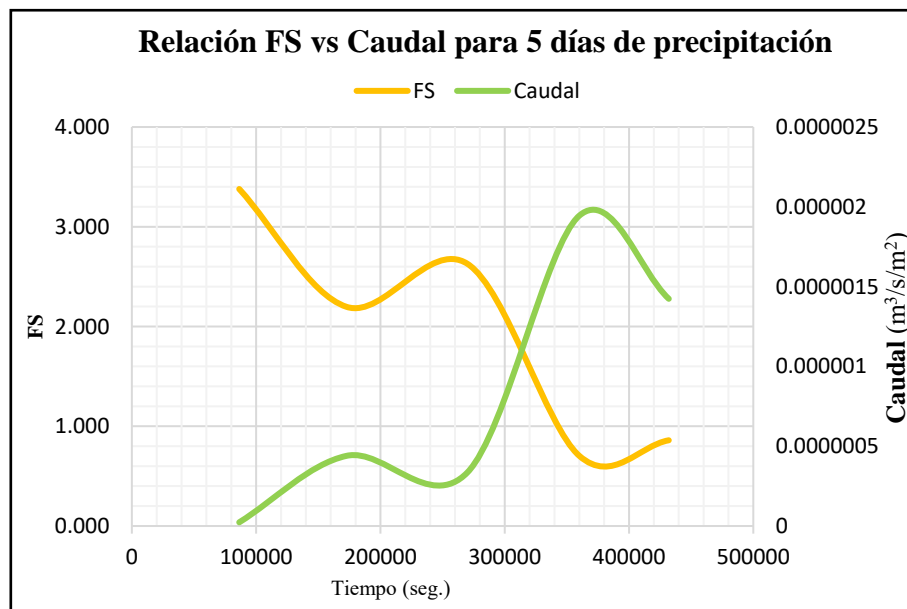


Figura 104. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 5 días.

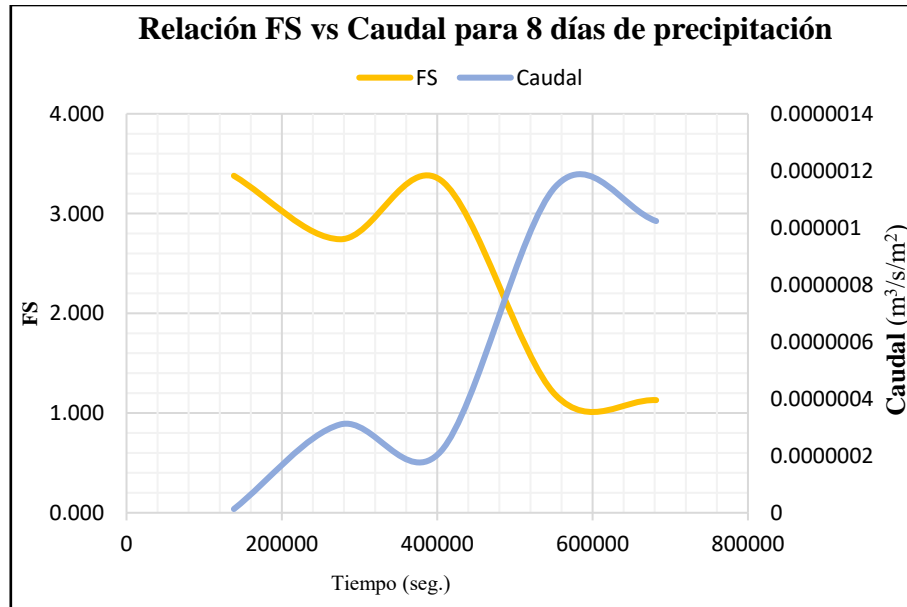


Figura 105. Comparación entre los FS y el caudal a lo largo del tiempo de precipitación para 8 días.

## Capítulo 8. Análisis y discusión de resultados

---

Los resultados obtenidos permiten identificar variaciones importantes en las propiedades físico-mecánicas de los materiales superficiales (depósito coluvial y caída de lapilli), que influyen en la inestabilidad de la ladera. Por ejemplo, el  $W_c(\%)$  es casi dos veces mayor en el Depósito coluvial (23.91%) y depósito de caída de lapilli (21.65%) que en el regolito (12.86%), por lo que se infiere una mayor capacidad de retención de agua en los dos primeros. Esto provoca que durante la temporada de lluvias se tengan pesos volumétricos altos en las capas superficiales y con ello se incrementa su susceptibilidad al colapso. Considerando lo anterior en conjunto con observaciones de campo, se estableció que el contacto entre los depósitos superficiales y el regolito, funcionó como superficie de debilidad o deslizamiento (**Figura 106**).



Figura 106. a) Depósito de roca dacita argílica (regolito); b) suelo que se movilizó sobre el depósito de roca dacita argílica en la parte inferior (depósito de caída).

En congruencia con lo anterior, los resultados de la prueba de compresión triaxial (UU) confirman que el regolito presenta la mejor resistencia de los materiales que integran a la ladera en estudio. La cohesión alcanzada en este material es de  $0.75 \text{ kg/cm}^2$  con un ángulo de fricción de  $50^\circ$  por lo que se considera el más estable.



El valor de permeabilidad ( $k$ ) obtenido en campo mediante un infiltrómetro de membrana, resultó ser más confiable que el generado a partir de la prueba de consolidación unidimensional. Los valores para el depósito coluvial y de lapilli fueron de 0.0000055401 m/s y 0.000001344 m/s, respectivamente, datos congruentes con aquellos reportados en la literatura (González, 2002).

En lo que respecta a la determinación de la SWCC es indiscutible que su comportamiento muestra gran sensibilidad con las propiedades físico-mecánicas del material, así como de las condiciones en que se puedan encontrar cada uno de ellos. Como lo expresado por Pérez (2008) que, en relación con la determinación de la curva característica, hay factores que influyen en su obtención, los cuales se mencionan en el Apéndice.

Para el estudio del efecto de la precipitación en la inestabilidad de una ladera, particularmente en suelos no saturados, es de gran importancia la SWCC debido a que ésta permite identificar el efecto de la presión intersticial en el Factor de Seguridad. Por ejemplo, en suelos de textura gruesa normalmente la superficie de debilidad se presenta al pie de la pendiente como consecuencia de la acumulación de presión intersticial. Mientras que el suelo de grano fino registra una pérdida de succión matricial en toda la longitud de la ladera, favoreciendo el desarrollo de deslizamientos traslacionales poco profundos (L'Heureu, 2005) tal como sucedió en la ladera del Cerro Guadalupe, motivo de este estudio.

Además, la inclinación de la ladera tiene mayor influencia en el suelo de grano grueso que en uno de grano fino. Resultados obtenidos por Gallage *et al.* (2021), demostraron que en un suelo SM la superficie de cortante fue inducida por la disminución del esfuerzo efectivo y resistencia al esfuerzo cortante, como consecuencia de una presión intersticial positiva. Gallege *et al.* (2021) concluyen que en este tipo de suelos y con una inclinación de ladera de  $45^\circ$ , la falla se inicia mucho antes que la saturación del pie.

En los resultados obtenidos en el presente trabajo se observa que la inclinación de la ladera es superior al ángulo de fricción del suelo, por lo que, de acuerdo con Bittelli *et al.* (2012), Song *et al.* (2016) y Gallege *et al.* (2021), el inicio de la falla se puede asociar directamente con la disminución de la succión.



## 8.1. Modelación numérica

En la modelación se realizaron muchas pruebas variando los parámetros de contorno del modelo, con la finalidad de observar cómo se presenta la filtración del agua precipitada en el perfil durante el periodo de los 5 días que se tuvieron de registros en la estación, así como en la modificación en la duración de la precipitación para 2 y 8 días, y comparar los resultados obtenidos a lo acontecido en el evento del 2010.

De la **Tabla 19** nos podemos dar cuenta como aun con la modificación de los umbrales de precipitación en relación con el tiempo, se produjo la desestabilización de los depósitos de suelo, y que únicamente en el análisis de 8 días de precipitación, se llegó a un estado crítico en la estabilidad de la ladera pero sin decaer el FS a valores menores de 1, que indicaran un posible deslizamiento.

Estos resultados son solo tomando en consideración a la precipitación, pero habrá que llevar a cabo un análisis en cuanto, así además de la precipitación, se tuvieron granizadas en la zona en los previos al evento o durante el mismo, que pudieran aumentar el peso sobre los depósitos de suelo y una vez que se descongelaran, produjeran un aumento aun mayor en el contenido de agua dichos depósitos; y que aunado a la precipitación, fuera uno más de los factores detonantes del PRM. Ya que con los resultados que se obtuvieron en la investigación se pudo concluir, que dada la cantidad de lluvia precipitada durante el evento del 2010, y aunado a las características geomorfológicas de la ladera considerados como factores condicionantes; fuera la lluvia atípica, el detonante del deslizamiento, por el incremento en la saturación de los suelos dadas sus propiedades hidromecánicas, y aunada a la pendiente tan elevada sobre la zona de desprendimiento, no permitió la estabilidad de los mismos, al incrementar la presión de poro que produjo la pérdida de resistencia de los materiales y provocando el movimiento en los mismos, y que dada la cantidad de lluvia, este evoluciono a flujo de lodos y detritos.



## 8.2. Recomendaciones para trabajos Futuros.

Se recomienda realizar más estudios mediante pruebas directas en campo en relación a la resistencia al corte *in situ*, así como la determinación de la permeabilidad directa de cada uno de los estratos de suelo, que nos permitan conocer de una mejor manera las propiedades hidromecánicas de los materiales. También se deberá de tomar en consideración la vegetación, en relación al aporte que le genere este a la estabilidad de los depósitos de suelo.

Además de contar con más equipo para la determinación de la **SWCC**, que en el presente trabajo, ya que como se mencionó, se tuvo que obtener una curva de ajuste dado que solo se pudieron determinar pocos puntos de la gráfica dada la falta de equipo en el laboratorio, que permitiera obtener una gráfica que abarcara los más puntos posibles dentro de la misma. Considerando que con estudios más a profundidad sobre las propiedades hidráulicas de los suelos, como lo es su permeabilidad en campo, proporcionaría mejores resultados, ya que en el modelo que se utilizó en el presente estudio, se observó cómo el modelo es muy sensible en este parámetro para realizar los análisis.

Es recomendable realizar el mismo análisis pero ahora variando la pendiente de la ladera. Con estos resultados se podrían realizar una zonificación determinística de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa.

Todo lo mencionado sería de gran interés en trabajos futuros para tener un panorama más amplio sobre el comportamiento del fenómeno ocurrido en la ladera del Cerro Guadalupe y en general sobre los fenómenos de remoción en masa.

Además, considerando que en la actualidad se tiene el riesgo por posibles nuevos deslizamientos sobre la zona; será recomendable llevar acabos estudios en relación a posibles obras de contención que ayuden a mitigar ese peligro al que se ven expuestos las viviendas y habitantes que continúan en dicha zona.





## Capítulo 9. Conclusiones

---

La integración del modelo numérico que permitió evaluar la sensibilidad de la ladera del Cerro Guadalupe (Angangueo) con la intensidad de lluvia, permitió demostrar la hipótesis planteada en este proyecto.

La SWCC juega un papel esencial para la modelización numérica de la infiltración y sus efectos en la presión de poro, tensión efectiva, y factor de seguridad; por lo que su elaboración requiere especial atención, así como equipo especializado y completo.

La variación temporal del factor de seguridad solo puede ser obtenida mediante la integración del resultado del modelo de infiltración a la evaluación de las superficies de debilidad más críticas.

El análisis de tres tipos de intensidades permite concluir que la lluvia con registro hipotético de 8 días no compromete la inestabilidad de la ladera.

Se concluye finalmente que la ladera en estudio presenta gran sensibilidad a la intensidad de lluvia por lo que para lluvias de intensidad muy alta el colapso se produce en apenas 33 horas, con intensidades altas el FS crítico se obtiene en 90 hrs, y para intensidades medias el FS más bajo se registra en 171 hrs con posibilidad de no caer por debajo del valor crítico de 1.

Concluyéndose que en este evento se cumplió y comprobó la hipótesis, sobre que el factor detonante del deslizamiento, fue la lluvia, al obtener un FS de 0.926 durante el 3.75 días de precipitación, con un caudal para ese momento de  $0.112 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . El cual provoco la afectación de 9 viviendas, con el lamentable deceso de 16 personas las cuales habitaban las faldas de la ladera.

Concordaron en ese momento, los factores condicionantes, siendo el principal de ellos, la topografía escarpada de la ladera con una pendiente superior a los  $50^\circ$ , aunado a las propiedades los materiales presentes en la zona, dado su origen litológico; siendo la precipitación atípica, el detonante del deslizamiento y evolución a flujo de lodos-detritos, por la gran cantidad de lluvia precipitada en la región. Debido a que en los análisis experimentales en los que se modificó el tiempo de duración de la precipitación, se mostró como con un tiempo más corto (2 días de precipitación), también se produciría el deslizamiento, por la gran intensidad de lluvia que precipitaría en un corto tiempo, mientras que para un tiempo más largo de precipitación (8 días),



la ladera se mantendría en una estabilidad crítica pero que no llegaría a presentarse el deslizamiento.

Con el presente trabajo, queda evidencia de las repercusiones que representan las precipitaciones atípicas en los PRM, y la importancia de llevar a cabo más estudios enfocados en este fenómeno, tanto de manera regional como de manera local, para prevenir a la población que pudiera verse afectada, de los riesgos a los que se pueden ver expuestos si se presentaran este fenómeno.



## Referencias bibliográficas

---

Alcántara-Ayala I., López-García J., Garnica R. J. (2011). On the landslide event in 2010 in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Angangueo, Michoacán, México. Landslides. Publicado en la web el 27 de agosto de 2011.

Alcántara-Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología", Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.

Alegría, O. C., y Rojas, F. N. O. (2015). Análisis de un deslizamiento en ladera formada por suelos residuales en la microcuenca el ventilador, Angangueo, Michoacán, México.

Aleotti, P., (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. Engineering Geology No. 73, Elsevier, p. 247-265.

Aristizábal, E., Gamboa, M., & Leoz, F. (2010). Sistema de alerta temprana pro movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de Aburrá, Colombia. Escuela de Ingeniería de Antioquia, 13, 155-169.

Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. Revista EIA, (15), 95-111.

Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 34(131), 209-227.

ASTM 2016. ASTM Standard D6836-16 Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. West Conshohocken, PA: ASTM International.



Bittelli, M., Valentino, R., Salvatorelli, F. y Pisa, PR (2012). Monitoreo suelo-agua y condiciones de desplazamiento que conducen a la ocurrencia de deslizamientos en arcillas parcialmente saturadas. *Geomorfología* , 173 , 161-173.

Borja Baeza, R. C., y Alcántara Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones geográficas*, (53), 7-26.

Braja M. Das, (1999). Principios de ingeniería de cimentaciones. cuarta edición, California State University, Sacramento. Internacional Thomson Editores. 1999 pág. 32-34.

Braja, M. D. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Thomson y Learning, 580.

Bucarey Aichele N. C., (2018). Evaluación de la susceptibilidad de flujos de detritos en Quebradas Carrizalillo y de Meléndez, comuna de tierra amarilla, región de Atacama. (Memoria para optar al Título de Geólogo). Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Bustamante García, J., eta al (2007). Inventario Físico de los recursos minerales del municipio de Angangueo, Michoacán. Servicio Geológico Mexicano, Secretaria de Desarrollo Económico del Estado de Michoacán.

Bustamante García, J., et al (2007). Inventario Físico de los recursos minerales del municipio de Ocampo, Michoacán. Servicio Geológico Mexicano, Secretaria de Desarrollo Económico del Estado de Michoacán.

Bustamante García, J., et al (2007). Inventario Físico de los recursos minerales del municipio de Tlalpujahu, Michoacán. Servicio Geológico Mexicano, Secretaria de Desarrollo Económico del Estado de Michoacán.

Carrasco Elgueta, J. C. (2017). Implementación de ensayos de succión en suelos parcialmente saturados y análisis de resultados en suelos residuales.

Casillas García, Alejandro, (2016). Determinación del umbral de precipitación en el deslizamiento La Pintada, Guerrero. (Tesis de grado para obtener el título de Maestro en ciencias con especialidad en Geociencias y Planificación Territorial) Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.



Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)/UCL/WHO. Annual disaster statistical review 2009, the numbers and trends. Vos, Femke; Rodriguez, Jose; Below, Regina and Guha-Sapir, D. (eds.). Brussels, 2010. 38 p.

Cevat-Catana, M. Compaction and Water Retention Characteristics of Champlain Sea Clay. MS thesis. University of Ottawa, Canada (2006).

Chai, J., & Khaimook, P. (2020). Prediction of soil-water characteristic curves using basic soil properties. *Transportation Geotechnics*, 22, 100295.

Corominas, J. & García Yagüe A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. IV Simposio Nacional sobre taludes y laderas Inestables. Granada. vol. 3,1051-1072

Cortes Vargas Martha (2013). Propiedades Edáficas y su Relación con la estabilidad de la Estructura de los Suelos de Angangueo. (Tesis de grado para obtener el título de Maestra en ciencias con especialidad en Geociencias y Planificación Territorial) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Departamento de Geología y mineralogía, UMSNH. Morelia, Michoacán.

Crespo Villalaz, C. (1979). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (No. 624.151 C7).

Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 43(1), 27-29.

Cruden, D., Varnes, D., (1996). Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.

Cuanalo, O. A., Quezada, P., Aguilar, A., Olivan, A. M., & Barona, E. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. *e-Gnosis*, (4), 0.

Das, B. M., & González, S. R. C. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (pp. 445-494) (pp. 339-347). Thomson Learning.



Figueroa Miranda, S.,(2013). Estudio del Peligro por flujos de detritus y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Angangueo, Mich. (Tesis de grado Maestro en Ciencias, Geociencias y Planificación del Territorio). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Departamento de Geología y Mineralogía, Morelia, Michoacán.

Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian geotechnical journal, 31(4), 521-532.

Gallage, C., Abeykoon, T. y Uchimura, T. (2021). Taludes modelo instrumentados para investigar los efectos de la inclinación de taludes en los deslizamientos de tierra inducidos por la lluvia. Suelos y Fundaciones , 61 (1), 160-174.

García, J. C. (2005). Análisis de la Vulnerabilidad por movimientos de ladera: Desarrollo de las metodologías para la evaluación y cartografía de la vulnerabilidad. España: Instituto Geológico y Minero de España.

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Seepage modeling with SEEP/W (<http://downloads.geoslope.com/geostudioresources/8/0/6/books/slope%20modeling.pdf?v=8.0.7.6129> ).

GEO-SLOPE,I.L.,(2012). Stability modeling with slope/w. (<http://downloads.geoslope.com/geostudioresources/8/0/6/books/slope%20modeling.pdf?v=8.0.7.6129>)

GeoStru (<https://www.geostru.eu/> )

González de Vallejo, L., (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Prentice Hall. 715 p.

Hauser, A. (1993). Remociones en masa en Chile (No. 45). Servicio Nacional de Geología y Minería. p. 7-29.

Houston, W. N., Dye, H. B., Zapata, C. E., Perera, Y. Y., & Harraz, A. (2006). Determination of SWCC using one point suction measurement and standard curves. In Unsaturated Soils 2006 (pp. 1482-1493).



- Huape P., Grecia A. (2018). "Vulnerabilidad socio-ambiental en Angangueo, Michoacán y su impacto en el bienestar social". (Tesis de grado de doctorado en desarrollo regional). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales.
- Hunter G., Fell. R. (2003) Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes. *Can. Geotech. J.* 40. Pp. 1123–1141.
- Janbú N. (1954). "Stability Analysis of Slopes with Dimensionless parameters". Harvard Soil Mechanics Series No. 46.
- Jeong, S. S., Kim, J. H., Kim, Y. M., & Bae, D. H. (2014). Susceptibility assessment of landslides under extreme-rainfall events using hydro-geotechnical model; a case study of Umyeonsan (Mt.), Korea. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(8), 5575-5601.
- Joseph E. Bowles. (1988). *Foundation Analysis and Design*. Editorial McGRAW-HILL INTERNATIONAL, Series Civil Engineering, 4th Edition, p.48.
- Juárez Badillo, E., & Rodríguez, A. R. (1980). *Mecánica De los suelos–TOMO III*-Editorial LIMUSA.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., & Sharma, J. (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology*, 75
- Krahn, J. (2004). *Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology*. GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada.
- Lambe, W., Whitman, R., (1972). *Mecánica de suelos*. Instituto Tecnológico de Massachusetts, Editorial Limusa-Wiley S.A., 583 p.
- Leroueil S., Locat J., Vaunat J., Picarelli L., Lee H, Faure R. (1996) "Geotechnical characterization of slope movements". *Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides, Trondheim*, pp 53-74.
- L'Heureux, J. S. (2005). *Unsaturated soils and rainfall induced landslides* (Master's thesis).
- Llorens, R. C., & Masquef, A. T. (2009). Movimientos de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 284-294.



Lowe J., (1976). Stability Analysis of Embankments, ASCE, I.S.M.F.D., Vol 93, July.

Manzini M. y Rabuffetti D. (2003). Sensitivity of rainfall thresholds triggering soil slip to soil hydraulic parameter and hillslope geometry. International Conference on fast slope movements, prediction and prevention for risk mitigation Naples Italia. Volumen 1. Bologna (eds) 349-355.

Marín, R. J., García, E., & Aristizábal, E. (2019). Umbrales de lluvia para deslizamientos superficiales basados en modelos físicos: aplicación en una subcuenca del Valle de Aburrá (Colombia). *Dyna*, 86(210), 312-322.

Mendoza Montes De Oca, Héctor F. (2005). Estudio geográfico del municipio de Angangueo, Michoacán. (Tesina para obtener el título de Licenciado en Geografía). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y letras colegio de Geografía. Ciudad Universitaria.

MicroGEO (<https://www.microgeo.it/public/userfiles/LaserScanner/VZ-1000.pdf> )

Miller, C. J., Yesiller, N., Yaldo, K., & Merayyan, S. (2002). Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9), 733-742.

Morgenstern N., Price V. (1965). "The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces", *Geotechnique* Vol 15, March.

Norma UNE 103402:1998, Determinación de los Parámetros Resistentes de Una Muestra de Suelo en el Equipo Triaxial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

Pasquaré G., Ferrari L., Garduño V.H., Tibaldi A. y Vezzoli L. (1991). Geology of the Central sector of Mexican Volcanic Belt, state of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart series*, MCH072, p. 22.

Perera YY, Zapata CE, Houston WN, Houston SL. Prediction of the soil-water characteristic curve based on grain-size-distribution and index properties. *Geotech Spec Publ* 2005; 130:49–60.

Pérez García, N. (2008). Determinación de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. *Publicación técnica*, (313).





Pierson T.C. and COSTA J.E. (1987) - A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. Geol. Soc. Am. Rev. Eng. Geol. VII, 1-12.

Popescu, M.E., (2002). Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore, p. 61-81.

Prieto, C., (1985). Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. Geología y prevención de riesgos por inundaciones, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.

Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Angangueo, Michoacán de Ocampo Clave geoestadística 16005, 2009.

Ramírez, I. (2001). Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. Investigaciones geográficas, (45), 39-55.

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., & Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy). Environmental Geology, 35(2-3), 146-159.

Rodríguez García, H. I., Cuevas Muñiz, A., & Arellano Ceballos, A. (2016). La reubicación humana por desastre en Angangueo, Michoacán. Entre la participación y significación social. Política y cultura, (45), 53-77.

Rodríguez Puentes, J. I. (2016). Análisis de deslizamientos superficiales generados por la lluvia en suelos de cenizas volcánicas mediante simulaciones de elementos finitos (Master's thesis, Maestría en Ingeniería Civil).

Ruiz Vázquez, M., & González Huesca, S. (2012). Geología aplicada a la ingeniería civil. Limusa.

Salas Canela, Lidia, (2013). Causas Directas del Cambio en la Cubiertas del suelo en la Región Mariposa Monarca: Un análisis multiescalar. (Tesis para obtener el grado de Maestro en Geografía). Posgrado en Geografía Facultad de Filosofía y Letras Instituto de Geografía centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM, México D.F



Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2003), Límites de Consistencia. MMMP-1-(07), 1-14.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2003). Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Suelos y materiales para terracerías, 1(01), 1-11.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2003). Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Clasificación de fragmentos de Rocas y Suelos, 1(02), 1-14.

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2003). Métodos de muestreo y pruebas de materiales. Masas Volumétricas y Coeficiente de Variación Volumétrica, 1(08), 1-27.

Selby, M.J., (1993). Hillslope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451 p.

Soilmoisture Equipment Corp ([www.soilmoisture.com](http://www.soilmoisture.com)).

Song, Y. S., Chae, B. G., & Lee, J. (2016). A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall. *Engineering Geology*, 210, 84-92.

Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge, ASTM D6836 – 02. (ASTM, 2008)

Terzaghi K., (1936). The Shear Resistance of Saturated Soils, en: Proceeding 1st International Conference, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts, United States of America, junio 1936.

Torres Fernández Lucía. (2014). Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos en el municipio de Angangueo, Michoacán, mediante probabilidad condicional enfocada al SIG. (Tesis de grado para obtener el título de Maestra en ciencias con especialidad en Geociencias y Planificación Territorial) Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Departamento de Geología y mineralogía, UMSNH. Morelia, Michoacán.



Tsai TL, Chen HF (2010) Effects of degree of saturation on shallow landslides triggered by rainfall. Environ Earth Sci 59:1285–129.

Tsai, T. L. (2011). Influences of soil water characteristic curve on rainfall-induced shallow landslides. Environmental Earth Sciences, 64(2), 449-459.

Valverde-Ruiz, E. A. (2010). Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud. (Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción) Instituto Tecnológico de Costa Rica escuela de ingeniería en construcción, p.0-84.

Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892–898.

Vargas Sánchez, Marlene (2020). Peligrosidad por caída de rocas en la falla geológica activa de Pajacuarán, Michoacán. (Tesis que para obtener el grado de Maestra en Ciencias de la Tierra), Universidad Nacional Autónoma de México programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Morelia, Michoacán.

Varnes, D.J., (1978). Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Schuster, R.L., Krizek, R.J., edits. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., p.11-33

Winterkorn y Fang, 1987. Foundation engineering handbook, Stability of earth slopes, pág. 354-371, Editorial Van Nostrand Reinhold.



## Apéndice

Algunas de las características que presentan las rocas sobre la ladera según la literatura, se presentan en la **Tabla 21** correspondientes a rocas ígneas.

Tabla 21. Clasificación de rocas (características y propiedades). (La geología en la mecánica de rocas, División de Educación continua, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 1984).

Tipo de Roca		ROCA	Composición		Textura	Estructura	Tonalidad	Densidad	Porosidad	Resistencia a Compresión	Resistencia a la Tensión	Resistencia al corte
ÍGNEAS	Volcánica o extrusiva	Dacita	1.3.5	(1) SiO <sub>2</sub> (cuarzo), (2) KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (ortoclasa), (3) CaAl <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (Plagioclasa), (4) Silicatos Ferromagnesianos, (5) Micas (biotita y moscovita), (6) Anfíboles y piroxenas, (7) Olivino	Afanítica a porfírica	Derrames lávicos	Clara	2.4-2.6	4-5	1550-3000	150-300	200-600
		Andesita	3.5	(1) SiO <sub>2</sub> (cuarzo), (2) KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (ortoclasa), (3) CaAl <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ·NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (Plagioclasa), (4) Silicatos Ferromagnesianos, (5) Micas (biotita y moscovita), (6) Anfíboles y piroxenas, (7) Olivino	Afanítica a porfírica	Derrames lávicos gruesos y cortos	Grisácea	2.2-2.3	10-15	1550-3000	150-300	200-600

FUENTE Ruiz Vázquez, M. & González Huesca, S. (2012). Geología aplicada a la ingeniería civil. Lima.

Algunos datos en cuanto a la consistencia aparente de los depósitos de suelo se tomaron utilizando un torquímetro y penetrómetro de bolsillo (kit de ensayo de inspección sobre el terreno en base a la norma **ASTM D2573**) los resultados se muestran en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Mediciones de resistencia aparente del suelo en campo utilizando molinete de Bolsillo.

Estrato	Distancias (cm)				T (Mpa)	Resultados Promedio (Mpa)				Resultados Promedio (Mpa)		
Depósito Coluvial	0	2.5	3.5	4	2.5	5.5	3.6	3.5	5.50	0.00006	0.000092	
	10	5	9	7	5	2.5	5.7	5.5				
	20	9	8.5	9	6.5	7	8	8				
	30	4	5.5	5.5	6.5	4	5.1	5				
Depósito de caída	40	3	9	6.5	7	6	6.3	6	6.67	0.00010	0.00011	
	50	7	7.5	6	7.5	7	7	7				
	60	5.5	5	6	9	8	6.7	7				
Roca argílica	Dacita	70	7	8.5	4.5	10	8	7.6	7.5	7.83	0.00012	0.00013
	80	6	7	9	9.5	9.5	8.2	8				
	90	5.5	10	9.5	5.5	10	8.1	8				

NOTA: todas la lecturas de dividen entre 10 en una graduación de 0-1 unidades en megapascales con la punta gruesas



Estrato	Distancias (cm)	T (Mpa)				Torque Promedio (Mpa)			Su Promedio (Mpa)	
		1.5	1	2.5	1	1.50	1.50	2.00	0.00010	0.000133
Depósito Coluvial	0	1.5	1	2.5	1	1.50	1.50		0.00010	
	10	3.5	4	1	1	2.38	2.00	2.00	0.00013	0.000133
	20	1.5	2	1	1	1.38	1.00		0.00007	
	30	4.5	6	2	2	3.63	3.50		0.00023	
Depósito de caída	40	2	2.5	4	1.5	2.50	2.50		0.00017	
	50	5	3.5	8	4	5.13	5.00	3.67	0.00033	0.00024
	60	3	5.5	4	2	3.63	3.50		0.00023	
Roca Madre R	70	6	2	5.5	3	4.13	4.00		0.00027	
	80	np	np	np	np	np	np	4.13	NP	0.00027
	90	np	np	np	np	np	np		NP	

Sobre las pruebas para obtener la curva característica suelo-agua (SWCC), se presentaron varios inconvenientes a la hora de determinar los parámetros de humedad en algunos ensayos realizados, debido a que presentaban valores de humedad no esperados en función a la presión de aire a la que se sometían, y al revisar la literatura en relación a ello, se encontró que existen varios factores que afectan la obtención de estos parámetros, los cuales se mencionarán a continuación.

### 1.-Factores que afectan la obtención de la SWCC.

**1.1. El tipo de suelo.** Debido a que la cantidad de agua que puede almacenarse, depende del tipo de suelo que se esté probando, es decir, que estructura y propiedades presenta, ya que se ha observado que cuanto más plástico es el suelo, este tiende a presentar retención del agua en un mayor grado. Al realizar una comparación de la curva característica de diferentes tipos de suelo como lo es para una arcilla de alta plasticidad (CH), una arcilla de baja plasticidad (CL) y una arena limosa (SM), tal como se muestra en la **Figura 107**.

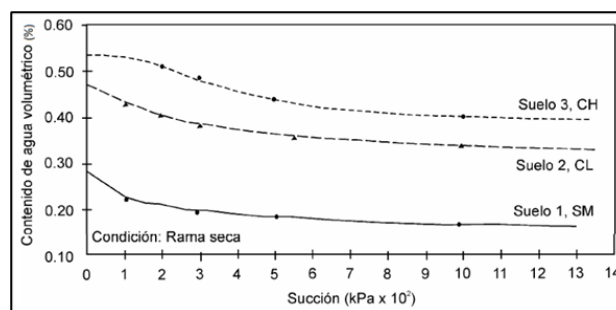


Figura 107. Curva característica suelo-agua para tres tipos de suelo diferentes.

Fuente: Pérez, 2008. Modificado por: Chon kan (2017).

**1.2. La energía de compactación.** Es otro factor a considerar, ya que esta, tiene incidencia en la forma en cómo se acomodan los granos y partículas dentro del suelo. En Miller *et al.* (2002) se muestra una serie de curvas para una arena limosa (**SM**) que se utilizó bajo los regímenes de energía de compactación estándar, modificada y reducida, y en esto se observó, que se presentaba una variación significativa en la compactación reducida, presentando un mayor contenido de agua; así como un valor de entrada de aire menor respecto a los compactados de manera estándar y modificada. Lo antes mencionado se puede observar en la **Figura 108**.

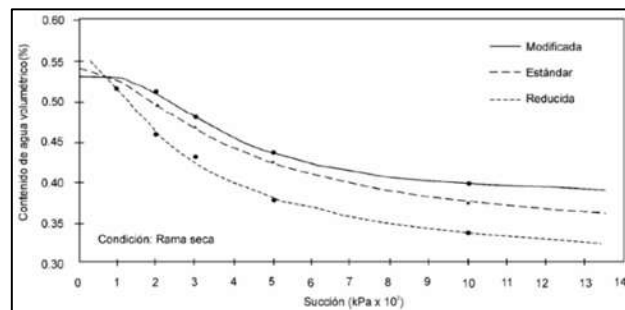


Figura 108. Efecto de la energía de compactación en la curva característica (Miller, et al., 2002). Suelo CH.  
Fuente: Pérez, 2008.

La energía de compactación en suelos granulares es independiente a su curva característica, ya que al hacer un incremento en la energía de compactación, no se logra un mayor acomodo en las partículas, mientras que por otro lado, para suelos finos las curvas características para diferentes energías de compactación si varían.

Cabe mencionar que el efecto que tiene la relación de vacíos de un suelo es determinante, ya que es ahí donde se aloja el agua.

Aún con lo ya mencionado, en los cambios que presentan los suelos finos según la energía de compactación, Sugii *et al.* (2003) y citado por Cevet (2006), muestran que la curva característica en arenas, es independiente de la energía de compactación aplicada (**Figura 109**). Observándose que para arenas, aunque la energía de compactación se incremente, no se llega a lograr mayor acomodo de las partículas, y que esto trae como consecuencia, que para el rango de contenidos de agua que se utilizaron las densidades tienden a variar muy poco, es por esto que la curva característica para suelos granulares es independiente de la energía de compactación aplicada.

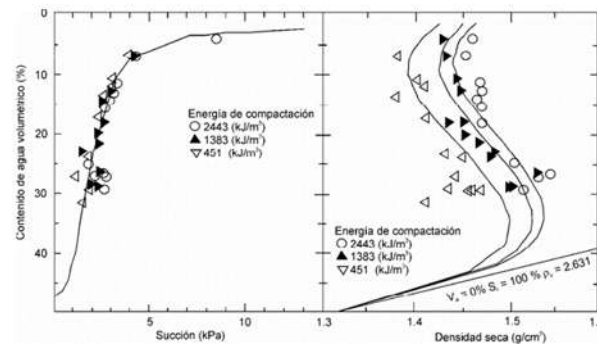


Figura 109. Compactación y curvas características (Sugii, *et al.*, 2003).

Fuente: Pérez, 2008.

**1.3. El contenido de agua inicial de las muestras.** Es un aspecto que fue analizado por Miller *et al.* (2002), mostrando como esta no llega a influir de manera importante en la determinación de la curva característica, tal como se aprecia en la **Figura 110**, donde las curvas para dos muestras de suelo compactadas con diferentes contenidos de agua iniciales (contenidos de agua en la rama seca y húmeda), no se puede apreciar una diferencia a considerar.

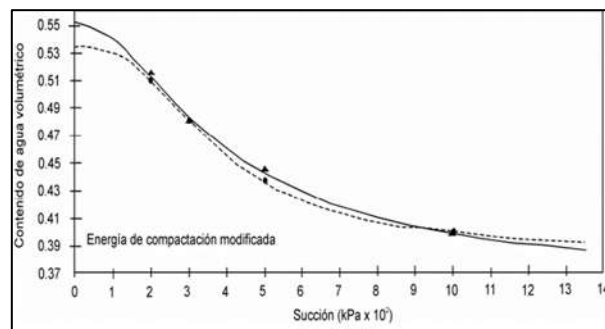


Figura 110. Efecto del contenido de agua de compactación en la curva característica (Miller, *et al.*, 2002).

Fuente: Pérez, 2008.

**1.4. La técnica de saturación del espécimen a probar.** En Barbosa *et al.* (2002), y citado por Cevat (2006), muestran dos curvas características en donde se utilizó dos métodos para saturar los especímenes compactados, el primero fue colocando los especímenes en agua y después someterlos a vacío, mientras que la otra manera fue saturando los espécimen con vacío y después sumergirlo en agua. Al realizar las pruebas se obtuvo que los especímenes que se sumergieron en agua y después se llevaron a aplicar vacío, presentaron un grado de saturación mayor en comparación con los que se saturaron con vacío y después se sumergieron en agua. Por esta razón,

las curvas características de ambos son diferentes al menos en el rango de 1 a 50 kPa, y para succiones mayores las curvas convergen, tal como se muestra en la **Figura 111**.

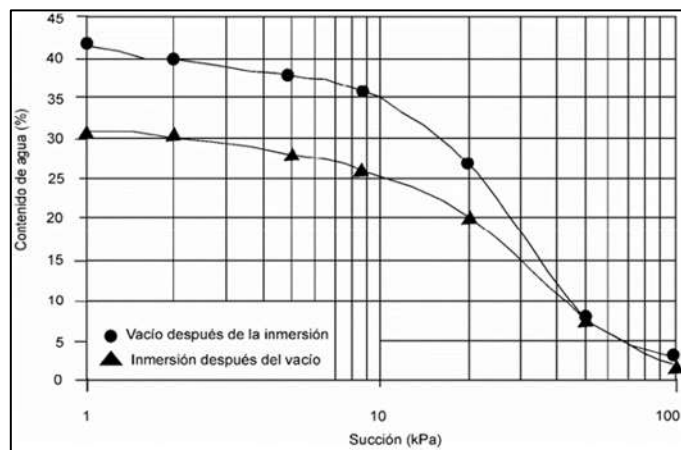
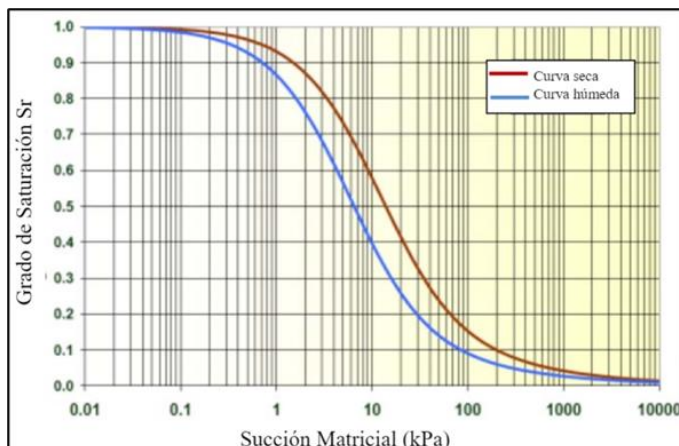


Figura 111. Efecto de la técnica de saturación en la determinación de la curva característica.

Fuente: Pérez, 2008.

### 1.5. El Fenómeno de Histéresis.

La relación que existe entre la succión  $\psi$  (potencial matricial) y el contenido de agua, es decir su contenido de agua de un suelo, no es la única, al considerar por ejemplo, que un suelo el cual sufre un proceso de secado ya sea este por la evaporación o mediante drenaje, y otro un proceso de humedecimiento por efecto de lluvia o por capilaridad; en ambos casos y en el mismo valor de succión, se tendría que, para el suelo en proceso de secado retiene más agua que el que sufre



humedecimiento. Este fenómeno es conocido como histéresis (**Figura 112**), y este comportamiento se debe al aire que está atrapado en la estructura del suelo, su no uniformidad y a la diferencia de tamaño de los poros, expansión y contracción del suelo, que puede alterar su estructura (Tuller y Or, 2005; Likos y Lu, 2004).

Figura 112. Fenómeno de histéresis en suelos en procesos de secado y humedecimiento.

Fuente: Beltrán, 2009.





## 2. Ejemplo de cómo se llevó a cabo la prueba para obtener la SWCC.

Para la realización de las pruebas con los extractores se siguieron las indicaciones aportadas por *SOILMOISTURE* (la empresa fabricante de los equipos utilizados), donde se indica que las pruebas se pueden realizar con muestras inalteradas, si se pueden obtener en campo o para muestras alteradas, si se llega a dificultar la obtención de muestras inalteradas como fue en nuestro caso.

Una vez que se obtuvieron las muestras alteradas, se secaron y cribaron por la malla N°10 (2 mm), y utilizando un recipiente limpio, se coloca el material necesario para preparar la cantidad de especímenes que cubran un plato cerámico, pesándolo en una báscula de 200 gr de capacidad y aproximación al centésimo de gramo (0.01). Se realiza un remoldeo de la muestra con las propiedades que presentan los suelos en campo, siendo estas, la humedad de campo ( $w_c$ ) y el peso volumétrico húmedo de campo ( $\gamma_c$ ). Se realizó el cálculo como se muestra en la [Tabla 23](#).

Tabla 23. Remoldeo de las muestras de suelo para el depósito coluvial.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO COLUVIAL						
REMOLDEO #	1	Material:		Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):
Fecha:	09/07/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	5	5
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.99	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
$\omega_{campo}$ (%) =	23.91	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. - W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.606					
$\omega_{Actual}$ (%) =	8.20					
l Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	507.144	Ph (gr)=	100	
Volume n para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	508	Ps (gr)=	92.42	
Peso muestra por anillo (gr) =	42.33	Agua Requerida (ml) =	73.750	$\omega_{Actual}$ (%) =	8.20	
		más 3%	75.96	76		

De los resultados de remoldeo, se tomó la cantidad de material necesario para preparar las muestras en los anillos con la cantidad de material y la humedad requerida para representar las características de campo; utilizando el equipo siguiente: los extractores, placas de presión, anillos, compresor de aire, horno y material de laboratorio como probeta, recipientes de aluminio, atomizador, gotero, cucharas, pisón y una báscula con aproximación al centésimo de gramo, tal como se muestra en la [Figura 113](#), y basados en los pasos siguientes:



Figura 113. Equipo y material utilizado en la prueba para determinar la SWCC en laboratorio.

### 2.1. Preparar y saturar muestras de suelo perturbado.

1.- Se pesa en la báscula el material previamente cribado por la malla y secado, por ejemplo, como en que se muestra en la [Tabla 23](#), en el que se indica que se ocupan 508 gr de material seco, y se midió 76 ml de agua en la probeta de cristal de capacidad de 100 ml; siendo esta cantidad de agua que se determinó como la humedad del suelo actual, para adicionar al suelo y este llegara a la humedad de campo que es la que se representara en las muestras; que en nuestro caso sería de un 23.91% ([Figura 114](#)).



Figura 114. Proceso de remoldeo para obtener las muestras que se utilizaran en la prueba.

2.- Se procede a preparar los anillos identificándolos con una marca y pesándolos, además de determinar su volumen, para luego colocar el suelo sobre ellos y compactarlo con un pisón de prueba, colocando el material en tres capas con ayuda de un tubo de PVC de 2" de diámetro y una cuchara, y compactando cada una de ellas con 10 golpes dejando caer el pisón de manera cuidadosa a una altura de 5 cm aproximadamente, hasta que quede al borde del anillo ([Figura 115](#)). Se pesa la muestra con el anillo para verificar que cumpla con el peso volumétrico ( $\gamma_m$ ).

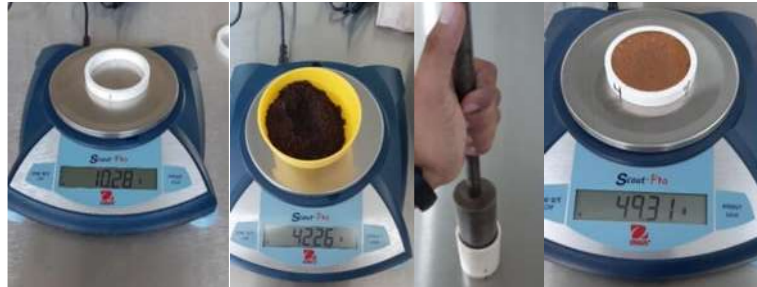


Figura 115. Proceso de obtención de las muestras de suelo en los anillos.

3.- Se realiza el labrado de 12 muestras, duplicando estos en otro plato cerámico. Previo a colocar las muestras sobre los platos cerámicos, los platos se saturan durante 8 a 24 horas para que se encuentren saturados y no absorban la humedad de las muestras (Figura 116).



Figura 116. Proceso de saturación de los platos cerámicos durante 8 a 24 horas.

Se coloca un papel filtro Whatman 5 sobre el plato, y encima del papel filtro se colocan las muestras labradas con la finalidad de que el material no entre en los poros del plato cerámico, y solo permita el paso del agua, todo esto se puede apreciar en la Figura 117.

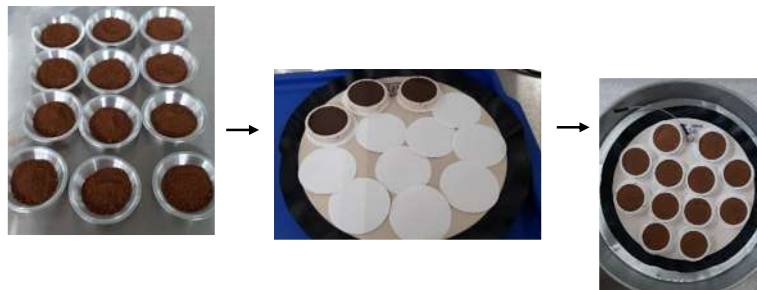


Figura 117. Proceso para la colocación de las muestras de prueba sobre los platos cerámicos, utilizando un papel filtro; y colocación de las muestras sobre estos.

4.- Se saturan las muestras junto con los platos; hay dos maneras en las que se puede hacer, una es colocándolas dentro del extractor (dentro del extractor se pueden colocar hasta 4 platos) verificando que la falda de goma de la placa esté colocada hacia arriba, y conectando el tubo de salida en la placa con el orificio de salida en el interior del extractor, girando la placa de ser necesario con la finalidad de que la manguera no quede muy forzada, luego se vierte agua con el gotero suavemente, teniendo el cuidado de no verter agua sobre las muestras de suelo directamente. El agua se agrega hasta que llegue a la altura de los anillos (1cm) y se mantienen hasta que las muestras se aprecien saturadas, esto puede tardar de unos minutos hasta horas, dependiendo del tipo de suelo (**Figura 118 a**).

La otra manera, es saturando las muestras en las bandejas de aluminio hasta que se aprecien saturadas, como se mencionó anteriormente y una vez que estén listas se colocan en el extractor (**Figura 118 b**).

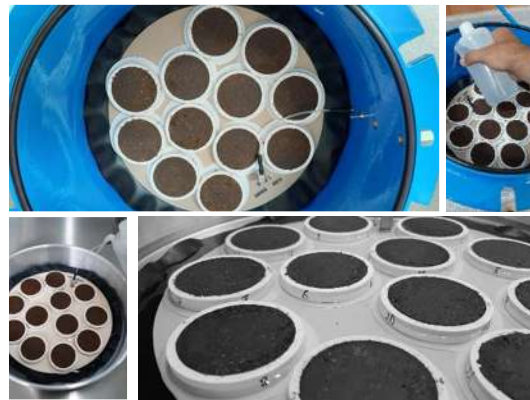


Figura 118. Formas de saturar las muestras: a).-Dentro del extractor y b).-En bandejas de aluminio.

Una vez saturadas y colocadas las muestras en el extractor, se cierra la tapa y se colocan los tornillos de presión para evitar fugas de aire por ella y provoquen errores en la prueba (**Figura 119**).



Figura 119. Colocación de la tapa del extractor y colocación de los tornillos para mantener la presión de aire.

5.- Se procede a extraerle el agua a las muestras utilizando presión de aire, administrado por el compresor *SOILMOISTURE* modelo 505 para 20 bares de presión (**Figura 120**).



Figura 120. Compresor SOILMOISTURE para 20 bares de presión.

El compresor va conectado al colector **0700CG23F1**, que tiene los extractores **1500F1** y **1600**, como se muestra en la **Figura 121**, en la cual se observa la mesa con la estación **0700G2** (extractor **1500F1** para presiones de hasta 15 bares) y la estación **0700G3F** (extractor **1600** para presiones de hasta 5 bares). Dependerá de la presión a la que se probarán las muestras, y con ello, el plato cerámico que se utilizara para tal fin; el realizar la configuración del colector y en la estación a utilizar para llevar a cabo la prueba.



Figura 121. Configuración del colector con sus estaciones (extractor 1600 y 1500F1) ya en funcionamiento.

Se aplica la presión de aire hasta que se mantenga un equilibrio, es decir, que no se aprecie en las salidas de los extractores goteo de agua; esto puede tardar desde unas horas hasta varios días (**Figura 122**).



Figura 122. Expulsión de la humedad en los especímenes de suelo aplicando una presión de 3 bar.

Luego de esto, se deja de aplicar la presión en los extractores al cerrar las válvulas reguladoras y se abre suavemente la válvula de liberación, esperando hasta que el indicador en el medidor indique cero, para que sea seguro abrir o retirar la tapa de los extractores, y se proceda a extraer los platos cerámicos con las muestras probadas (Figura 123).



Figura 123. Se retiran las muestras una vez deja de extraer agua (cuando se mantenga en equilibrio).

6.- Se determina la humedad de las muestras, retirándolas del plato cerámico cada una de ellas, teniendo la precaución de no rallar el plato cerámico, y quitándoles el papel filtro cuidadosamente utilizando una espátula, y retirando de ser necesario, el material que llegara a quedar sobre el papel filtro; para finalmente pesar una capsula de aluminio y colocar la muestra húmeda con el anillo; registrando esos datos en una hoja de registro (Figura 124).



Figura 124. Determinación del peso húmedo de las muestras de suelo.

9.- Una vez que se determinó el peso húmedo de las muestras de suelo, estas se colocan en el horno a 75 grados centígrados durante 48 horas (Figura 125), para poder determinar el peso seco de las muestras; después de retirarlas del horno, se dejan un tiempo para que alcancen una temperatura ambiente y se pesan las muestras de suelo con la capsula de aluminio y su anillo, registrando esos valores en una hoja de registro.



Figura 125. Determinación del peso seco de las muestras de suelo.

## 2.2. Resultados de la prueba para obtener la SWCC (Curva característica suelo-agua).

10.- Se realizan los cálculos del contenido de humedad de las muestras de suelo, con la formula siguiente, y con los resultados de todas las muestras se determina un promedio:

$$S_{mc} = 100 (S_d / S_w)$$

Donde:

$S_{mc}$  = Contenido de humedad de la muestra (%)

$S_d$  = Peso seco de la muestra (gr)

$S_w$  = Peso húmedo de la muestra (gr)



## Anexos

Resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a los depósitos de suelo.

En la determinación de la composición granulométrica se obtuvieron los resultados que se muestran en la **Tabla 24** para los depósitos de suelo con su respectiva clasificación.

Tabla 24. Resultados obtenidos de los porcentajes de suelo retenidos en las mallas a la hora de determinar la composición granulométrica de los suelos analizados.

Apertura de Malla (mm)	Número de malla (N°)	Depósitos		
		Coluvial	Caída	Dacita argílica
		% que pasa la malla		
75	3"	85	100	100
50	2"	77	100	100
37.5	1 1/2"	77	98	100
25	1"	75	95	99
19	3/4"	73	93	99
12.5	1/2"	71	90	99
9.5	3/8"	69	86	97
4.75	No.4	63	78	87
2	10	52	75	69
0.85	20	44	68	53
0.425	40	38	58	40
0.25	60	36	52	34
0.15	100	33	44	27
0.075	200	30	36	21
Cantidad en %		Depósitos		
-----		Coluvial	Caída	Dacita argílica
>De 3"		15	0	0
G		22.00	22	13
S		33.00	42	66
F		30.00	36	21
Suma=		100.00	100	100
Pasa malla N°4		63.00	78	87
Clasif. Límites=		<b>ML</b>	<b>ML</b>	<b>ML</b>
SUCS=		<b>SM-Fc</b>	<b>SM</b>	<b>SM</b>

G= gravas, S=arenas, F=finos, SUCS= Sistema Unificado de Clasificación de suelos, SM= Arena limosa, Fc= fragmentos de roca chicos, ML= Limo de baja compresibilidad.





Las gráficas de la composición granulométricas de los depósitos de suelos se muestran en la **Figura 126**.

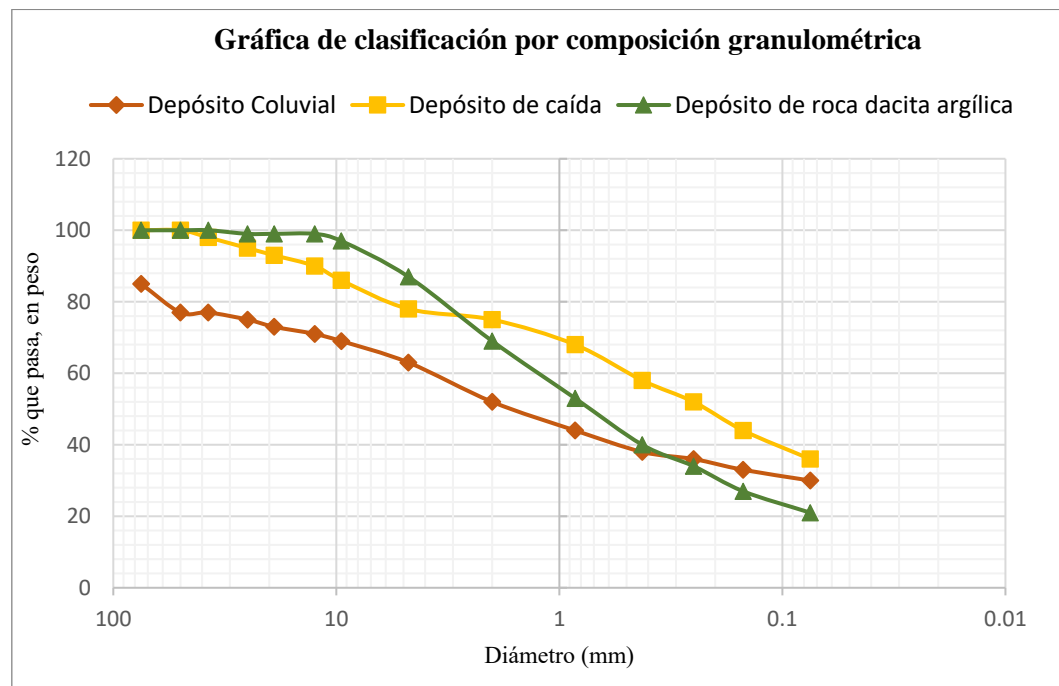


Figura 126. Grafica de la composición granulométrica para los depósitos de suelo.

De las pruebas de límites de consistencia y sus contracciones lineales y volumétricas, se obtuvieron los resultados siguientes (**Tabla 25**):

Tabla 25. Resultados de las pruebas para obtener los límites de consistencia de los suelos así como sus contracciones lineal y volumétrica.

Resultados de la prueba de límites de consistencia y contracción lineal y volumétrica.							
Depósito	Wc (%)	LL (%)	LP (%)	Ip (%)	CL (%)	CV (%)	SUCS
● Coluvial	23.91	34.8	24.22	10.57	5.289	34.67	ML
● Caída	21.65	33.85	25.35	8.495	5.216	19.41	ML
● R. dacita argílica	12.86	38.19	29.80	8.39	4.79	13.72	ML

Wc= Contenido de humedad de campo, LL= Límite líquido, LP= Límite plástico, Ip= Índice plástico, CL=contracción lineal, CV=Contracción volumétrica, SUCS=Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Graficando los resultados en la carta de plasticidad tal como se muestra en la **Figura 127**.

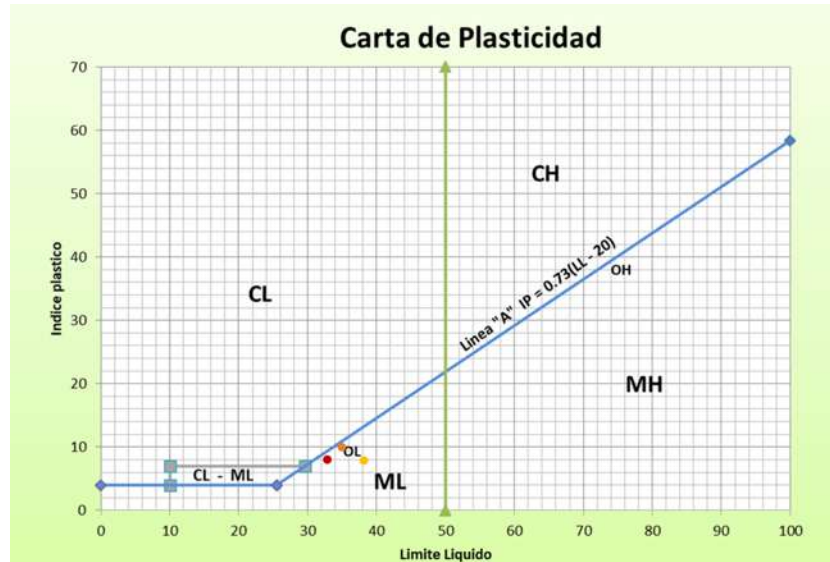


Figura 127. Carta de plasticidad para clasificar los suelos finos que se utilizó en la clasificación de la fracción fina para los depósitos de suelo estudiados.

Los resultados de las pruebas de compresión triaxial (UU) efectuadas a las muestras de suelo, se presentan en la **Tabla 13** del capítulo 7, y las gráficas esfuerzo-deformación obtenidas como resultado de las pruebas se muestran en las **Figuras 128, 129 y 130**.

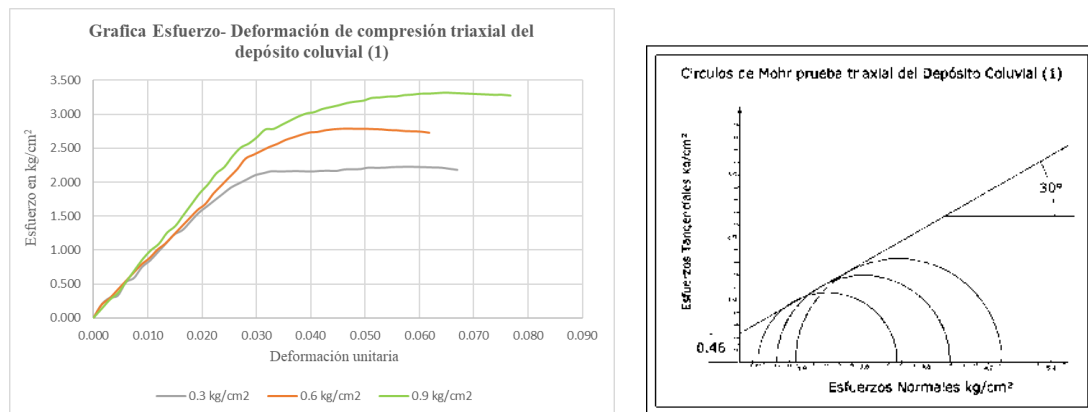


Figura 128. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito coluvial, y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ).

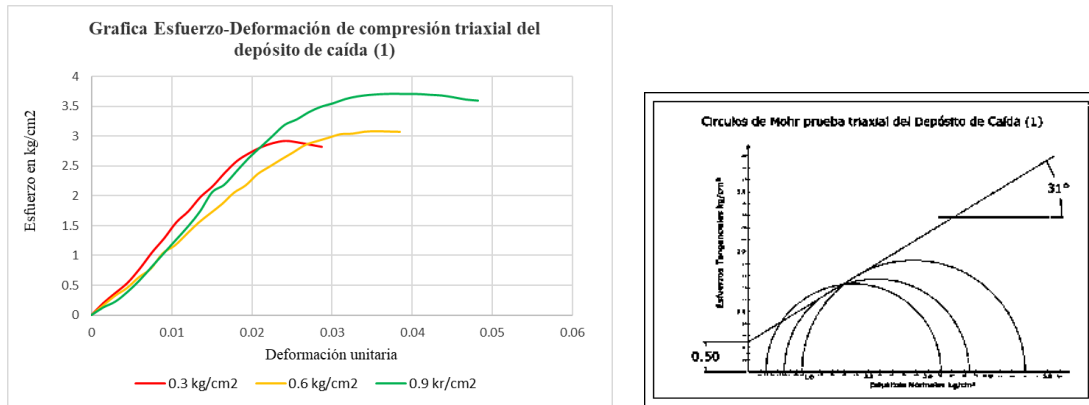


Figura 129. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito de caída, y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ).

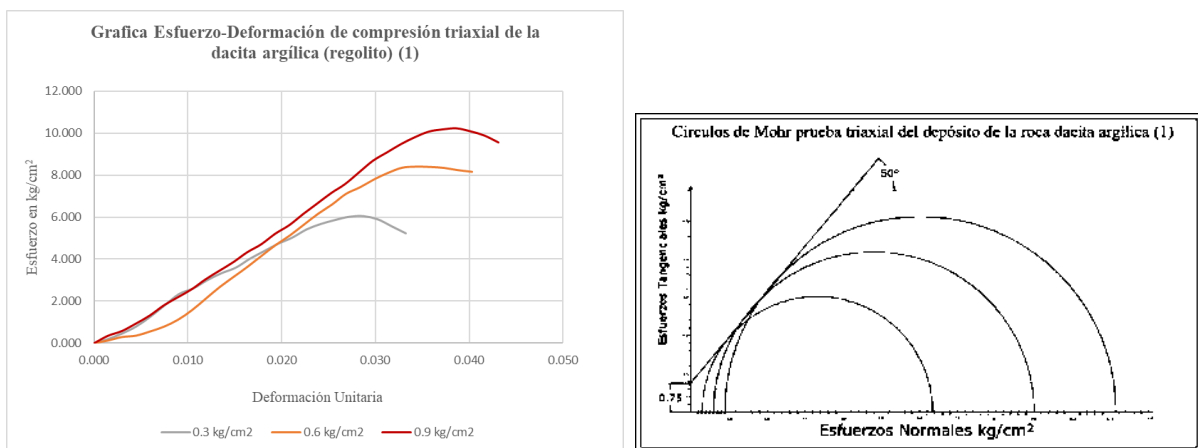


Figura 130. Grafica Esfuerzo-Deformación de los tres especímenes probados del depósito de roca dacita argílica (regolito), y círculos de Mohr obtenidos de la prueba con los que se determinó la Cohesión (C) y ángulo de fricción ( $\phi$ ).

Para la obtención de las SWCC de los depósitos coluvial y de caída, se realizaron varias pruebas con los platos de cerámica disponibles en el laboratorio correspondientes a 1 bar, 3 bar, 5 bar y 15 bar. Los resultados se muestran en el capítulo 7. En esta parte se muestran las tablas de remoldeo y los cálculos realizados para obtener los parámetros de humedad en función del plato cerámico utilizado.

Para la obtención de la SWCC del depósito coluvial se utilizaron los datos y cálculos de las siguientes [Tablas 26 a 29](#):



Tabla 26. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 1 bar en muestras del depósito coluvial.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO COLUVIAL						
REMOLDEO #	2	Material:		Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):
Fecha:	30/07/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	3	1
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.99	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
ω <sub>Campo</sub> (%) =	23.91	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.606					
ω <sub>Actual</sub> (%) =	1.62					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	507.144	Ph (gr)=	100	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	508	Ps (gr)=	98.41	
Peso muestra por anillo (gr) =	42.33	Agua Requerida (ml) =	111.454	ω <sub>Actual</sub> (%)	1.62	
		más 3%	114.80		115	

Curva Característica Suelo-Agua del depósito coluvial									
Fecha remoldeo:	30/07/2020		ugar de prueba: INICYT Ciudad Universitaria						
Fecha inicio de prueba:	04/08/2020		Presión (bar):	1		Operador:	Ing. Pablo García Díaz		
Fecha fin de prueba:	13/08/2020		Presión (psi):	14.5		Calculo:	Ing. Pablo García Díaz		
Número de prueba:	2		Presión (KPa):	100		Agua extraída (ml)=	380		
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en el campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.26	20.95	73	65.31	41.79	34.10	7.69	36.210	22.551
2	10.32	20.90	73.09	65.45	41.87	34.23	7.64	35.975	22.320
3	10.34	21.00	73.3	65.62	41.96	34.28	7.68	36.163	22.404
4	10.33	21.09	73.58	65.82	42.16	34.40	7.76	36.540	22.558
5	10.10	21.13	73.65	65.82	42.42	34.59	7.83	36.869	22.637
6	10.37	20.95	73.45	65.74	42.13	34.42	7.71	36.304	22.400
7	10.25	20.73	73.04	65.26	42.06	34.28	7.78	36.634	22.695
8	10.33	20.83	73.26	65.5	42.10	34.34	7.76	36.540	22.598
9	10.39	20.98	73.06	65.29	41.69	33.92	7.77	36.587	22.907
10	10.30	21.15	73.62	65.80	42.17	34.35	7.82	36.822	22.766
11	10.34	21.05	73.7	65.81	42.31	34.42	7.89	37.152	22.923
12	10.33	21.20	72.86	65.27	41.33	33.74	7.59	35.739	22.496
							PROMEDIO=	36.461	22.604

Tabla 27. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 3 bar en muestras del depósito coluvial.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO COLUVIAL						
REMOLDEO #	1	Material:		Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):
Fecha:	29/07/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	5	3
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.99	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
ω <sub>Campo</sub> (%) =	23.91	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.606					
ω <sub>Actual</sub> (%) =	3.50					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	507.144	Ph (gr)=	100	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	508	Ps (gr)=	96.62	
Peso muestra por anillo (gr) =	42.33	Agua Requerida (ml) =	100.187	ω <sub>Actual</sub> (%)	3.50	
		más 3%	103.19		103	



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO



Curva Característica Suelo-Agua del depósito coluvial									
Fecha remoldeo:	29/07/2020		ugar de prueba:	INICYT Ciudad Universitaria					
Fecha inicio de prueba:	30/07/2020		Presión (bar):	3	Operador:	Ing. Pablo García Díaz			
Fecha fin de prueba:	03/08/2020		Presión (psi):	43.5	Calculo:	Ing. Pablo García Díaz			
Número de prueba:	1		Presión (KPa):	300	Agua extraída (ml)=	482			
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	Θ Volumétrico	Θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.28	21.01	73.31	65.99	42.02	34.70	7.32	34.468	21.095
2	10.31	21.06	73.27	66.06	41.90	34.69	7.21	33.950	20.784
3	10.33	21.12	73.29	66.19	41.84	34.74	7.10	33.432	20.438
4	10.34	20.93	73.63	66.34	42.36	35.07	7.29	34.327	20.787
5	10.28	20.97	73.19	65.95	41.94	34.70	7.24	34.091	20.865
6	10.37	21.15	73.37	66.14	41.85	34.62	7.23	34.044	20.884
7	10.38	20.91	73.39	66.1	42.10	34.81	7.29	34.327	20.942
8	10.31	20.96	73.33	66.07	42.06	34.80	7.26	34.185	20.862
9	10.26	21.19	73.57	66.28	42.12	34.83	7.29	34.327	20.930
10	10.27	21.00	73.36	66.03	42.09	34.76	7.33	34.515	21.087
11	10.39	21.17	73.43	66.23	41.87	34.67	7.20	33.903	20.767
12	10.48	21.06	73.75	66.46	42.21	34.92	7.29	34.327	20.876
PROMEDIO=								34.158	20.860

Tabla 28. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 5 bar en muestras del depósito coluvial.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO COLUVIAL						
REMOLDEO #	3		Material:	Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):
Fecha:	04/08/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	1	5
DATOS DEL MATERIAL:			Cálculos del Remoldeo:			
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.99		Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.			
ω Campo (%) =	23.91		Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]			
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.606					
ω Actual (%) =	2.44					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24		Material Requerido (gr) =	507.144	Ph (gr)=	100
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85		Material Requerido (gr) =	508	Ps (gr)=	97.62
Peso muestra por anillo (gr) =	42.33		Agua Requerida (ml) =	106.482	ω Actual (%)	2.44
			más 3%	109.68	110	

Curva Característica Suelo-Agua del depósito coluvial									
Fecha remoldeo:	04/08/2020		ugar de prueba:	INICYT Ciudad Universitaria					
Fecha inicio de prueba:	07/08/2020		Presión (bar):	5	Operador:	Ing. Pablo García Díaz			
Fecha fin de prueba:	19/08/2020		Presión (psi):	72.5	Calculo:	Ing. Pablo García Díaz			
Número de prueba:	3		Presión (KPa):	500	Agua extraída (ml)=	400			
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	Θ Volumétrico	Θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.83	20.95	73.17	66.3	41.39	34.52	6.87	32.349	19.902
2	10.89	20.90	73.25	66.37	41.46	34.58	6.88	32.396	19.896
3	10.76	21.00	73.09	66.22	41.33	34.46	6.87	32.349	19.936
4	10.77	21.09	73.3	66.36	41.44	34.50	6.94	32.679	20.116
5	10.88	21.14	73.66	66.77	41.64	34.75	6.89	32.443	19.827
6	10.86	20.96	73.32	66.45	41.50	34.63	6.87	32.349	19.838
7	10.78	20.74	72.98	66.08	41.46	34.56	6.90	32.490	19.965
8	10.87	20.83	73.27	66.35	41.57	34.65	6.92	32.584	19.971
9	10.69	20.98	73.18	66.32	41.51	34.65	6.86	32.302	19.798
10	10.85	21.16	73.43	66.51	41.42	34.50	6.92	32.584	20.058
11	10.79	21.05	73.48	66.55	41.64	34.71	6.93	32.631	19.965
12	10.76	21.20	73.58	66.71	41.62	34.75	6.87	32.349	19.770
PROMEDIO=								32.459	19.920



Tabla 29. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 15 bar en muestras del depósito coluvial.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO COLUVIAL					
REMOLDEO #	4	Material:	Depósito Coluvial	Presión de aire (bar):	
Fecha:	19/08/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	6
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:			
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )	1.99	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.			
ω Campo (%) =	23.91	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]			
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.606				
ω Actual (%) =	2.44				
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	507.144	Ph (gr)=	100
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	508	Ps (gr)=	97.62
Peso muestra por anillo (gr) =	42.33	Agua Requerida (ml) =	106.482	ω Actual (%)	2.44
		más 3%	109.68		110

Curva Característica Suelo-Agua del depósito coluvial									
Fecha remoldeo:	19/08/2020		ugar de prueba:	INICYT Ciudad Universitaria					
Fecha inicio de prueba:	21/08/2020		Presión (bar):	15	Operador:	Ing. Pablo García Díaz			
Fecha fin de prueba:	09/09/2020		Presión (psi):	217.5	Calculo:	Ing. Pablo García Díaz			
Número de prueba:	4		Presión (KPa):	1500	Agua extraída (ml)=	123			
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.35	20.95	72.12	65.88	40.82	34.58	6.24	29.382	18.045
2	10.41	20.89	72.13	65.92	40.83	34.62	6.21	29.241	17.938
3	10.36	21.00	72.1	65.98	40.74	34.62	6.12	28.817	17.678
4	10.31	21.08	72.21	65.95	40.82	34.56	6.26	29.477	18.113
5	10.31	21.13	72.33	66.07	40.89	34.63	6.26	29.477	18.077
6	10.34	20.95	72.21	65.9	40.92	34.61	6.31	29.712	18.232
7	10.30	20.73	72.03	65.84	41.00	34.81	6.19	29.147	17.782
8	10.25	20.83	72.04	65.74	40.96	34.66	6.30	29.665	18.177
9	10.23	20.98	72.12	65.87	40.91	34.66	6.25	29.430	18.032
10	10.25	21.15	72.38	66.11	40.98	34.71	6.27	29.524	18.064
11	10.35	21.05	72.52	66.26	41.12	34.86	6.26	29.477	17.958
12	10.30	21.19	72.8	66.29	41.31	34.80	6.51	30.654	18.707
PROMEDIO=								29.500	18.067

P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )=Peso volumétrico húmedo de campo	Ww = Peso húmedo del suelo (g)	Ws (gr) : peso seco
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> )=Peso volumétrico seco de campo	Wd = Peso seco del suelo (g)	Ww (gr): peso húmedo
ω Campo (%) = Contenido de humedad de campo	Wp=Peso papel filtro (gr)	ω (%): Contenido de Humedad
ω Actual (%) = Contenido de humedad actual	Wr= Peso del anillo (gr)	
ω (%) = contenido de humedad del suelo (gr/cm3)	Wc=Peso capsula de secado (gr)	
Db = densidad aparente objetivo del suelo (gr/cm3)	Wa= Peso del agua	
	Vr = Volumen del anillo (cm3)	

Para la obtención de la SWCC del depósito de caída se utilizaron los datos y cálculos de las siguientes **Tablas 30 a 33**:



Tabla 30. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 1 bar en muestras del depósito de caída.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO CAÍDA						
REMOLDEO #	6	Material:	Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):	
Fecha:	22/07/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	2	1
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.838					
ω Campo (%) =	21.65	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.511	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
ω Actual (%) =	2.80					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	468.407	Ph (gr)=	100	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	469	Ps (gr)=	97.28	
Peso muestra por anillo (gr) =	39.08	Agua Requerida (ml) =	86.020	ω Actual (%) =	2.80	
		más 3%	88.60	89		

Curva Característica Suelo-Agua del depósito de caída									
Fecha remoldeo:	22/07/2020	Lugar de prueba:	INICYT Ciudad Universitaria						
Fecha inicio de prueba:	24/07/2020	Presión (bar):	1	Operador:	Ing. Pablo García Díaz				
Fecha fin de prueba:	30/07/2020	Presión (psi):	14.5	Calculo:	Ing. Pablo García Díaz				
Número de prueba:	6	Presión (KPa):	100	Agua extraída (ml)=	440				
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la paste de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe, que se trata de una roca dacita alterada argílica.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.36	20.94	71.84	64.12	40.54	32.82	7.72	36.351	23.522
2	10.07	20.89	71.5	63.79	40.54	32.83	7.71	36.304	23.485
3	10.32	20.99	71.86	64.13	40.55	32.82	7.73	36.398	23.553
4	10.25	21.08	71.85	64.17	40.52	32.84	7.68	36.163	23.386
5	10.09	21.13	71.91	64.08	40.69	32.86	7.83	36.869	23.828
6	10.26	20.95	71.83	63.97	40.62	32.76	7.86	37.011	23.993
7	10.38	20.72	71.5	63.84	40.40	32.74	7.66	36.069	23.396
8	10.42	20.83	71.72	64.01	40.47	32.76	7.71	36.304	23.535
9	10.26	20.97	71.69	63.96	40.46	32.73	7.73	36.398	23.617
10	10.29	21.15	71.95	64.28	40.51	32.84	7.67	36.116	23.356
11	10.18	21.05	71.62	63.9	40.39	32.67	7.72	36.351	23.630
12	10.32	21.18	71.91	64.24	40.41	32.74	7.67	36.116	23.427
PROMEDIO=								36.371	23.561

Tabla 31. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 3 bar en muestras del depósito de caída.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO CAÍDA						
REMOLDEO #	1	Material:	Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):	
Fecha:	29/07/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	6	3
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.838					
ω Campo (%) =	21.65	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.511	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
ω Actual (%) =	2.04					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	468.407	Ph (gr)=	100	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	469	Ps (gr)=	98	
Peso muestra por anillo (gr) =	39.08	Agua Requerida (ml) =	90.128	ω Actual (%) =	2.04	
		más 3%	92.83	93		



Curva Característica Suelo-Agua del depósito de caída									
Fecha remoldeo:	29/07/2020		Lugar de prueba:		INICYT Ciudad Universitaria				
Fecha inicio de prueba:	30/07/2020		Presión (bar):		3	Operador:		Ing. Pablo García Díaz	
Fecha fin de prueba:	03/08/2020		Presión (psi):		43.5	Calculo:		Ing. Pablo García Díaz	
Número de prueba:	1		Presión (KPa):		300	Agua extraída (ml)=		482	
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe, que se trata de una roca dacita alterada argílica.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.35	20.96	70.48	63.3	39.17	31.99	7.18	33.809	22.445
2	10.41	20.90	70.78	63.31	39.47	32.00	7.47	35.174	23.344
3	10.36	20.99	70.8	63.41	39.45	32.06	7.39	34.797	23.051
4	10.31	21.09	70.74	63.34	39.34	31.94	7.40	34.845	23.168
5	10.31	21.13	70.87	63.52	39.43	32.08	7.35	34.609	22.911
6	10.34	20.95	71.13	63.37	39.84	32.08	7.76	36.540	24.190
7	10.29	20.73	70.41	63.01	39.39	31.99	7.40	34.845	23.132
8	10.24	20.82	70.32	63.12	39.26	32.06	7.20	33.903	22.458
9	10.21	20.97	70.59	63.22	39.41	32.04	7.37	34.703	23.002
10	10.24	21.16	70.76	63.36	39.36	31.96	7.40	34.845	23.154
11	10.33	21.05	70.83	63.4	39.45	32.02	7.43	34.986	23.204
12	10.28	21.19	70.86	63.61	39.39	32.14	7.25	34.138	22.558
PROMEDIO=								34.766	23.051

Tabla 32. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 5 bar en muestras del depósito de caída.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO CAÍDA					
REMOLDEO #	2		Material:	Depósito Coluvial	
Fecha:	16/07/2020		Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	
			Juego anillos:	8	
			Presión de aire (bar):	5	
DATOS DEL MATERIAL:			Cálculos del Remoldeo:		
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.838				
ω Campo (%) =	21.65		Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.		
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.511		Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. -W% Actual)/(100 + W% Actual)]		
ω Actual (%) =	3.26				
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24		Material Requerido (gr) =	468.407	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85		Material Requerido (gr) =	469	
Peso muestra por anillo (gr) =	39.08		Agua Requerida (ml) =	83.509	
			más 3%	86.01	
				86	
				Ph (gr)=	100
				Ps (gr)=	96.84
				ω Actual (%) =	3.26

Curva Característica Suelo-Agua del depósito de caída									
Fecha remoldeo:	16/07/2020		Lugar de prueba:		INICYT Ciudad Universitaria				
Fecha inicio de prueba:	18/07/2020		Presión (bar):		5	Operador:		Ing. Pablo García Díaz	
Fecha fin de prueba:	20/07/2020		Presión (psi):		72.5	Calculo:		Ing. Pablo García Díaz	
Número de prueba:	2		Presión (KPa):		500	Agua extraída (ml)=		670	
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la parte de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe, que se trata de una roca dacita alterada argílica.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.35	20.96	70.85	63.72	39.54	32.41	7.13	33.573	21.999
2	10.32	21.05	71.27	63.92	39.90	32.55	7.35	34.609	22.581
3	10.15	21.00	70.64	63.78	39.49	32.63	6.86	32.302	21.024
4	10.34	20.92	71.28	63.85	40.02	32.59	7.43	34.986	22.798
5	10.36	21.13	71.52	64.07	40.03	32.58	7.45	35.080	22.867
6	10.30	20.97	71.17	63.88	39.90	32.61	7.29	34.327	22.355
7	10.36	20.74	71.05	63.76	39.95	32.66	7.29	34.327	22.321
8	10.23	20.83	70.9	63.65	39.84	32.59	7.25	34.138	22.246
9	10.37	20.98	71.16	63.95	39.81	32.60	7.21	33.950	22.117
10	10.24	21.15	71.38	64.07	39.99	32.68	7.31	34.421	22.368
11	10.36	21.05	71.68	63.99	40.27	32.58	7.69	36.210	23.603
12	10.34	21.19	71.63	64.11	40.10	32.58	7.52	35.410	23.082
PROMEDIO=								34.444	22.447





Tabla 33. Datos de remoldeo y cálculos para la prueba realizada con una presión de 15 bar en muestras del depósito de caída.

REMOLDEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO DEPÓSITO CAÍDA						
REMOLDEO #	4	Material:	Depósito Coluvial		Presión de aire (bar):	
Fecha:	13/08/2020	Realizo:	Ing. Pablo García Díaz	Juego anillos:	8	15
DATOS DEL MATERIAL:		Cálculos del Remoldeo:				
P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.838	Material Requerido= P.V.S.C. * [1+(W%/100)] * Vol. Molde.				
ω Campo (%) =	21.65	Agua Requerida = Mat. Req. * [(W% Cam. - W% Actual)/(100 + W% Actual)]				
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> ) =	1.511					
ω Actual (%) =	2.08					
1 Vr (cm <sup>3</sup> ) =	21.24	Material Requerido (gr) =	468.407	Ph (gr)=	100	
Volumen para 12 anillos (cm <sup>3</sup> ) =	254.85	Material Requerido (gr) =	469	Ps (gr)=	97.96	
Peso muestra por anillo (gr) =	39.08	Agua Requerida (ml) =	89.900	ω Actual (%) =	2.08	
		más 3%	92.60	93		

Curva Característica Suelo-Agua del depósito de caída									
Fecha remoldeo:	13/08/2020		Lugar de prueba: INICYT Ciudad Universitaria						
Fecha inicio de prueba:	21/08/2020		Presión (bar):	15	Operador:	Ing. Pablo García Díaz			
Fecha fin de prueba:	09/09/2020		Presión (psi):	217.5	Calculo:	Ing. Pablo García Díaz			
Número de prueba:	4		Presión (KPa):	1500	Agua extraída (ml)=	123			
Observaciones: Las muestras de suelo se tomaron en campo en la paste de la corona de desprendimiento de proceso de remoción en masa cerro Guadalupe, que se trata de una roca dacita alterada argílica.									
N.º Muestra	Wr	Wc	Ww+Wr+Wc	Wd+Wr+Wc	Ww	Wd	Wa	θ Volumétrico	θ Gravimétrico
-----	gr	gr	gr	gr	gr	gr	gr	%	%
1	10.34	20.01	69.09	63.37	38.74	33.02	5.72	26.934	17.323
2	10.32	21.06	69.08	63.35	37.70	31.97	5.73	26.981	17.923
3	10.14	21.12	69.13	63.42	37.87	32.16	5.71	26.887	17.755
4	10.33	20.91	69.13	63.41	37.89	32.17	5.72	26.934	17.781
5	10.35	20.95	68.95	63.36	37.65	32.06	5.59	26.322	17.436
6	10.30	21.15	69.4	63.64	37.95	32.19	5.76	27.122	17.894
7	10.37	20.90	69.03	63.28	37.76	32.01	5.75	27.075	17.963
8	10.22	20.95	69.04	63.39	37.87	32.22	5.65	26.604	17.536
9	10.36	21.19	69.28	63.61	37.73	32.06	5.67	26.698	17.686
10	10.23	20.99	69.02	63.31	37.80	32.09	5.71	26.887	17.794
11	10.35	21.17	69.33	63.65	37.81	32.13	5.68	26.746	17.678
12	10.32	21.05	69.26	63.55	37.89	32.18	5.71	26.887	17.744
PROMEDIO=								26.840	17.709

P.V.H.C. (gr/cm <sup>3</sup> )=Peso volumétrico húmedo de campo	Ww = Peso húmedo del suelo (g)	Ws (gr) : peso seco
P.V.S.C. (gr/cm <sup>3</sup> )=Peso volumétrico seco de campo	Wd = Peso seco del suelo (g)	Ww (gr): peso húmedo
ω Campo (%) = Contenido de humedad de campo	Wp=Peso papel filtro (gr)	ω (%): Contenido de Humedad
ω Actual (%) = Contenido de humedad actual	Wr= Peso del anillo (gr)	
ω (%) = contenido de humedad del suelo (gr/cm3)	Wc=Peso capsula de secado (gr)	
Db = densidad aparente objetivo del suelo (gr/cm3)	Wa= Peso del agua	
	Vr = Volumen del anillo (cm3)	