

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICÓLAS DE HIDALGO

---

---



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
EN CIENCIAS DE LA TIERRA

DETERMINACIÓN DEL UMBRAL DE  
PRECIPITACIÓN EN EL DESLIZAMIENTO  
LA PINTADA, GUERRERO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN CIENCIAS**, con  
Especialidad en  
Geociencias y Planificación del Territorio

**P R E S E N T A :**  
**ALEJANDRO GARCÍA CASILLAS**

**ASESOR:** Dr. VICTOR MANUEL HERNANDEZ MADRIGAL

MORELIA MICHOACAN. AGOSTO 2016



## !!! Gracias Gran Maestro. (Dios):. Δ!!!

### **A mi Padre (†) y mi Madre,**

Por darme la vida, la dedicación de mis primeros años, hacerme una persona,  
con buenos principios, enseñarme la rectitud y llevarme de la mano cuando lo necesite  
Y por su apoyo incondicional...  
Y aun hoy sigo recibiendo sus consejos críticos gracias...!!!

### **A mi pedazo de vida Ψ.**

Por ser lo más hermoso que he conocido  
Ser el pilar imbatible de nuestro castillo y  
largas horas de charlas y consejos, por cuidar siempre de mí.  
Y sobre todo cuando más lo necesite,  
por embarcarnos en este nuevo viaje juntos y  
que llegaremos como siempre a buen puerto  
Gracias por ser la compañera de mi vida.  
Gracias por darme dos hermosos hijos  
Gracias por toda tu comprensión, apoyo y amor perenne  
Gracias Minitoys.

### **A mis queridos hijos: María Fernanda Ω y Alejandro Ω. ☺**

Por ser los impulsores de nuestro barco, viajando siempre contra corriente y en mares  
embravecidos, y las largas ausencias y ser los marineros dóciles, entendidos y  
disciplinados que todo buen capitán necesita, por todos los ratos de alegrías y siempre  
impulsándome a terminar mi trabajo, por su apoyo y esperando ser un ejemplo de vida para  
ustedes, no con mis errores, que me superen; siendo ustedes el motivo de mi vida y siempre  
me tendrán a su lado.

¡Gracias por nuestra historia. Juntos.....son mi todo!

!!! Los amo...!!!

### **A mis hermanas AIDA GUADALUPE Y DIANA DE LA LUZ, POR TODO CUANDO LO HE NECESITADO.**

**A mis tías (SOL Y ALICIA) y sobre todo a ti tía SUSANA, que me has enseñado a no  
doblarme ante nada.**

**GRACIAS A TODOS POR SU APOYO INCONDICIONAL...**

## AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por guiarme y acompañarme en esta travesía, siempre con las mejores palabras de ánimo y tus palabras fuertes de incertidumbre en los tiempos malos o de flaqueza y por esas palabras de aliento cuando las necesite y sobre todo por ser un gran maestro para mí y por tu amistad. Muchas Gracias.

Al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy co-asesor. Por sus grandes consejos y sus grandes sugerencias. Por ser la persona que confió en mí y me alentó para poder lograr este viaje tan esplendido y lleno de buenos recuerdos y sobre todo de enseñanza, si no lo hubiera encontrado aquel día de noviembre del 2013. No estaría hoy aquí, muchas gracias.

A mis sinodales: Dr. Jesús A. Muñiz Jáuregui, al Dr. Ricardo Vázquez Rosas, al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera y al Dr. Antonio Pola Villaseñor; agradecido estoy por su apoyo y enseñanzas

A mis maestros (todos por temor a que me falte uno) por todo su tiempo y dedicación sin sus enseñanzas no se realizaría este trabajo.

A la **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO (U.M.S.N.H.)** por ser mi aula mater y cuna de mi saber, sobre todo por su apoyo económico y de trabajo, espero con ahínco reponer en todo mi alcance lo que me has dado.

A LA PREPARATORIA "**MELCHOR OCAMPO**" DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO quien fue la que me apoyo para realizar este viaje y sobre todo a la Maestra Tania Álvarez por su apoyo incondicional, así como a la Directora la Maestra Irma Lozano y a mis compañeros de trabajo por sus palabras de aliento y Sinceridad.

Gracias al Instituto de Investigaciones Metalúrgicas por abrirme sus puertas y apoyarme

Al instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT) del cual egreso hoy siendo la primera generación como tal.

A mis compañeros de generación: Nancy Alanís, Gabriel Nieto, José Refugio Valdivias, Mariela Casillas, José Antonio Hurtado Núñez y Jorge Alejandro Guevara (Wily). Por toda su ayuda, y a todos mis compañeros de maestría.

Mil gracias a todos los que han pasado por mi vida, que con sus palabras de ánimo y consejos llenan la vida de este humilde servidor.

A **CONACyT**, por el apoyo económico para la elaboración del presente trabajo.

**¡La presión del trabajo y el calor humano van moldeando al carbón de la vida,  
convirtiéndolo en diamante en bruto, y luchando día a día, se pule y se le da forma,  
ESO lo hace valer!**

**Gracias a todos...por este viaje espléndido. !!!!!!! Agcasillas.**

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)

## ÍNDICE

DEDICATORIAS.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos particulares.....	15
1.3 Hipótesis general.....	15
1.4 Justificación.....	16
1.5 Desarrollo capitular.....	16
Capítulo 2. MARCO TEORICO.....	17
2.1 Clasificación.....	17
2.2 Factores.....	24
2.3 Umbrales de precipitación.....	26
2.4 Infiltración.....	27
2.5 Modelación numérica ( <i>SEEP/W</i> ).....	28
2.5 a) Función de contenido volumétrico de agua.....	28
2.5 b) Factores que influyen en la función.....	31
2.6 Modelación numérica ( <i>slope/w</i> ).....	32
2.7 Método de equilibrio límite general (GLE).....	33
2.8 Método de Morgenstern y Price (M-P).....	35
2.9 Forma en que se liga <i>slope/w</i> con <i>seep/w</i> .....	37

Capítulo 3. ANTECEDENTES.....	39
3.1 Lluvia como detonante y umbrales de precipitación.....	39
3.2 Umbrales de precipitación.....	40
3.2.a) Los umbrales empíricos .....	41
3.2.b) Los umbrales físicos .....	42
3.3. Reseña de hechos del sitio de estudio.....	44
Capítulo 4. ÁREA DE ESTUDIO.....	47
4.1 Ubicación.....	47
4.2 Clima.....	48
4.3 Edafología.....	49
4.4 Hidrología.....	49
4.5 Geología.....	49
4.6 Provincia fisiográfica y geomorfología local.....	51
Capítulo 5. METODOLOGÍA.....	54
5.1 Trabajo de gabinete.....	54
5.2 Trabajo de campo.....	54
5.3 Trabajo de laboratorio.....	56
5.3.1 Pruebas físicas.....	56
5.3.2 Pruebas mecánicas.....	57
5.4 Geotecnia saturada, caracterización de los materiales físicos y mecánicas.....	57
5.5 Insumos del programa Geoslope v 2007s.....	57
5.6 Geotecnia insaturada.....	58
5.7 Diseño del modelo e ingreso de datos.....	58
Capítulo 6. RESULTADOS.....	62

Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....119

Capítulo 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....122

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....126

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura. 1 Mecanismo de desprendimiento y colapso.....	18
Figura. 2 Mecanismo de vuelco .....	19
Figura. 3 Mecanismo de deslizamiento. ....	20
Figura. 4 Movimiento simple.....	21
Figura. 5 Movimiento múltiple.....	21
Figura. 6 Movimiento sucesivo.....	22
Figura. 7 Movimiento de flujo.....	23
Figura. 8 Registro de precipitación diaria para el periodo del 1 de agosto al 16 de septiembre del 2013.....	26
Figura. 9 Proceso de infiltración de suelo.....	28
Figura. 10 Función típica del contenido volumétrico de agua.....	29
Figura. 11 Funciones típicas de 3 tipos de suelo.....	32
Figura. 12 Esfuerzos en la dovela involucrados.....	33
Figura. 13 Funciones típicas entre dovelas.....	36
Figura. 14 Función fuerza media sinodal entre dovelas.....	37
Figura. 15 Trayectoria y arribo de los huracanes en el Pacífico desde 1947 al 2000. ....	44
Figura. 16 Foto satelital de Comisión Nacional del Agua del día 14 de septiembre del 2013. ....	45
Figura. 17 Precipitaciones anuales más importantes en México. ....	46
Figura. 18 Petroglifos en la localidad de La Pintada Gro.....	47
Figura. 18.1 Localización del deslizamiento de La Pintada Gro.....	48
Figura. 19 Geología local. ....	50
Figura. 20. Depósito de paleoderrumbes.....	51
Figura. 21 Suelos que componen el macizo deslizado, .....	51
Figura 22 Esquema de las principales provincias fisiográficas de México; 1. Planicie Costera de Baja California, 2. Sistema montañoso de Baja California, 3. Planicie Costera Noroccidental, 4. Sierra Madre Occidental, 5. Altiplano Mexicano, 6. Sierra Madre Oriental, 7. Eje Volcánico Transversal, 8. Planicie Costera Nororiental, 9. Depresión del	



Balsas, 10. Sierra Madre del Sur, 11. Sistema montañoso del norte de Oaxaca, 12. Planicie Costera Suroriental, 13. Macizo Central de Chiapas, 14. Depresión Central de Chiapas, 15. Sierra Madre de Chiapas. ....	52
Figura. 23 Fallas cercanas a la comunidad de la Pintada. ....	53
Figura. 24 Carta de plasticidad de Arturo Casagrande.....	56
Figura. 25 Metodología de la obtención del umbral de precipitación de La pintada Guerrero, México.....	61
Figura. 26 Perfil litológico del deslizamiento la pintada .....	62
Figura. 27 Ubicación de los puntos de muestreo.....	64
Figura. 28 Estratigrafía delos puntos muestreados del deslizamiento la Pintada Guerrero, México.....	65
Figuras. 29, 30 y 31 Gráficas que se utilizaron en el modelo computacional de contenido volumétrico de agua vs. Succión mátrica (estimaciones por el método de Fredlund y Xing., 1994).....	67
Figura. 32 Modelo computacional en el programa <i>Geoslope</i> .....	68
Figura. 33 Modelo computacional del flujo de agua en <i>Geoslope seep/w</i> .....	68
Figura. 34 Lámina de lluvia estimada diaria a nivel nacional. ....	70
Figura. 35 Modelo computacional en el programa <i>Geoslope Seep/W</i> (estacionario).....	71
Figura. 36 Modelo computacional en el programa <i>Geoslope Slope/W</i> .....	72
Figura. 37 Programa <i>Geoslope Seep/W</i> (estacionario).....	73
Figura. 38 Programa <i>Geoslope Slope/W</i> (estacionario).....	74
Figura. 39 Distribución de lluvia en los días de análisis para el programa <i>Geoslope Seep/W</i> (Transitorio).....	75
Figura. 40. Resultado para 86400 s. 1 día. ....	77
Figura. 41. Resultado para 1123200 s. 13 días.....	78
Figura 42 Resultado para 2160000 s. 25 días.....	79
Figura 43. Resultado para 3196800 s. 37 días.....	80
Figura 44. Resultado para 4060800 s. 47 días.....	81
Figura 45. Resultado para 86400 s. 1 día.....	83

Figura 46. Resultado para 1123200 s. 13 días.....	84
Figura 47. Resultado para 2160000 s. 25 días.....	85
Figura 48. Resultado para 3196800 s. 37 días.....	86
Figura 49. Resultado para 4060800 s. 47 días.....	87
Figura 50 Gráfica de evolución del factor de seguridad en el tiempo de la Pintada Guerrero, México.....	89
Figura 51. Resultado para 86400 s. 1 día.....	91
Figura 52. Resultado para 1123200 s. 13 días.....	92
Figura 53. Resultado para 2160000 s. 25 días.....	93
Figura 54. Resultado para 3024000 s. 35 días.....	94
Figura 55. Resultado para 3196800 s. 37 días.....	95
Figura 56. Resultado para 4060800 s. 47 días.....	96
Figura 57. Resultado F.S. vs. P.W.P.....	97
Figura 58. Resultado F.S. vs. FNB.....	100
Figura 59. Resultado F.S. vs. C.N.B.....	102
Figura 60. Resultado F.S. vs. F.N.L.D.....	103
Figura 61. Resultado F.S. vs. F.C.L.D.....	105
Figura. 62 Gráfica de resultados de límites del factor de seguridad y los umbrales de precipitación.....	107
Figura 63 Umbrales de precipitación de la Pintada Guerrero, México.....	109
Figura 64 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 32 días.....	111
Figura 65 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 39 días.....	112
Figura 66 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 47 días.....	113
Figura. 67 Gráfica de correlación de factor de seguridad-límites de estabilidad –humedad natural vs contenido volumétrico de agua para una (SM).....	118
Figura. 68 Superposición factor de seguridad fuerza cortante lado derecho.....	120
Figura. 69 DIAGRAMA ESFUERZO FS=1.337.....	120
Figura. 70 DIAGRAMA ESFUERZO FS=0.996.....	120

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Clasificación de Varnes (1978).....	18
Tabla 2 Factores detonantes.....	25
Tabla 3 Factores condicionantes.....	25
Tabla 4 umbrales de precipitación para desencadenamiento de movimientos de ladera.	43
Tabla 5 Resumen de Pruebas Físicas del deslizamiento la pintada.....	65
Tabla 6 Propiedades mecánicas de las litologías involucradas en el deslizamiento La Pintada Guerrero, México.....	66
Tabla 7 Propiedades hidráulicas de las mismas unidades litológicas.....	66
Tabla 8 Límites de estabilidad de una ladera en función de su humedad natural para una arena limosa (SM).....	99
Tabla 9 Espesores del material a diferentes límites.....	115
Tabla 10 Obtención de peso por factores de estabilidad.....	116
Tabla 11 Valores de frontera del deslizamiento. ....	116
Tabla 12 Tipo de movimiento en función de su Índice de liquidez.....	119

## RESUMEN

La lluvia a nivel mundial se conoce como uno de los principales detonantes de los procesos de remoción de masas y algunas veces afectan zonas urbanas. Muchas publicaciones recientes han puesto énfasis en el estudio de los umbrales de precipitación en el mundo y tratando de predecir la falla de las laderas. Por lo que grandes esfuerzos para determinar los umbrales de precipitación han sido manifiestos, pero su cuantificación es difícil, debido a que sus determinaciones son con datos históricos.

Parte que el umbral se relaciona directamente con un evento y cuando se cuenta con los datos oportunos parecería fácil determinarlos, pero en La Población de la Pintada Guerrero, se dieron las condiciones para poder realizar este estudio de umbrales en donde se involucran las características físico-mecánicas y logrando determinar una variante de los umbrales físicos, con el apoyo del software Geoslope inc. Además de lograr la determinación del umbral máximo 191.4 mm y mínimo 139.6 mm acumulados de acuerdo a las definiciones establecidas.

Así mismo se determinaron los límites del factor de seguridad para prevención de desastres y se da la justificación de ellos, una propuesta para determinar los límites de estabilidad de un talud por medio de correlaciones en función del volumen de agua y la humedad natural, se propone una forma fácil de correlacionarlos.

Palabras clave: estabilidad de taludes, infiltración de taludes, límites de estabilidad, y límites de factor de seguridad.

## ABSTRACT

Rain worldwide is known as one of the main triggers of mass removal processes and sometimes affects urban areas. Many recent publications have emphasized the study of thresholds of precipitation in the world and trying to predict the failure of the slopes. Making great efforts to determine rainfall thresholds have been obvious, but its quantification is difficult because their determinations are historical data.

Part that the threshold is directly related to an event and when it has the appropriate data seem easy to determine them, but in the town of La Pintada Guerrero, conditions to perform this study thresholds where given the physic characteristics are involved achieving mechanical and determine a variation of the physical thresholds, with the support of Geoslope software Inc. In addition to achieving the maximum threshold determination 191.4 mm and 139.6 mm minimum accumulated according to established definitions.

Likewise the limits of the safety factor for disaster prevention is determined and justification of them, a proposal is given to determine the limits of stability of a slope through correlations based on the volume of water and natural moisture, it is proposed an easy way to correlate.

Keywords: slope stability, seepage slope, stability limits, and safety factor limits.

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En México cada temporada de lluvias entre los meses de junio y octubre se presentan con frecuencia procesos de remoción de masa, algunos con afectaciones naturales, otros con afectación material y humana como el que aconteció el 16 de septiembre del 2013 en la población de La Pintada Guerrero, México.

La naturaleza marca a dos protagonistas desencadenantes, los sismos y la lluvia como parte fundamental de un proceso de remoción de masa, que frecuentemente desencadena tragedias, pero sin duda, la lluvia es el factor desencadenante de deslizamientos más frecuente. Contribuye al aumento de las presiones de agua en el suelo (Campbell, 1975), modificando las propiedades físicas y mecánicas del suelo superficial y cambiando su estabilidad. Las propiedades hidráulicas del suelo, el contenido previo de agua y la historia de lluvias son factores que condicionan la ruptura (Wieczorek, 1996).

Así por tanto, es posible llevar a cabo un acercamiento al aspecto temporal mediante análisis de series temporales de datos climáticos y de inestabilidades, que permitan establecer umbrales para su desencadenamiento (Corominas, 2000; Crosta y Frattini, 2003).

Una medida de cuantificar la lluvia es por medio de un UMBRAL que sirve de parámetro de referencia para determinar el nivel que se necesita para que un proceso de inestabilidad tenga lugar o un estado físico de los suelos y rocas cambie (White *et al.*, 1996), así mismo el umbral desencadenante se puede definir por la cantidad de lluvia, humedad del suelo o las condiciones hidrológicas necesarias para generar la ruptura de la ladera (Guzzetti *et al.*, 2008).

Para establecer umbrales de precipitación relacionado con deslizamientos se utilizan por lo general dos tipos de parámetros:

- (a) Análisis de estabilidad de laderas con modelos físicos-hidrológicos donde se calcula el factor de seguridad tomando en cuenta las propiedades del suelo y la cantidad de lluvia infiltrada (Iverson, 2000).

(b) Relaciones empíricas basadas en el estudio de eventos de lluvias que han provocado deslizamientos en el pasado (Guzzetti *et al.*, 2008).

La mayoría de trabajos relacionados con umbrales establecen datos históricos como base del estudio, lamentablemente no siempre se tienen al alcance dichos datos, por otro lado; y como parte de las zonas afectadas por deslizamientos esta cuenta con una semejanza en el tipo de los suelos. Por ello en este trabajo propone un método que sirva de herramienta para poder identificar ocurrencias y prevenir desastres.

### 1.1 Objetivo general

Lograr establecer el umbral de precipitación mínimo acumulado que determine el punto donde éste factor desencadena la inestabilidad de la masa, para ello se propone un modelo que se ajuste a los datos obtenidos y a la metodología.

### 1.2 Objetivos particulares

Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo con diferentes condiciones de humedad, para determinar el ángulo de fricción interna y su cohesión crítica; proponer la curva característica teórica del suelo (succión & grado de saturación) según la teoría de (Fredlund y Xing, 1994), esta como insumo para la utilización del *software* GEOSLOPE®; implementación del programa SEEP / W de GEOSLOPE® para el análisis de las infiltraciones considerando varios valores de lluvia; implementar el programa SLOPE / w de GEOSLOPE® para valorar el factor de seguridad en estabilidad de taludes.

### 1.3 Hipótesis

Las lluvias que se registraron del 13 al 16 de septiembre de 2013; detonaron el deslizamiento de La Pintada Guerrero, modificando las condiciones físico-mecánicas del suelo conduciendo a un proceso de saturación inminente y a una disminución del esfuerzo cortante del material, con lo que se dieron las condiciones necesarias para que el factor de seguridad del talud disminuyera y fuera menor a uno.

#### 1.4 Justificación

Al determinar el umbral de precipitación como un elemento estratégico de importancia en la estabilidad de laderas, se puede precisar cuándo una ladera se desestabiliza y sus propiedades físico-mecánicas cambian, generando un punto de referencia con el cual se puede emitir una alerta temprana de prevención.

#### 1.5 Desarrollo capitular

El capítulo uno, se describe en forma breve la introducción objetivos, hipótesis, justificación, metodología y sus alcances; también se dan a conocer los resultados y sus aportaciones.

El capítulo dos, se trata el marco teórico que se utilizó en la elaboración de este proyecto.

El capítulo tres, se hace mención de los trabajos realizados por otros investigadores, su parecido y sus concordancias.

El capítulo cuatro, la descripción de la zona de estudio y sus principales características.

En el capítulo cinco, se encuentra el fundamento del trabajo así como los métodos que se utilizaron y la forma de plantear el problema.

El capítulo seis, se presentan los resultados a los que se llegó.

En el capítulo siete, corresponde a la discusión y análisis de resultados.

En el capítulo ocho, se encuentran las conclusiones y recomendaciones.



## Capítulo 2. MARCO TEORICO

Un proceso de remoción de masa (PRM) se define como el desplazamiento o movimiento ladera abajo de una masa compuesta por rocas, detritos, suelos residuales, sedimentos o materiales artificiales, limitados por una falla de esfuerzo cortante o sin ella. Esto en respuesta a un tipo de ajuste que los materiales presentes en un talud o ladera hacen en relación con su ambiente físico en donde la fuerza de gravedad los motiva y los factores climáticos (precipitación), sísmico y actividades antropogénicas (excavaciones sobrecarga y vibraciones del terreno) son los detonantes principales. (Hernández-Madrigal 2001).

En la actualidad se conoce que cerca del 50 % de los deslizamientos inventariados son producidos por factores meteorológicos como lluvias intensas y prolongadas (Delmonaco *et. al.*, 1999).

Las lluvias son complemento para el desarrollo de la economía y producción de un país trayendo consigo más beneficios que perjuicios, si se tiene una correcta planificación del territorio, sólo en comunidades alejadas y sin ninguna planeación se tienen problemas por la lluvia, ya que esos espacios urbanos son establecidos en zonas de peligro. Para evitar estas dinámicas de crecimiento urbanos hacia el peligro hidrometeorológico, sería de suma importancia que la autoridad competente diseñara una ruta preventiva y crítica para los desarrollos de crecimiento poblacional. En algunos casos se pueden prever desastres con estudios de especialistas que den la factibilidad de expansión.

### 2.1 Clasificación

En La tabla 1 se presenta el tipo de mecanismos de movimiento ligado a la inestabilidad de laderas y sus características más representativas, como el tipo de material involucrado y sus nombres en inglés.

Tabla 1 Clasificación de Varnes (1978), (tomada de Irasema Alcántara, 2001)

Mecanismos de movimiento	Tipo de material involucrado			
	Tipo	Roca (rock)	Derrubios (debris)	suelo (soil)
Desprendimientos (falls)		Caida o desprendimiento de rocas (rockfall)	Caida o desprendimiento de derrubios (debris fall)	Caida o desprendimiento de suelos (soil fall)
Vuelco o desplome (topple)		Vuelco o desplome de rocas (rock topple)	Vuelco o desplome de derrubios (debris topple)	Vuelco o desplome de suelos (soil topple)
Deslizamiento rotacional simple (rotational slide)		Individual (simple) Multiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Multiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Multiple (multiple) Sucesivo (succesive)
Deslizamiento translacional o de bloques no rotacional (translational slide, non-rotacional)		Deslizamiento de roca en bloques (block slide)	Deslizamiento de derrubios en bloque (block slide)	Deslizamiento translacional de suelos (slab slide)
Deslizamiento planar		Deslizamiento de rocas (rock flow)	Deslizamiento de derrubios (debris slide)	colada de barro (mudslide)
Flujos (flow)		Flujo de rocas (rock flow)	corrientes de derrubios (debris flow)	Flujo de tierra, arena o suelo (soil flow)
Expansión lateral (lateral spreading)		Expansiones laterales en rocas (rock spreading)	Expansiones laterales en derrubios (debris spread)	Expansiones laterales en suelos (soil spreading)
Complejo (complex)		Ejemplo: Alud de rocas (rock avalanche)	Ejemplo: Flujo deslizante (flow slide)	Ejemplo: Rotacion con flujo de tierras (slumpe-earthflow)

a) **Desprendimientos o caídas:** son materiales como rocas, detritos o suelos en movimiento en caída libre de una superficie inclinada los materiales pueden fluir, rodar o deslizarse ladera abajo (figura. 1). Se subclasifican en caídas de rocas (*rock falls*), caídas de detritos (*debris falls*), caídas de suelos (*soil falls*).

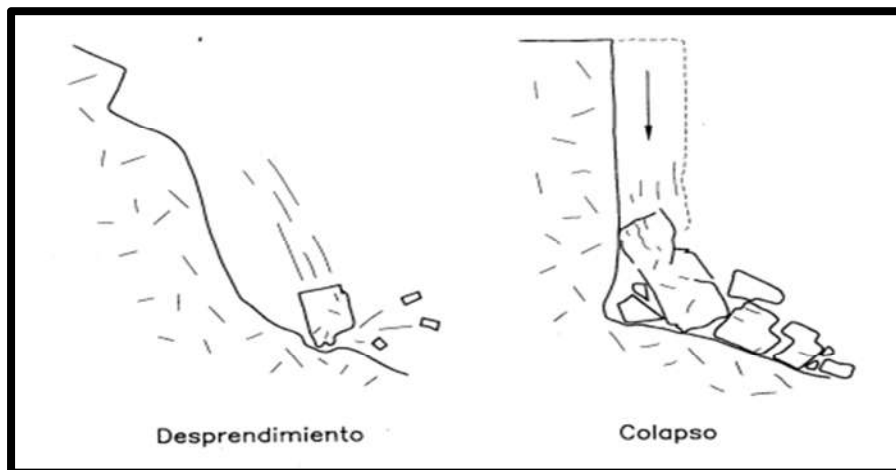


Figura 1 Mecanismo de desprendimiento y colapso (Corominas y García, 1997).

- b) **Vuelcos o desplome:** Es la rotación de una masa de suelo o roca hacia adelante con un fulcro por debajo de centro gravitacional, la gravedad y su propio peso, como agentes naturales (agua o hielo) que han penetrado en fisuras y desestabilizan la masa desplomándose. Dos tipos se distinguen (figura. 2).

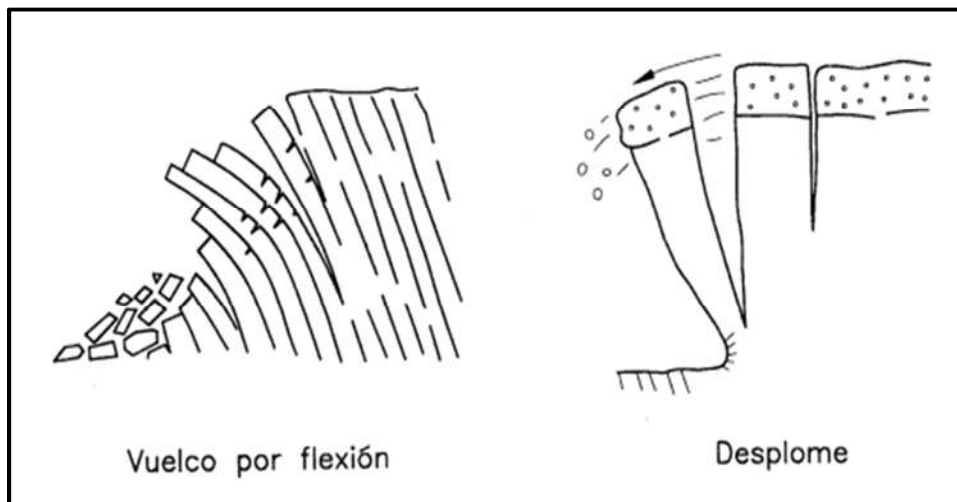


Figura. 2 Mecanismo de vuelco (Corominas y García 1997).

- c) **Deslizamiento:** Es un desplazamiento lateral abajo de una masa de suelo o roca, que tiene lugar predominantemente sobre una o más superficies de rotura, o zonas relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla (figura. 3). Elementos característicos de este tipo de movimiento 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).

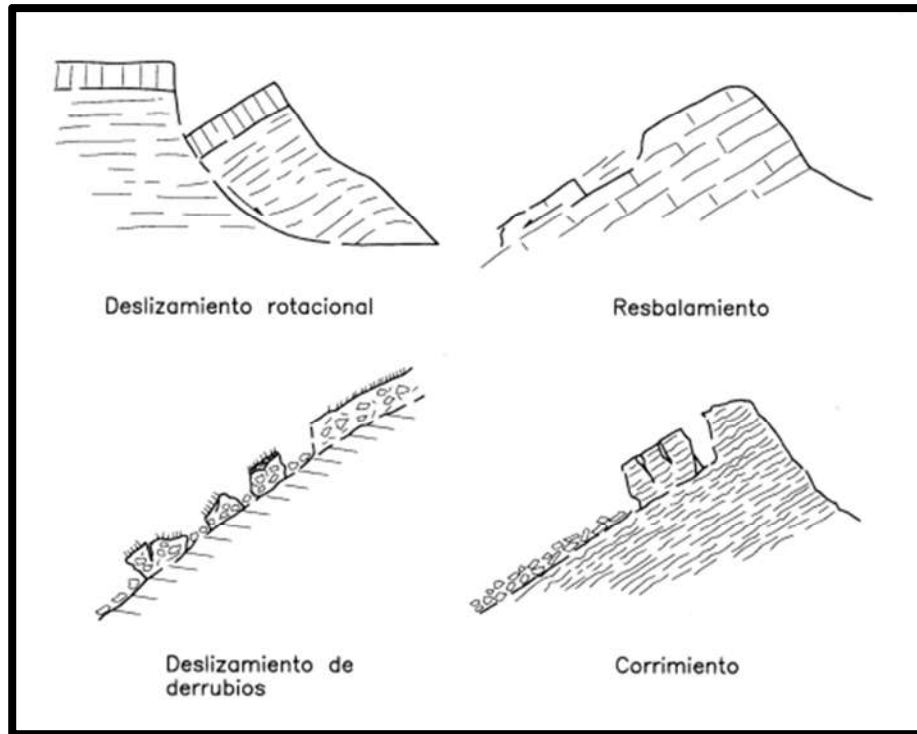


Figura. 3 Mecanismo de deslizamiento. (Corominas y García 1997).

Se distinguen dos tipos de deslizamientos bien definidos, el deslizamiento de tipo rotacional (*rotational slides*) la rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa deslizada y *traslacionales (translational slides)* tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada. La masa deslizada puede proseguir por la ladera. Los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas. (Corominas y García 1997).

La distinción entre deslizamientos rotacionales y traslacionales es importante en lo que se refiere a los análisis de estabilidad y el diseño de medidas de control y estabilización. El rotacional es el que dispone de métodos de análisis y modelización más desarrollados.

La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales; el material de la

cabecera normalmente se subduce generando depresiones en las que se acumula agua e induce el movimiento, este mecanismo normalmente es característico de suelos finos homogéneos y de macizos altamente fracturados.

Con base en las etapas del movimiento, los deslizamientos rotacionales se clasifican en: simples, múltiples y sucesivos, clasificación que también se aplica a las variantes resultantes del tipo de material (p.ej. deslizamiento de roca, de escombros o de suelo) y por ende, deslizamiento de roca individual, múltiple, sucesivo, etc.

**c.1** Movimiento simple: es el movimiento rotacional o traslacional de una remoción de masa individual a lo largo de una superficie de ruptura (figura. 4).

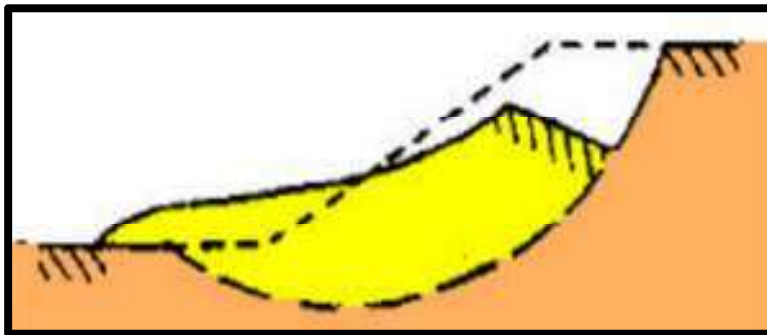


Figura. 4 Movimiento simple (Hutchinson, 1968).

**c.2** Movimiento múltiple: una o más masas con el mismo tipo de movimiento a lo largo de dos o más superficies de rupturas distintas (figura. 5).

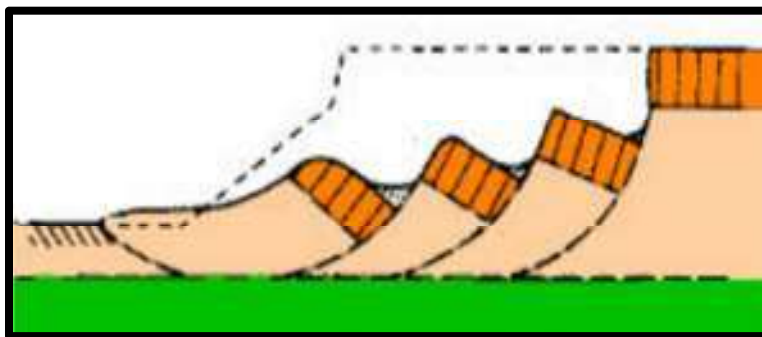


Figura. 5 Movimiento múltiple (Hutchinson, 1968).

Si un movimiento múltiple se desarrolla a lo largo de un período de tiempo, se utiliza el término movimiento sucesivo (figura. 6).

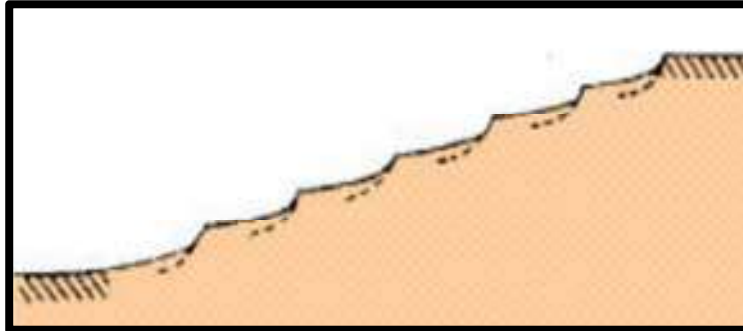


Figura. 6 Movimiento sucesivo (Hutchinson, 1968).

Deslizamientos traslacionales (*translational slides*). Tiene lugar a lo largo de una superficie de rotura plana u ondulada. La masa deslizada puede proseguir por la pendiente. Los componentes de la masa desplazada se mueven a la misma velocidad y siguen trayectorias paralelas. A medida que un deslizamiento traslacional progresa puede romperse, en particular si aumenta la velocidad.

**d) Flujos:** Son movimientos espacialmente continuos (figura.7), de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar. El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular.

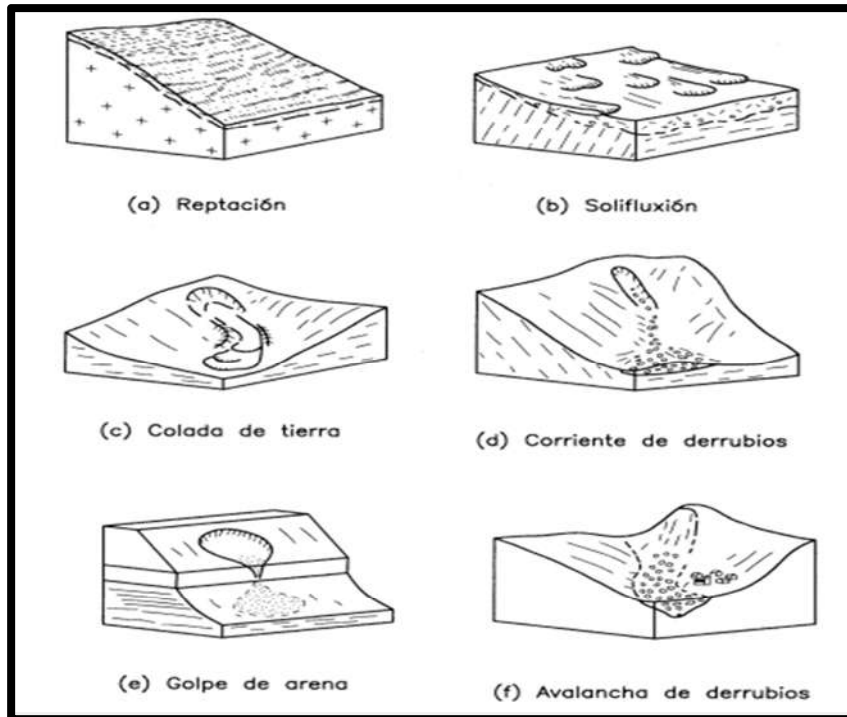


Figura. 7 Movimiento de flujo. (Corominas y García 1997).

**d.1** Reptación (*creep*). La reptación es un movimiento extremadamente lento que es imperceptible excepto para largos períodos de tiempo (Sharpe, 1938). La velocidad de desplazamiento del suelo es lo suficientemente lenta para que la vegetación de los prados crezca al mismo tiempo que el avance de las partículas.

**d.2** Soliflujión (*soliflution*). Término utilizado a menudo para describir deformaciones de pequeñas dimensiones en suelos cohesivos y de poco espesor, que dan lugar a formas lobuladas. Abunda en ambientes peri glaciares donde la fusión estacional del hielo en el terreno provoca el aumento de las presiones de agua en los poros, dando lugar al movimiento del material superficial, limitado en profundidad por la capa activa (Ferrer, 1988).

**d.3.** Flujos de tierra (*Earthflows*) Es la deformación plástica, lenta y no necesariamente muy húmeda, de tierra o rocas blandas (*flysch*, pizarras, filitas), en laderas de inclinación moderada. Cuando predominan los materiales cohesivos con un

elevado contenido de limos y arcillas, se les denomina coladas de barro (*mudflows*) (Corominas y Alonso, 1984, Ayala *et al.* 1987). Han observado que algunas formas de coladas de barro progresan principalmente por deslizamiento sobre superficies de cizalla con moderada deformación interna (Hutchinson, 1988).

**d.4** Flujos de detritos (*debris flows*). Son movimientos rápidos de material detrítico en el que predomina la fracción gruesa, es decir, arenas, gravas y bloques. El contenido de agua es elevado y la fracción sólida puede llegar a constituir el 80% en peso de la masa en movimiento.

**d.5.** Flujos de arena y limo (*sand and silt flows*). Movilización brusca de estos materiales, a veces en estado seco (García y García, 1988). Normalmente se producen por colapso estructural por efecto de un movimiento sísmico o al iniciarse la rotura del suelo por deslizamiento.

**d.6.** Avalanchas, (*alude, avalanchas, sturzstroms*). Movilización de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas o detritos a gran velocidad, en ocasiones, superiores a los 50 m/s. El término avalancha no implica necesariamente un mecanismo distinto al de los previamente definidos en otros flujos, a menudo a través de una angostura, alcanzando grandes distancias, a veces, decenas de kilómetros.

Los flujos envuelven todos los tipos de materiales disponibles y se clasifican por su contenido de material de roca, detritos o suelo.

## 2.2 Factores

Los factores que determinan e influyen en un proceso de remoción de masa se dividen en condicionantes, que dependen de las características propias de la ladera y detonantes, que son los factores externos responsables de la inestabilidad.



*Tabla .2 Factores detonantes*

Lluvias	Su efecto depende de la intensidad, duración y distribución de la lluvia; puede ocasionar disolución de cementantes, además influye directamente en factores condicionantes como la meteorización y el nivel de agua subterránea.
Sismos	Las vibraciones sísmicas originan fluctuaciones en el estado de esfuerzos en el interior del terreno y pueden originar todo tipo de movimientos (caídos, deslizamientos, flujos, avalanchas, etcétera), dependiendo además de la magnitud del sismo, la duración y la distancia al epicentro.

*Tabla 3 Factores condicionantes*

Morfología y topografía	El relieve influye en la inestabilidad, a mayor pendiente y altura aumenta el efecto de la gravedad.
Geología y características de los suelos superficiales	El tipo de roca, grado de alteración, presencia de discontinuidades (grietas, fracturas, fallas), planos estratigráficos, porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas (resistencia y deformación), y estado de esfuerzos.
Condiciones hidrogeológicas	El agua en el interior del terreno disminuye la resistencia cortante al aumentar la presión intersticial, además incrementa el peso volumétrico del terreno con el consiguiente aumento en los esfuerzos actuantes.
Vegetación	Las raíces fijan los suelos superficiales a los estratos de roca más resistentes ubicados a mayor profundidad, absorben el agua contenida en el suelo y atenúan la erosión superficial al mitigar el impacto de las gotas de lluvia y reducir la velocidad de escurrimiento.
Vulcanismo	Las erupciones volcánicas pueden originar deslizamientos o avalanchas de detritos de gran magnitud y velocidad en las laderas de los conos volcánicos; además que el deshielo de las partes altas puede originar flujos rápidos.
Congelación y Deshielo	Factores climáticos que afectan principalmente a regiones frías; este fenómeno produce expansiones, contracciones e infiltración de agua en fisuras y grietas
Erosión y Socavación	Incluye la acción erosiva de ríos y oleaje, produciendo los siguientes efectos: - Socavación del material en el pie de la ladera que modifica el estado tensional y aumenta las fuerzas cortantes actuantes. - El deslizamiento puede embalsar un río y después romper súbitamente.
Actividad humana o Antrópica	Influye en la estabilidad al cambiar la geometría de la ladera por excavaciones, construcción de caminos y presas, sobrecargas debido a estructuras, terraplenes o rellenos, voladuras, etc.; además, estas obras en general cambian las condiciones hidrogeológicas al alterar el drenaje superficial afectando el nivel freático y el flujo natural de escurrimiento. También se incluye la deforestación como una de las actividades humanas que más influencia negativa tiene en la estabilidad de una ladera.

### 2.3 Umbrales de precipitación

El término “umbral” (*threshold*) define el nivel mínimo o máximo (crítico) de alguna cantidad necesaria para que tenga lugar un proceso de remoción en masa (Reichenbach *et al.*, 1998). Por otro lado (Croizer, 1996) define como un umbral mínimo al nivel más bajo de la cual un proceso no ocurre y un umbral máximo es el nivel por encima del cual se produce un proceso siempre.

Se puede decir que un umbral de precipitación es el rango de precipitación que cambia las propiedades físico-mecánicas del suelo, influyendo en el esfuerzo cortante, la fuerza normal que implica directamente en la disminución de su factor de seguridad, de una estabilidad aparente y puede desencadenar un proceso de remoción de masa.

Se pueden hacer localmente o de una región, solo lo restringe el contenido histórico de un proceso de remoción de masa con el que se cuente (figura. 8).

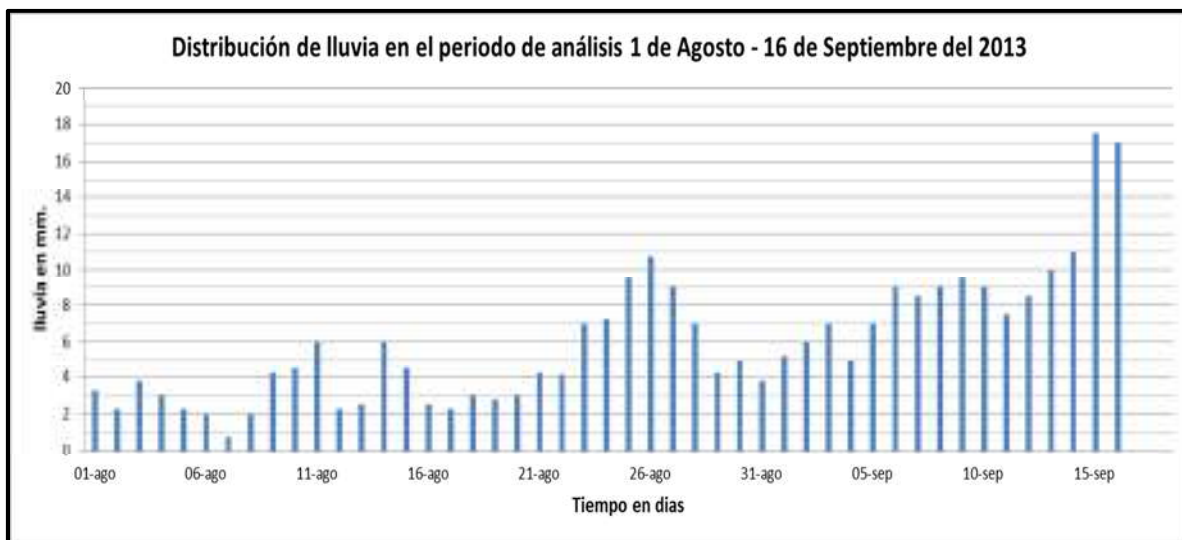


Figura. 8 Registro de precipitación diaria para el periodo del 1 agosto al 16 de septiembre del 2013. La Pintada Guerrero México.

## 2.4 Infiltración

Del latín “*solum*” SUELO es la parte de la corteza terrestre o sustrato físico, en la que se apoyan estructuras civiles o de uso agrícola, resulta de la meteorización de la roca madre por agentes atmosféricos y biológicos. Tiene características únicas en una región y a su vez puede ser autóctono (residuales) o alóctono (transportados); tiene mineral o materia orgánica en diferentes proporciones y depende del grado de intemperismo físico o químico, que puede formar sub estratos con las mismas características minerales esenciales de su roca madre.

Se define como infiltración al movimiento del agua de la superficie hacia el interior del suelo. Es un proceso que depende fundamentalmente del agua disponible a infiltrar, la naturaleza del suelo (granulometría), el estado de la superficie (vegetación), cantidades de agua (natural y succión mátrica) y aire inicialmente presente en su interior.

A medida que el agua se infiltra desde la superficie, los estratos superiores del suelo se van humedeciendo más o menos rápido en función de la permeabilidad de arriba hacia abajo, alterando gradualmente su humedad y en consecuencia cambiando la presión de poro de negativa a positiva. En cuanto al aporte de agua, el perfil de humedad tiende a la saturación en toda la profundidad (presión de poro positiva), siendo la superficie el primer nivel a saturar.

Normalmente el agua que se infiltra proveniente de las precipitaciones no es capaz de saturar todo el suelo, sólo en condiciones muy especiales (tipo de suelo e intensidad-duración de lluvia), pero en general sólo satura las capas más cercanas a la superficie, conformando un perfil típico donde el valor de humedad decrece con la profundidad (figura. 9).

Cuando cesa el aporte de agua en la superficie deja de haber infiltración, la humedad en el del suelo se redistribuye generando un perfil de humedad inverso, con valores de humedad menores en las capas cercanas a la superficie y mayores en las capas más profundas.

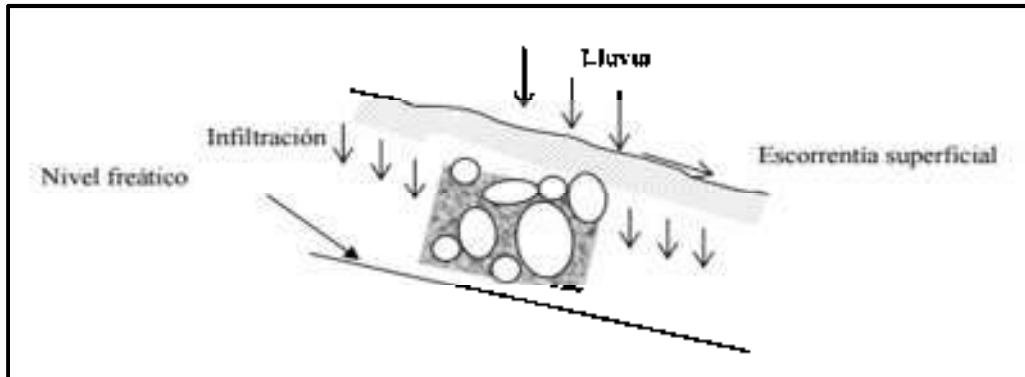


Figura. 9 Proceso de infiltración de suelo.

## 2.5 Modelación numérica (*SEEP/W*)

La modelación numérica con el programa *Geoslope*, *SEEP/W* utiliza el modelo saturado/no saturado donde intervienen las siguientes características: función de conductividad hidráulica, relación de conductividades en las direcciones X e Y, además de la dirección y la función de contenido de humedad. (Fredlund y Xing 1994) Las ecuaciones que se presentan en esta sección constan en el *SEEP/W Engineering Book 2007*.

### 2.5 a) Función de contenido volumétrico de agua

Es importante entender la relación entre la presión de poro y el contenido de agua en un análisis de infiltración. El suelo es un conjunto de partículas sólidas y vacías intersticiales. Los vacíos intersticiales pueden estar llenos de agua, aire o una combinación de ambos. En un suelo saturado todos los vacíos intersticiales están llenos de agua y el contenido volumétrico de agua es igual a la porosidad.

$$\Theta = n s \dots\dots\dots (1)$$

Dónde:

$\Theta$  = Contenido volumétrico de agua

n = La porosidad

s = El grado de saturación (en suelo saturado es 1.0 o 100%).

En un suelo no saturado, el volumen de agua almacenado dentro de los vacíos variará dependiendo de la succión mátrica. La succión mátrica es definida como la diferencia entre la presión de aire (**Ua**) y de agua (**Uw**). No hay contenido fijo de agua en el tiempo y en el espacio, por lo que es requerida una función que describa como el contenido de agua cambia con las diferentes presiones en el suelo.

La función de contenido volumétrico de agua describe la capacidad del suelo de almacenar agua bajo los cambios de la presión mátrica. Una función típica para un suelo drenado se muestra en la (figura 10) donde la función fue medida para una presión de aire de cero.

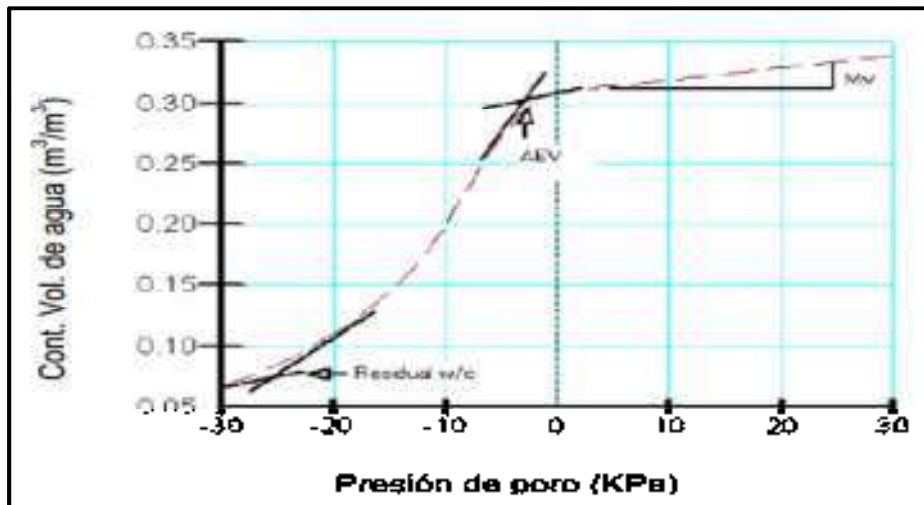


Figura. 10 Función típica del contenido volumétrico de agua. Fuente: SEEP/W ENGINEERING BOOK, 2007.

La función de contenido volumétrico de agua, describe que porción o volumen de vacíos permanece lleno de agua. Las tres principales características de la función de contenido volumétrico de agua son el valor de entrada de aire (AEV), que es el punto del cruce entre la línea descendente de la presión de poro y la disminución brusca de la presión de poro; la pendiente de la función para las regiones positiva y negativa constante de la presión de poro (designadas como  $m_w$ ); y el contenido de agua residual o saturación ( $Q_r$  o  $S_r$ ).

El valor de entrada de aire (**AEV**) corresponde al valor de presión de poro negativa cuando los vacíos más grandes o los poros llegan a ser drenados libremente. Es una función del tamaño de poro máximo en un suelo y es también influenciado por la distribución granulométrica. Los suelos grandes con formas de poro uniformes tienen relativamente un menor valor de **AEV**.

La pendiente de la función de contenido volumétrico de agua, en la región negativa de la presión de poro, representa la velocidad en que el volumen de agua almacenado cambia directamente con la presión, en un rango de valores de **AEV** a la presión del contenido residual de agua.

El suelo puede ser drenado por las fuerzas gravitacionales o por la compresión de la estructura del suelo, provocando que el tamaño de los vacíos se reduzca. En la región positiva de la presión de poro,  $m_w$  llega a ser equivalente a  $m_v$ , el coeficiente de compresibilidad para la consolidación en una dimensión.

Otra característica clave de la función de contenido volumétrico de agua es el contenido volumétrico de agua residual (**WRC**), que representa el contenido volumétrico de agua de un suelo donde un incremento en la presión de poro negativa no produce un cambio significativo en el contenido de humedad. Este punto puede ser determinado en términos del grado de saturación por la relación entre el contenido volumétrico de agua y la

porosidad. Es posible eliminar el agua en un estado menor que el residual, pero este proceso es controlado por la evaporación y las fuerzas osmóticas.

### 2.5 b) Factores que influyen en la función

Hay varios factores que influyen en la forma de la función de contenido volumétrico de agua. Como se mencionó anteriormente, el valor de la entrada de aire (**AEV**) refleja cuanta presión de poro negativa puede ser aplicada al agua que se encuentra en los poros, antes de que en los poros más grandes empiecen a drenar.

Considerando la función de la arena uniforme (figura. 11) donde las partículas son relativamente grandes y del mismo tamaño, el agua puede ser fácilmente removida debido a una presión de poro relativamente pequeña, lo que resulta en un **AEV** más pequeño que para la arcilla o el limo. La naturaleza uniforme de los poros significa que todos los poros drenan bajo un rango pequeño de presión de poro negativa, haciendo que la pendiente de la función sea más pronunciada respecto de las otras.

Los limos tienen una distribución más amplia de tamaños de poro. Algunos de los poros entre las partículas más grandes de arena son llenados con partículas de limo, haciendo más pequeño el tamaño de los poros que los de la arena uniforme.

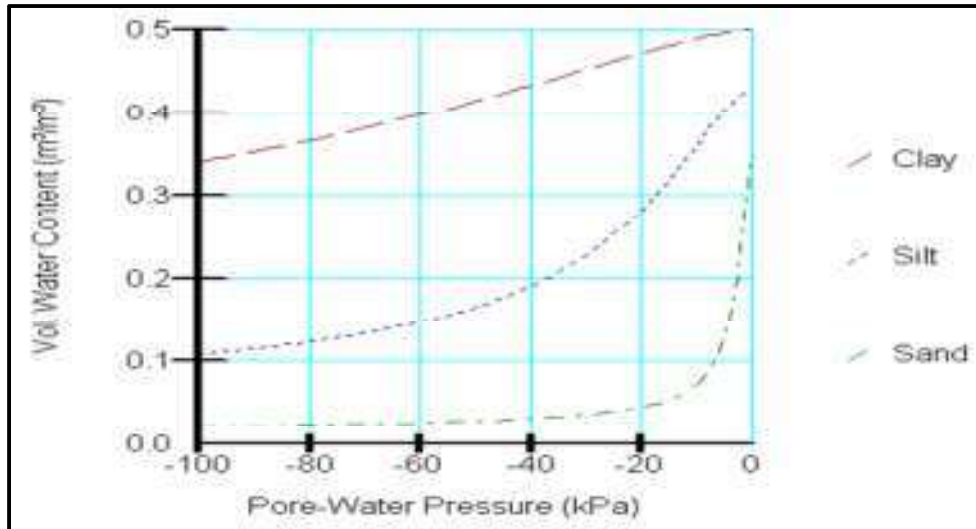


Figura.11 Funciones típicas de 3 tipos de suelo. Fuente: SEEP/W ENGINEERING BOOK, 2007.

Consecuentemente, una mayor presión de poro negativa deberá ser aplicada antes de empezar el drenaje, es decir que **AEV** se incrementa. Adicionalmente los tamaños de los poros ya no son tan uniformes y la pendiente de la función es menos pronunciada (figura. 11).

Los poros en la arcilla son pequeños lo que dificulta la identificación de un valor específico de **AEV** para la arcilla, donde la consolidación y los cambios en la estructura de la arcilla pueden liberar agua del sistema en un rango significativo antes de que el aire ingrese a los poros.

## 2.6 Modelación numérica (*slope/w*)

Existen diferentes técnicas de solución para el método de las dovelas. Básicamente todos son muy similares y las diferencias estriban en las ecuaciones de la estática que se incluyan y se satisfagan así como las fuerzas que estén incluidas en el corte, a su vez de la relación entre el esfuerzo cortante y las fuerzas normales estas son las que utiliza el *slope/w* (figura.12).



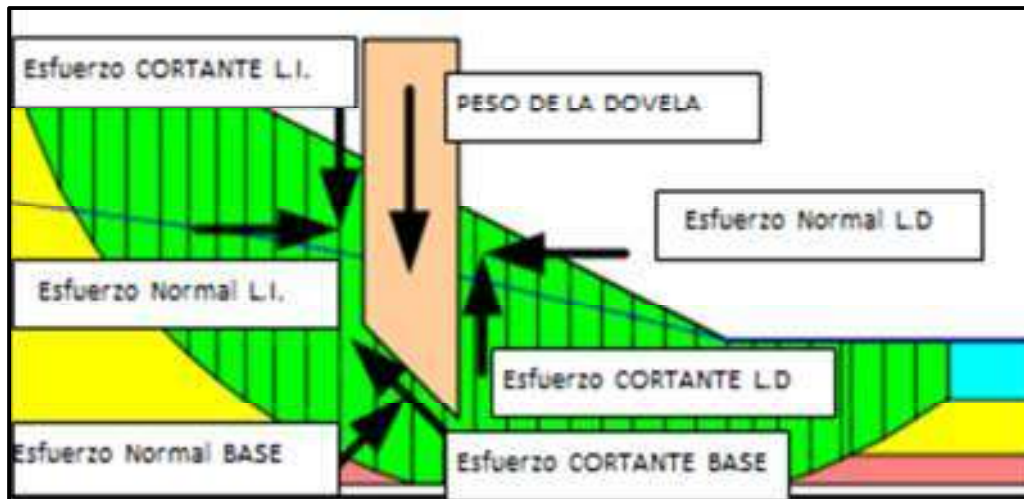


Figura. 12 Esfuerzos en la dovela involucrados. Fuente: SLOPE/W ENGINEERING BOOK, 2007.

El programa slope/w está fundamentado en la base matemática del elemento finito técnica matemática, que para realizarla a mano es muy tardada y compleja, las computadoras hacen posible manejar más fácilmente los procedimientos iterativos inherentes al fundamento del programa es el método de equilibrio límite, y esto llevó a matemáticas más rigurosas formulaciones que incluyen a todas las fuerzas entre cortes y satisfacen todas las ecuaciones de la estática.

### 2.7 Método de equilibrio límite general (GLE)

Una formulación de equilibrio límite general (GLE) fue desarrollada por Fredlund en la Universidad de Saskatchewan, en la década de 1970 (Fredlund y Krahn 1977; Fredlund *et al.*, 1981). La formulación **GLE** se basa en dos factores de ecuaciones de seguridad y permite una gama de condiciones de fuerza de corte normal entre dovelas. Una ecuación da el factor de seguridad con respecto al momento de equilibrio (**Fm**), mientras que la otra ecuación da el factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas horizontal (**Ff**).

La idea de utilizar dos factores de ecuaciones de seguridad fue realmente publicada por primera vez por Spencer (1967).

El factor de seguridad de la ecuación GLE con respecto al momento de equilibrio (2):

$$F_m = \frac{\Sigma(c'\beta R + (N - u\beta)R \tan\phi')}{\Sigma wx - \Sigma Nf \pm \Sigma Dd} \quad (2)$$

El factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerza horizontal es (3):

$$F_m = \frac{\Sigma(c'\beta \cos\alpha + (N - u\beta) \tan\phi' \cos\alpha)}{\Sigma N \sin\alpha - \Sigma D \cos\omega} \quad (3)$$

Los términos de las ecuaciones son:

$c'$  = cohesión efectiva

$\phi'$  = ángulo efectivo de fricción

$u$  = presión del agua intersticial

$N$  = base dovela fuerza normal

$W$  = peso de la dovela

$D$  = punto de carga concentrada

$\beta, R, X, f, d, W$  = parámetros geométricos

$\alpha$  = inclinación de la base de la dovela.

Una de las variables clave en ambas ecuaciones es  $N$ , la fuerza normal en la base de cada dovela. Esta ecuación se obtiene mediante la suma de las fuerzas verticales de la dovela, en forma de ecuación, se define como (4):

$$N = \frac{w + (x_R - x_L) - \frac{(c'\beta \sin\alpha + u\beta \sin\alpha \tan\phi')}{F}}{\cos\alpha + \frac{\sin\alpha \tan\phi'}{F}} \quad (4)$$

$F$  es  $F_m$  cuando  $N$  está sustituido en el factor de momento de la ecuación de seguridad y  $F$  es  $F_f$  cuando  $N$  está sustituido en el factor de fuerza de la ecuación de seguridad. La literatura sobre análisis de estabilidad de taludes a menudo se refiere al denominador de esta ecuación como  $m\alpha$ .

El método que se utilizó para resolver el problema del factor de seguridad fue por el método de dovelas de Morgenstern y Price que utiliza las fuerzas normales en ambos lados de las dovelas, así como sus fuerzas cortantes y en la base de la misma, además cuenta con un factor en función de una ecuación que determina el operador conforme a sus necesidades.

### 2.8 Método de Morgenstern y Price (M-P)

Morgenstern y Price (1965) desarrollaron un método similar al método de Spencer, pero permitieron variar la función entre dovelas. Una vez que se conoce la fuerza normal entre dovela, la fuerza de cizalladura entre dovela se calcula como un porcentaje de la fuerza normal entre cada rebanada de acuerdo con la siguiente ecuación empírica propuesta por M-P.

$$X = E \lambda f(x) \quad (5)$$

Dónde:

$\lambda$  = El porcentaje (en forma decimal) de la función utilizada, y

$f(x)$  = Fuerza entre dovela, función que representa la dirección relativa de la resultante de las fuerzas entre cortes.

La (figura.13) muestra algunas formas de función típica. El tipo de función de la fuerza utilizada para calcular el factor de seguridad es una prerrogativa del usuario.

La selección de la función “constante” hace que el método M-P es idéntico al método Spencer.

Se requiere una función que se adapte a las necesidades de cada problema, con fines ilustrativos, veamos un análisis M-P con una función de media onda sinusoidal (función medio seno).

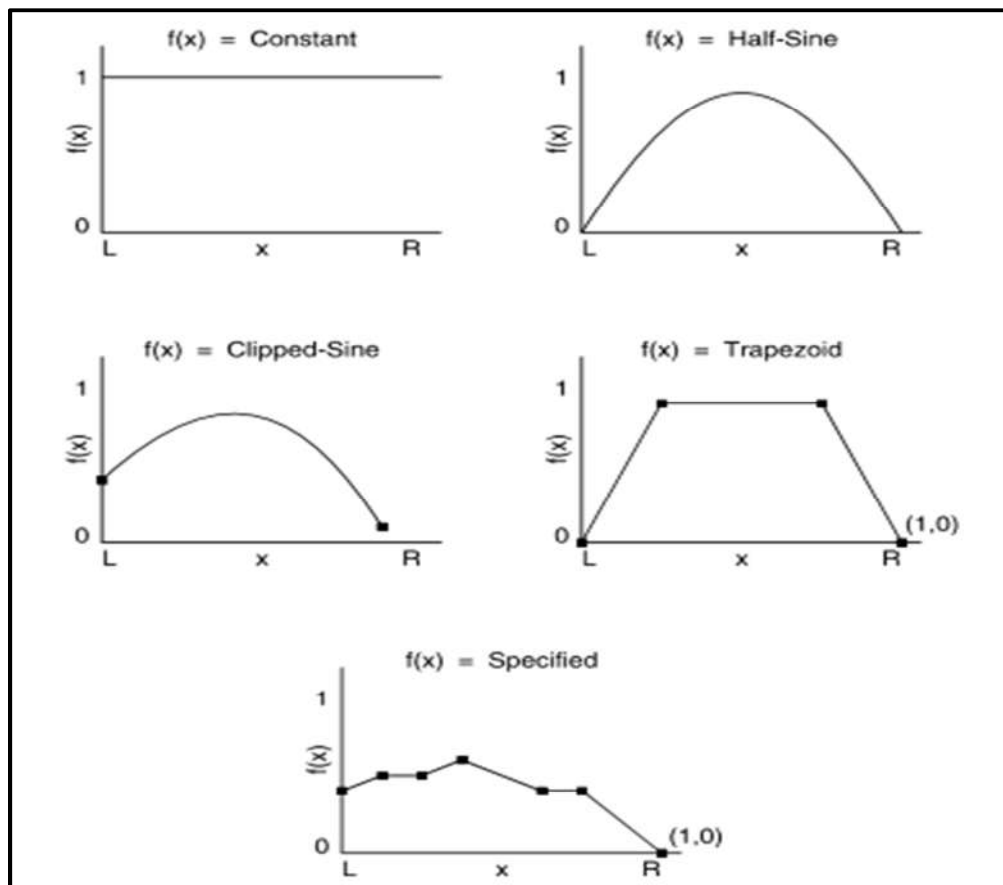


Figura. 13 Funciones típicas entre dovelas. Fuente: SLOPE/W ENGINEERING BOOK, 2007.

Para este ejemplo, la relación de cizalladura a la normalidad varía de 0.0 en la cresta y en el pie, a un máximo de 0.5 en el punto medio a lo largo de la superficie de deslizamiento (figura.14).

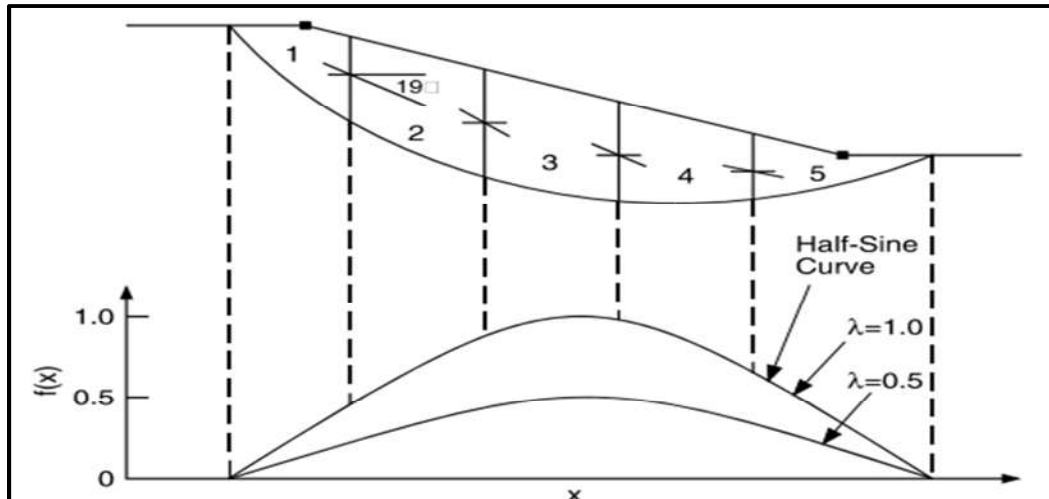


Figura. 14 Función fuerza media sinoidal entre dovelas. Fuente: SLOPE/W ENGINEERING BOOK, 2007.

En resumen, el método Morgenstern-Price:

- Considera la fuerza de cizallamiento y fuerzas normales entre dovelas,
- Satisface momento y equilibrio de fuerzas, y
- Permite una variedad de función fuerza entre dovelas seleccionado por el usuario.

### 2.9 Forma en que se liga *slope/w* con *seep/w*

Una de las características más potentes de GeoStudio es facilitar la integración que existe entre todos los programas individuales del paquete.

Es posible desarrollar el perfil del trabajo, ya sea en el módulo de SEEP / W o SLOPE / W, para situaciones sencillas de presión de poros de agua, hay varias opciones diferentes que se pueden usar directamente dentro de SLOPE / W; sin embargo, si las presiones de poros de agua se hacen más complejas o se requieren para un tiempo inicial o la variación que tiene en el tiempo, a veces es necesario utilizar SEEP / W, para llevar a cabo un análisis de filtración por elemento finito y calcular el perfil de presión de poros estático o transitorio.

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)

Sin embargo, las ecuaciones de elementos finitos de SEEP / W será necesario resolver en primer lugar, antes de que los resultados de la presión del agua intersticial estén disponibles para su uso dentro SLOPE / W.

Esto se logra mediante la resolución de las ecuaciones de elementos finitos para cada nodo de una malla propuesta entre más grande mayor precisión, dependerá de la potencia del ordenador que se utilice. Una vez que las ecuaciones de elementos finitos se han resuelto en SEEP/W y es calculando la presión de poro, presiones totales, etc. SLOPE/W puede utilizar estos datos para determinar la superficie de deslizamiento crítico mediante el método propuesto y el uso de las presiones de poros de agua que existen almacenados en la malla de elementos, podrá definir una superficie crítica de deslizamiento para un tiempo inicial si así se requiere o a su vez poder realizarlo en tiempos definidos previamente o de interés.

Verificar la superficie de ruptura crítica y cuantificar el factor de seguridad crítico con determinadas cantidades de agua en el suelo de cada dovela esto dependerá de la necesidad de la resolución.

## Capítulo 3. ANTECEDENTES

### 3.1 Lluvia como detonante y umbrales de precipitación

Las lluvias pueden detonar movimientos en masa, originan procesos de remoción de masas superficiales de suelo y flujos de lodos, los cuales se inician por una pérdida transitoria de la resistencia al cortante, resultado de un incremento de la presión de poros, causado por intensas lluvias que percolan en suelos permeables superficiales que se localizan sobre roca y/o horizontes menos permeables (Reichenbach *et al.*, 1998).

El incremento en la presión de poro puede estar directamente relacionado con la infiltración de la lluvia y con el proceso de percolación y puede ser el resultado del aumento de los niveles de saturación desde los horizontes inferiores, por acumulación de agua debido al contacto menos permeable, antrópico-suelo residual para este caso (Terlien, 1998).

Aunque es conocida la lluvia antecedente como un factor importante que predispone las condiciones de inestabilidad de una ladera, su influencia es difícil de cuantificar, ya que depende de factores difíciles de valorar. Como son las condiciones de evapotranspiración del lugar, la homogeneidad de los suelos e incluso la repercusión de la cantidad de lluvia que afecta directamente al factor de seguridad.

La influencia de la lluvia es un antecedente en la estabilidad de las laderas reduce la succión de la matriz en el suelo, causando que la permeabilidad en el suelo se incremente, lo que se traduce en una mayor infiltración del suelo, aunque también hay factores importantes a mencionar como son la vegetación superficial y las raíces de las mismas. La presión de poro como resultado de las lluvias, disminuye la resistencia al cortante y en consecuencia, el factor de seguridad también se reduce durante la lluvia.

La lluvia diaria y la lluvia antecedente, tienen ambas un papel importante en la generación de los movimientos; sin embargo, resalta (Lan *et al.* 2003), que la importancia de la lluvia antecedente en la estabilidad de la vertiente depende de las condiciones locales, tales como las propiedades de los suelos, las condiciones superficiales y la variabilidad climática.

### 3.2 Umbrales de precipitación

Da lugar a proponer un punto de partida un umbral en la afectación en la estabilidad de un talud y debe de ser directamente un punto donde sea un antes y un después, la lluvia deberá de ser cuantificada como un número, no tomando en cuenta en la forma que está es depositada, si es poca cantidad y de gran duración o si es de gran cantidad en poco tiempo.

Si no como un número abstracto expresado como el acumulado en mm, que de su carácter de influencia directa en el factor de seguridad.

Por una parte la precipitación como factor detonante en la ocurrencia de movimientos en masa ha sido estudiada por numerosos autores (Caine, 1980; Finlay, Fell y Maguire, 1997; Montgomery y Dietrich, 1994; Crosta, 1998; Crozier, 1999; Iverson, 2000) (ARISTIZABAL, 2007). Por otra parte, el estudio determinación de los umbrales de precipitación fue iniciado por (Campbell, 1975), (Caine, 1980) quienes han hecho referencia en la deducción de fórmulas en función de datos estadísticos e históricos llevando así a la obtención de determinaciones de la influencia que tienen, las lluvias naturales y atípicas a la relación que tienen con los suelos que se han estudiado.

Y posteriormente se realizaron umbrales de precipitación con (Cancelli e Nova, 1985), (Cannon and Ellen 1985), (Wieczorek, 1987), (Larsen, 2008), (Ceriani *et al.*, 1994), (Crosta & Amp y Frattini, 2001), (Glade, T.; Crozier, M. and Smith, P. 2000). En su mayoría solo se



han correlacionado la intensidad-duración con los deslizamientos superficiales y de flujos de detritos. Todos ellos realizaron la obtención de fórmulas exclusivas de cada evento en particular.

Los umbrales de lluvia para el pronóstico de los movimientos en masa pueden ser definidos de dos maneras; (a) usando métodos empíricos o estadísticos, muy conocidos dentro de los sistemas de alerta temprana por su fácil implementación, y (b) a partir de modelos físicos numéricos, de mayor complejidad en su definición y aplicación (Guzzetti *et al.*, 2008).

### 3.2.a) Los umbrales empíricos

Son fáciles de determinar y aplicar porque tratan con antecedentes de las lluvias en cuanto a su intensidad y duración, así como la acumulación por periodos de tiempo. Se basan en el análisis histórico de las precipitaciones, y están relacionados con la historia correspondiente a un deslizamiento acontecido.

Se puede decir que en los umbrales empíricos se correlaciona la cantidad total de precipitación con la ocurrencia de deslizamientos e intensidad máxima registrada (Govi *et al* 1985); o bien, la precipitación acumulada en un periodo antecedente hasta la ocurrencia del deslizamiento, las precipitaciones diarias con el de la ocurrencia (Lumb, 1975, De Vita, 2002). Los principales umbrales establecidos bajo este método son los publicados por:

Caine N (1980)	$E = 14.82 \times D^{0.61}$	$0.167 < D < 500$
Jibson RW (1989)	$I = 30.53 \times D^{-0.57}$	$0.5 < D$
Crosta GB, Frattini P (2001)	$I = 0.48 + 7.2 \times D^{-1.00}$	$0.1 < D < 1000$
Cannon SH, Gartner JE (2005)	$I = 7.00 \times D^{-0.60}$	$0.1 < D < 3$
Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark CP (2008)	$I = 22.26 \times D^{-0.90}$	$0.1 < D < 48$

D en mm.

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)

### 3.2.b) Los umbrales físicos

Se basan en modelos numéricos que toman en cuenta la relación entre la presión de poro del material y las precipitaciones, y su relación con la estabilidad de laderas a través del acoplamiento de modelos hidrológicos y de estabilidad.

No son ampliamente desarrollados ya que requieren un conocimiento detallado de hidrología, hidrogeología, morfología y propiedades geomecánicas información que rara vez están disponibles especialmente a escala regional. Ejemplo de estos son las conclusiones a que se han llegado como, la lluvia no es un factor importante (Brand, 1992) o que las laderas cubiertas con gruesos coluviones sin tener grandes vacíos, un flujo de detritos, pueden ocurrir sin antecedentes importantes de precipitaciones (Corominas y Moya, 1999).

La ventajas que tienen el método empírico es que es fácil de realizarlo si se tienen datos disponibles que puede hacerse en forma regional que cuente con un inventario de procesos de remoción de masas.

Desventajas entre los métodos empíricos y físicos resulta que básicamente los dos métodos están apoyados en interpretar datos estadísticos y considero que los umbrales deberían de ser predicciones de eventos que ayuden a evitar peligros en deslizamiento de laderas.

La metodología que se propuso fue basada en el método físico, utilizando las propiedades características de los materiales tanto físicas como mecánicas apoyada en la mecánica de suelos y basado en determinar la curva del factor de seguridad esta forma de conducir los datos nos ayudará a determinar el umbral mínimo y el máximo donde las propiedades del talud empiezan a cambiar a efecto de poder predecir un probable evento.

La tabla 4 es un resumen de varios eventos en el mundo de tres tipos de deslizamientos. Se observan las precipitaciones acumuladas que van desde los dos días hasta los treinta y varían de 50 mm hasta los 325 mm.

Tabla 4 umbrales de precipitación para desencadenamiento de movimientos de ladera. Tomada parcialmente y textualmente (González *et al* 2002)

Tipo de movimiento y país	Intensidad horaria (1h)	Intensidad diaria (1d)	Precipitación acumulada
	Hong Kong	> 40 mm	> 50 mm (15 días)
			> 100 mm
Flujos de barro y tierra	Japón		> 182 mm (2 días)
	Italia (toscana)		260 mm (15 días)
			325 mm (30 días)
	Brasil	60 mm	0.4 Precipitación anual
			> 675 mm (3 días)
Flujos derrubios	Estados unidos (california)		> 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 atlantico	> 150 mm clima atlantico
			> 300 mm clima mediterraneo
			> 180 mm clima mediterraneo

### 3.3. Reseña de hechos del sitio de estudio

En Guerrero o México no existen precedentes de la utilización de ninguno de los dos métodos para la aplicación de umbrales de precipitación.

Existe un solo trabajo del deslizamiento de la Pintada Guerrero México. (Garduño *et al.*, 2013), en este no aborda el tema de umbrales.

El mes de septiembre en la historia de los huracanes en México, desde 1949 al 2000, siempre ha presentado un número importante de efectos de huracanes, que finalmente vienen a golpear las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán principalmente (figura. 15) En la (figura 1-a) se observan las trayectorias de los huracanes generados en el Pacífico, en la (figura 1-b) se muestran las zonas de impacto, resaltando los estados de Guerrero, Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit y Sinaloa. (Garduño *et al.*, 2013).

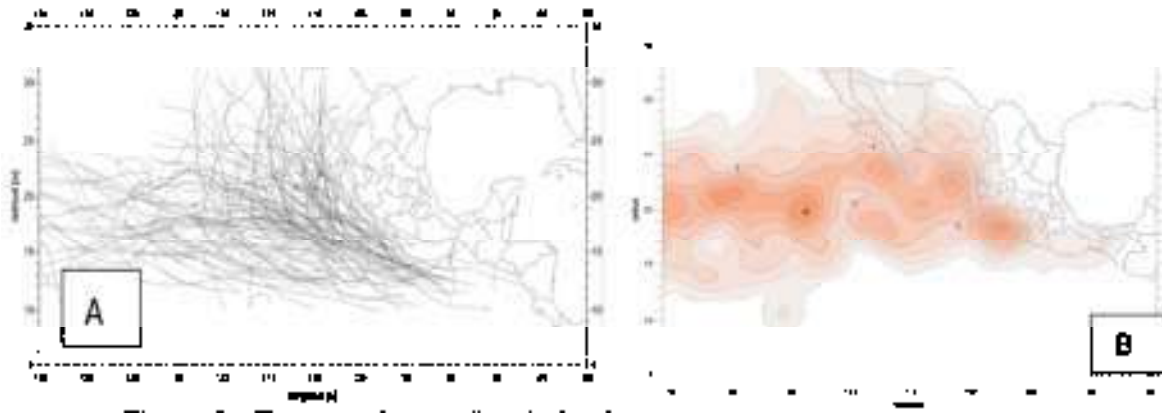


Figura 15 Trayectoria y arribo de los huracanes en el Pacífico desde 1947 al 2000. Tomado de (Garduño *et al.*, 2013).

Por otro lado, el deslizamiento de la pintada se asocia directamente a los ciclones Ingrid en el Golfo de México y Manuel en el Océano Pacífico. (figura 16).

Manuel se originó a partir de un sistema de baja presión al sur de Acapulco el 13 de septiembre, su movimiento ya como ciclón tropical con dirección noroeste en los siguientes días provocó, simultáneamente con el Huracán Ingrid en el Golfo de México, fuertes lluvias e, inundaciones en gran parte del territorio mexicano,

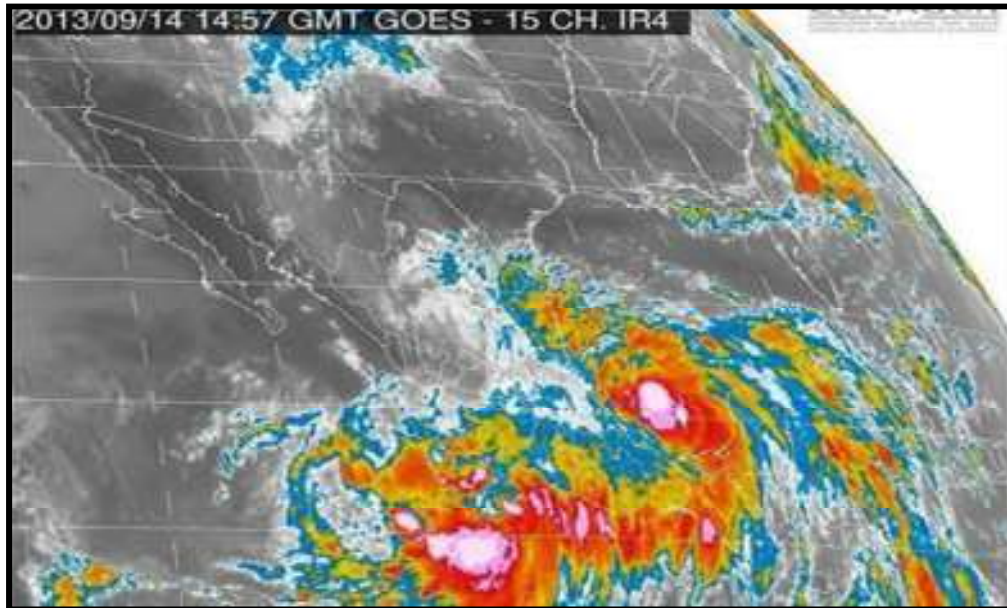


Figura 16 Foto satelital de Comisión Nacional del Agua del día 14 de septiembre del 2013.  
Tomada de CNA.

La distribución de la precipitación en la República Mexicana. En la (figura 17) se observa que sobresalen los estados de Guerrero y de Oaxaca como algunos de los estados del Pacífico con la mayor cantidad de precipitación anual superando los 1000 mm/año.

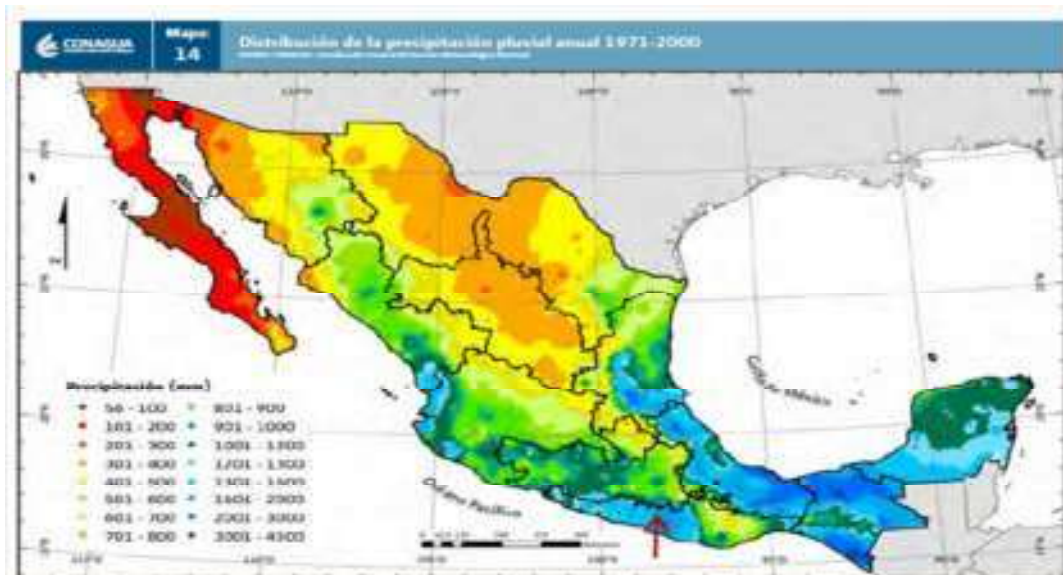


Figura. 17 Precipitaciones anuales más importantes en México. Tomado de (Garduño *et al.*, 2013).

De estos antecedentes se desprende que el estado de Guerrero es una porción de la República donde mayormente se presenta eventos meteóricos extraordinarios, ya que a esa altura del Océano Pacífico se forman estos fenómenos y que vienen a golpear sus costas con mayor frecuencia. (Garduño *et al.*, 2013).

## Capítulo 4. AREA DE ESTUDIO

### 4.1 Ubicación

El poblado de La Pintada, nombre que recibe de una roca de más de tres metros de diámetro en el que se encuentran inscritos varios petroglifos, se encuentra localizado al noroeste del municipio de Atoyac de Álvarez, Gro. Enclavado en la Sierra Madre del Sur, sus coordenadas geográficas son **17°20'48"N 100°10'02"O** y **altitud de 1073 msnm**. Su acceso es limitado sólo por una carretera de orden federal por la comunidad de El Paraíso municipio de Atoyac de Álvarez. La ciudad más cercana e importante está a 175 km. al noroeste y es la ciudad de Acapulco de Juárez, Gro. (figura. 18.1).



Figura. 18 Petroglifos en la localidad de La Pintada Gro. Cortesía de Mc. Nancy Alanís.





Figura. 18.1 Localización del deslizamiento de La Pintada Gro.

La población total de La Pintada es de 562 personas, de las cuales 282 son masculinos y 280 femeninas. INEGI

#### 4.2 Clima

El sur de Guerrero presenta un clima dominante del tipo Aw, Cálido subhúmedo, con temperatura media anual mayor de 22°C y del mes más frío mayor de 18°C; y precipitación del mes más seco menor de 60 mm, lluvias de verano, y lluvias invernales del 5 al 10.2 % del total anual. Se presentan 3 subtipos: Aw0, Aw1 y Aw2, que se diferencian entre sí por la cantidad de precipitación pluvial de verano medido por el índice P/T: menor de 43.2 en el subtipo Aw0, entre 43.2 y 55.3 en el subtipo Aw1, y mayor de 55.3 en el subtipo Aw2. (CONABIO 1998).



### 4.3 Edafología

De acuerdo con la cartografía de INEGI 2016, es posible encontrar 6 tipos de suelos, regosoles (R), litosoles (I) y feozems (H), que en conjunto cubren alrededor del 90% de la superficie. En particular, se reportan los subtipos regosoles eútricos (Re) y feozems húmicos (Hh). Los regosoles y los litosoles son los suelos más abundantes en el estado de Guerrero (GEG 2009). El régimen de humedad del suelo es xérico, con 90 a 180 días de humedad al año (Maples-Vermeersch 1992).

### 4.4 Hidrología

El estado de Guerrero cuenta con tres regiones hidrológicas. Balsas, Costa Grande y Costa Chica. La pintada se encuentra totalmente comprendida en la Región Hidrológica Costa Grande de Guerrero, siendo esta una franja paralela a la costa que transcurre entre el municipio La Unión de Isidoro Montes de Oca y el de Acapulco de Juárez. La Costa Grande de Guerrero está formada por 3 cuencas hidrológicas; en particular, la superficie pertenece a la denominada Río Atoyac y otros. Dentro de la cual se encuentran las sub cuencas Bahía de Acapulco, Río La Sabana, Laguna de Tres Palos y Río Coyuca, siendo las dos primeras las de mayor importancia por su extensión.

### 4.5 Geología

La Geología de la zona está integrada por cinco litologías principales: Rocas metamórficas, Rocas intrusivas granitos y granodioritas, antiguos depósitos de inestabilidad de ladera (Paleoderrumbes), suelos (limos arenosos y limos arcillosos) y depósitos fluviales (boleos y arenas) (figura. 19)

Las rocas metamórficas e intrusivas tienen un color oscuro brillante con algunas estructuras esquistosas y de gneis, algunas instrucciones de fragmentos de rocas graníticas (Garduño *et al.*, 2013).

En lo alto de la localidad se observan contactos de la roca metamórfica con rocas intrusivas donde se observan granitos y granodioritas de color blanco.

Se observan antiguos depósitos de paleo derrumbes cubriendo las rocas metamórficas y graníticas en el cual se ven bloques redondeados y con grandes diámetros, ellos son visibles en dos escalones, uno en el que hizo cambiar la velocidad del derrumbe actual y el otro se observó en los costados de la calle principal (figura. 19)



Figura. 19 Geología local. Fotos Dr. Víctor Manuel Hernández fuente directa.

Los suelos que le sobre yacen a las rocas metamórficas e intrusivas, son estratos variables que van desde los diez metros a terminar en seis para la arena limosa de la parte superficial; y subyaciendo un espesor promedio de seis metros, se encuentra una arena arcillosa. Las propiedades de estos materiales se verán en el capítulo de resultados donde se exponen todas las características físicas y mecánicas. Las (figuras. 20 y 21). Muestran los depósitos de paleoderrumbes y un corte del deslizamiento.



Figura. 20 Depósito de paleoderrumbes, Foto Dr. Víctor Manuel Hernández. Fuente directa



Figura. 21 Suelos que componen el macizo deslizado, Foto Dr. Víctor Manuel Hernández. Fuente directa

#### 4.6 Provincia fisiográfica y geomorfología local

**Sierra Madre del Sur.** Corre de noroeste a sureste paralelamente y muy próxima a la costa del Océano Pacífico, desde Jalisco hasta el Istmo de Tehuantepec. Su continuidad se interrumpe por los valles de una serie de ríos, y sus alturas son muy variables, aunque generalmente se mantienen por encima de 1.000 m. Las elevaciones máximas se localizan en Oaxaca y en Guerrero; en este último estado domina el Cerro Teotepec con aproximadamente 3.400 m de altitud. En Jalisco y en Colima la Sierra Madre del Sur

confluye con el Eje volcánico Transversal. Estos dos sistemas también se enlazan a través de las importantes montañas del norte de Oaxaca y del sureste de Puebla (figura.22).

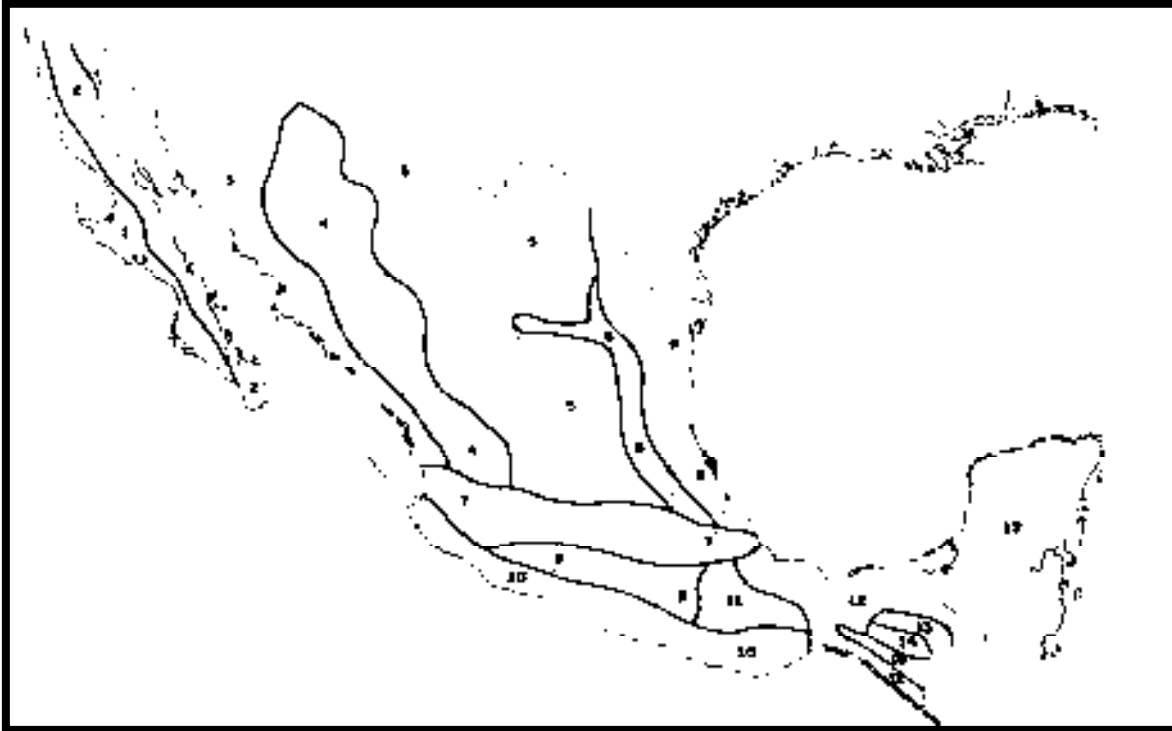


Figura 22 Esquema de las principales provincias fisiográficas de México; 1. Planicie Costera de Baja California, 2. Sistema montañoso de Baja California, 3. Planicie Costera Noroccidental, 4. Sierra Madre Occidental, 5. Altiplano Mexicano, 6. Sierra Madre Oriental, 7. Eje Volcánico Transversal, 8. Planicie Costera Nororiental, 9. Depresión del Balsas, 10. Sierra Madre del Sur, 11. Sistema montañoso del norte de Oaxaca, 12. Planicie Costera Suroriental, 13. Macizo Central de Chiapas, 14. Depresión Central de Chiapas, 15. Sierra Madre de Chiapas. (Tomada de INEGI 2000).

**Algunos aspectos morfológicos.** En cuanto al modelado del paisaje caben las siguientes observaciones generales. Se encuentra en la Sierra Madre sur, una sierra compleja baja, cerros aislados y en la cima de ella que es variable desde los 1250 a los 1190 m.s.n.m.se aloja La Pintada. En la llanura vertiente del arroyo La Pintada está a 1075 m.s.n.m. constituyendo una meseta la estructura resultante de plegamientos y una falla inactiva (Figura.23) que no afectan la localidad. El tipo de roca que van desde el terciario con un 80.23 % al Jurásico con 6.85 % y en su mayoría rocas ígneas intrusivas granito granodiorita

de 36.5 M.a (Dante, 2000) y con incrustaciones de rocas metamórficas 25.3 M.a. tipo gneis, el clima contribuye a su vez, a través de los agentes erosivos, a su modelado definitivo pliegues desvanecidos, que presenta muchas variantes, alrededor del cerro de La Cruz se encuentran rasgos de antiguos paleo-deslizamientos.

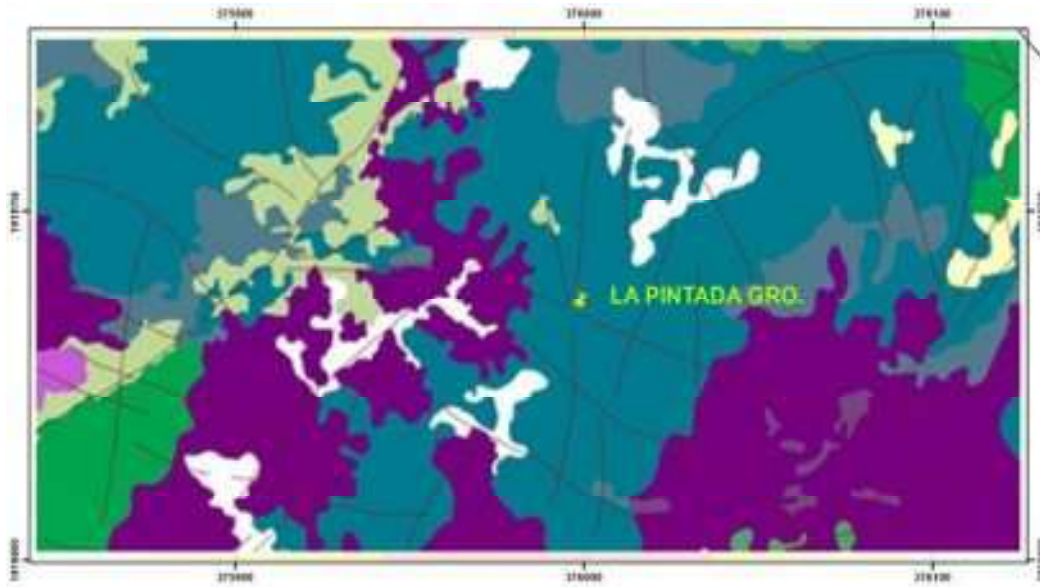


Figura. 23 Fallas cercanas a la comunidad de la Pintada. Foto imagen (INEGI 2016).

## Capítulo 5. METODOLOGIA Y MÉTODOS

### 5.1 Trabajo de gabinete

El trabajo se inició con la recopilación de datos bibliográficos y cartográficos, relacionados con la temática de los procesos de remoción en masa, umbrales de precipitación y el Deslizamiento de La Pintada, Gro; todo ello para poder plantear el problema en varios sub temas más fáciles de abordar. Así mismo se desconocía completamente cual era la ubicación exacta de la comunidad de La Pintada Guerrero, México, por lo que nos dimos a la tarea de ubicar el lugar con cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) a escala 1:250000, y el *Google Earth*. Así como cartas geológicas del sistema geológico mexicano a escala 1:250000 y planear una estrategia de trabajo de campo.

### 5.2. Trabajo de Campo

Los objetivos de un modelo de simulación dependen del interés y necesidades del lugar en estudio, para lograrlos se necesita definir concretamente el o los alcances, e intereses a solucionar. Además de visitas de campo al sitio de interés, en caso de no contar con información será necesario hacer el planteamiento de necesidades de datos para obtenerlos de campo.

Se realizó una salida de inspección al sitio recorriéndolo y anotando características especiales, así como algunos comentarios de los habitantes, que nos dieron un relato detallado de cómo sucedió el evento desde su punto de vista en el día del siniestro y días anteriores, así como algunas observaciones valiosas para entender el comportamiento del deslizamiento.

La resolución de problemas de mecánica de suelos supone que se debe tener conocimiento mínimo de las características y las propiedades del suelo, por eso es necesario realizar procesos sistemáticos y adecuados, bajo normas establecidas como las normas ASTM mundialmente conocidas para la obtención de características y propiedades de un suelo.

La investigación en laboratorio es de suma importancia, ya que ahí, se llevan a cabo las pruebas de rutina, patrones conforme a las prácticas **estándares** de muestreo de suelos, debemos de llevar a cabo la extracción de muestras de tipo alterado e inalterado (ASTM D-1452, ASTM D-1586, ASTM D-1587), en un número mínimo o máximo según sea la referencia de estudio (ASTM D3740). Posteriormente se realizaron prácticas **estándares** recomendadas para la identificación y descripción de suelos (procedimiento visual-manual) por la (ASTM D 2488-75).

Se realizó un muestreo de los estratos encontrados en el lugar y que eran visibles todavía recolectando muestras para traer al laboratorio y realizar sus pruebas correspondientes, además de realizar mediciones de resistencia con el penetrómetro de bolsillo y con la veleta de torsión, se etiquetó e identificó cada muestra para su transporte y posterior trabajo en el laboratorio.

En esta salida a campo se realizó: reconocimiento del área de estudio en donde se vio desde diferentes puntos el deslizamiento, identificación de litologías afectadas encontrando las óptimas para el muestreo de las capas que conformaban la pendiente y levantamiento de la columna estratigráfica en dos puntos de referencia, la obtención de muestras alteradas, pruebas mecánicas in situ, reconocimiento del tipo de proceso de remoción en masa, identificación de la geometría de la ladera, e identificación a priori de factores condicionantes.



### 5.3 Trabajo de Laboratorio

#### 5.3.1 Pruebas físicas

Posteriormente se realizó la clasificación del terreno natural para compararlo con la clasificación de materiales de suelos, de acuerdo con las normas ASTM D 422. Un dato muy importante fue la determinación de la humedad natural o contenido de agua, de las muestras, que lo define la norma ASTM D 95, una vez realizado este procedimiento se realizó la prueba de Granulometría por tamizado e higrómetro D 422 y D 1140, en la que se determinaron el tamaño del suelo expresado en porcentajes y posteriormente se determinó su distribución por tamaño, de acuerdo con las normas ASTM C 136 y C 117.

Para determinar sus límites de consistencia se procedió a secar los suelos conforme a la norma ASTM D 4318-84, (figura. 24).

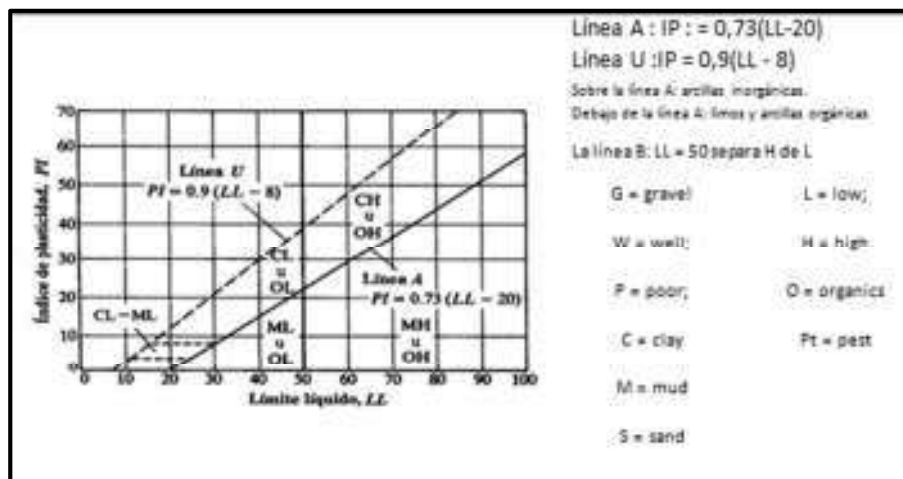


Figura. 24 Carta de plasticidad de Arturo Casagrande.

La densidad de los granos es un parámetro que no sólo funciona como una propiedad índice sino que también interviene dentro de los cálculos para la determinación de las propiedades mecánicas como en el caso de la compresibilidad de los suelos, densidad de solidos ASTM C127-15.



### 5.3.2 Pruebas Mecánicas

Entre estos se pueden citar la resistencia a la compresión uniaxial ASTM D 2166 06, que nos da el esfuerzo cortante directo en un suelo sin tomar en cuenta la presión de confinamiento. Triaxial rápida no consolidada y no drenada (**UU**) ASTM D 2850 03ª (2007), para la obtención del ángulo de fricción interna ( $\Phi$ ) y la cohesión (**c**). Y la Consolidación unidimensional ASTM D 2435-80 con el que obtendremos el coeficiente de consolidación (**mv**) y la permeabilidad (**k**) que se necesitan para nuestro modelo computacional.

### 5.4 Geotecnia saturada, caracterización de los materiales físicos y mecánicas

Se realizaron los cálculos correspondientes a las propiedades físicas en la que se obtuvo clasificación del material y sus índices de plasticidad como son el límite líquido, índice plástico e índice de plasticidad, así como contracción lineal e índice de liquidez, su densidad de sólidos o gravedad específica, que se necesita para calcular la consolidación unidimensional.

Los cálculos correspondientes para la obtención de compresión simple, para obtener la cohesión aparente solo como referencia y del mismo modo se realizó lo correspondiente a la prueba de triaxial rápida no consolidada y no drenada (**uu**) para la obtención de los círculos de *Mohr* gráficamente para determinar los ángulos de fricción interna correspondientes a cada estrato, así como su cohesión.

### 5.5 Insumos del programa Geoslope v 2007

Datos que se requieren para correr el modelo de investigación de caso de estudio y la necesidad de parámetros para la alimentación del programa; los necesarios son:

Angulo de fricción interna, la cohesión, peso volumétrico del material, la permeabilidad, el coeficiente de compresibilidad volumétrica y las curvas de contenido volumétrico de agua y las curvas de succión de cada suelo incluso de la roca del último estrato.

### 5.6 Geotecnia insaturada

Se obtuvieron los datos correspondientes a las curvas de contenido volumétrico de agua y de las curvas de succión de cada material encontrando que se podía realizar ciertas correlaciones con el material de la mecánica de suelos saturados, por lo que se realizaron los trabajos correspondientes y poder obtener las curvas necesarias.

### 5.7 Diseño del modelo e ingreso de datos

Se realizó el modelo partiendo de un corte litológico a escala, en el cual se ejecutó también el perfil de los estratos del suelo y la roca, se consideró que el tercer estrato por pruebas de sondeos eléctricos de (Garduño et al., 2013) se vio que era roca sana por lo cual se dejó como un estrato muy grande para lograr el modelo se realizaron 72 puntos de referencia (inicialmente eran 52).

El ingreso de datos se fue realizando por estrato en el programa de *slope/w* donde se ingresaron datos de cohesión, ángulo de fricción interna, peso volumétrico y se efectuó una imagen en *seep/w* en la que se ingresaron los datos curvas de succión y de contenido volumétrico de agua. Este proceso se repitió tres veces para los suelos estudiados sus características están en resultados.

Como ya se dijo se utilizaron tres materiales cuyas características ya se mostraron, el método que se utilizó es el de Morgenstern y Price. El programa *Geoslope slope/w* se puede ligar e interactuar con los datos obtenidos en el programa *Geoslope seep/w* el cual calcula las propiedades de presión de poro en agua y succión en los diferentes intervalos

de tiempo del análisis, por lo que es necesario primero calcular, la infiltración en el tiempo en forma transitoria, es decir el gasto de agua en el suelo de entrada, es diferente al de salida. Las propiedades hidráulicas repercuten directamente, sobre la estabilidad del talud que se ve influenciado el factor de seguridad del talud, la presión de poro, así como la succión cambian, en el trayecto de entrada y salida del agua. En función de su permeabilidad tienen influencia directa.

Por otro lado el programa *slope/w* puede dar sólo el valor final del factor de seguridad o en variaciones de tiempo preestablecidas con la finalidad de llevar un seguimiento en la evolución de factor de seguridad contra el tiempo, de dicho análisis resultó una gráfica de factor de seguridad vs tiempo más adelante se conocerá.

En este modelo se requirió realizar las condiciones de frontera que se utilizaron y son algunas predefinidas, se pueden poner entre las intercepciones de cada punto graficado y se pueden cambiar las veces que sean necesarias, se colocó un valor inicial de lluvia y se predefinieron para poder realizar la primer corrida.

Se reevaluó (calibración) las gráficas y se obtuvieron resultados satisfactorios pero se requirió de aproximadamente diez (10) corridas para que dieran mejores resultados. El problema fundamental del modelo fue encontrar las condiciones de frontera adecuadas para que nos diera resultados congruentes en este proceso; se realizaron aproximadamente 140 procesos y cinco (5) de ajuste hasta lograr los resultados satisfactorios.

La calibración del modelo se cumplió observando las líneas de flujo que arrojaba el programa y se revisaron para que fueran congruentes con lo que se vio en la visita y de las observaciones anteriores al evento y sobre todo la condición de un flujo constante en la base de la pendiente como escurrimiento constante y las manchas de flujo antes de la base.

Una vez calibrado el modelo computacional se pasó a la etapa de colocar los tiempos de prueba y sus condiciones de lluvia para ese intervalo de tiempo, así como la comprobación de la influencia de la lluvia antecesora realizando para ello, primeramente, los cálculos en forma estacionaria y posteriormente transitoria. Se realizaron 55 procesos, en los que incluía la comprobación del factor de seguridad inicial estacionario comparado con el inicial del transitorio; a este proceso de comparación se le llamo sensibilidad del modelo donde tenía que ser de 0.005 del factor de seguridad para poder ser bueno, y por último tenía que cumplir con que la curva del factor de seguridad debería de ser descendente para poder evaluar si tenía influencia la lluvia.

Como todo fue un proceso cíclico se fueron realizando ajustes en las condiciones de frontera, hasta lograr el ajuste final y se cumplieron parte de los objetivos en que el modelo fuera funcional y que diera resultados congruentes con la realidad observada.

Cumplidas las condiciones propuestas se interpretaron los resultados y determinaron los umbrales obtenidos y la justificación correspondiente; se muestra (figura. 25) la metodología completa.

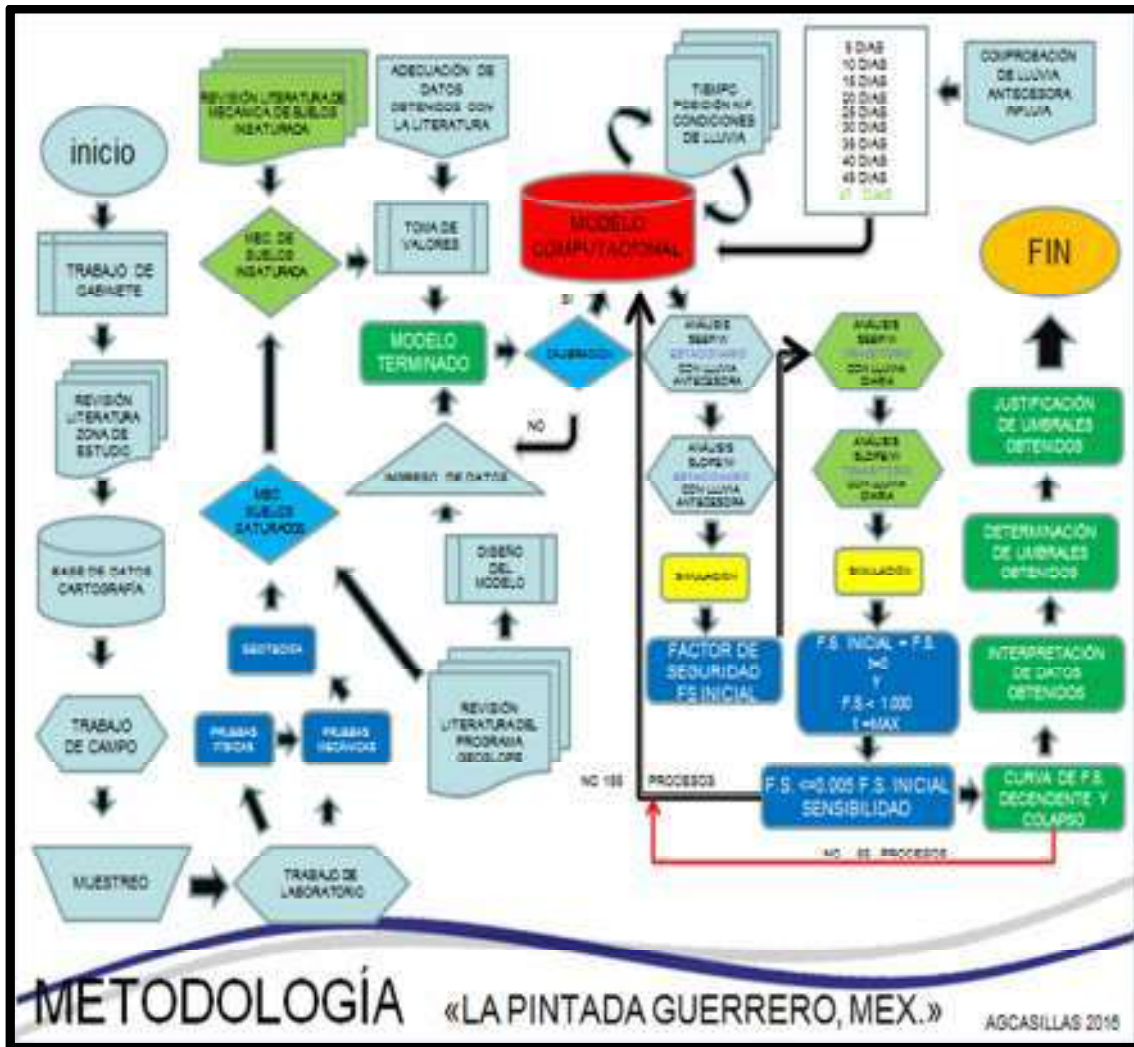


Figura. 25 Metodología de la obtención del umbral de precipitación de La pintada Guerrero, México. Elaboración propia

## Capítulo 6. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en campo, laboratorio y gabinete se presentan a continuación.

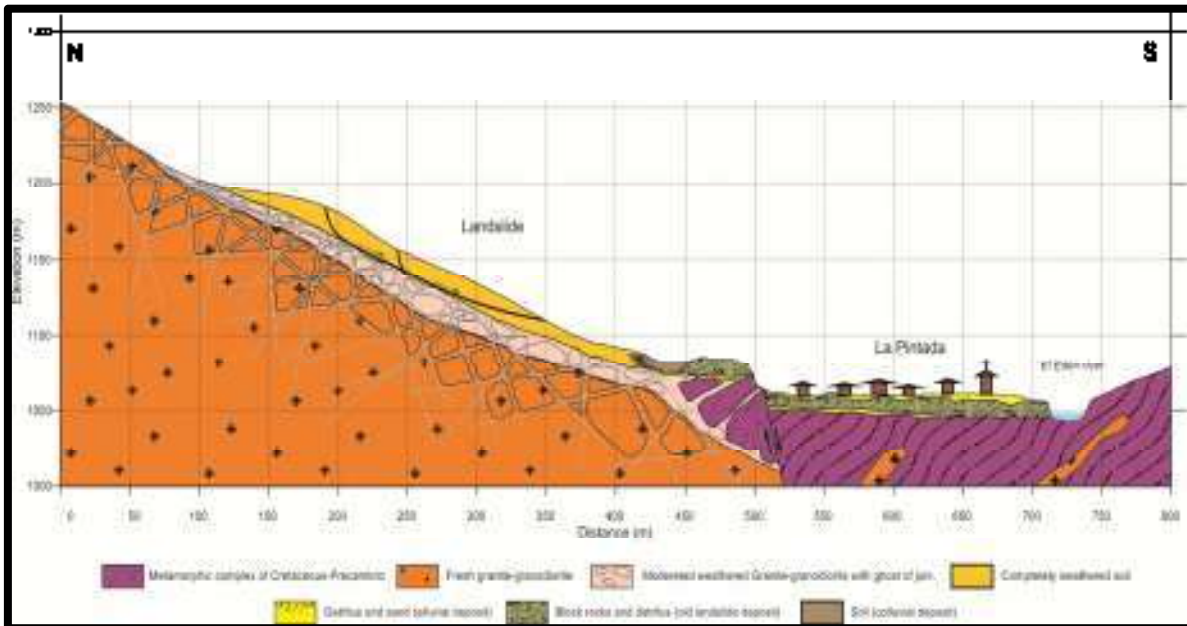


Figura. 26 Perfil litológico del deslizamiento la pintada (V.M. Hernández *et al.*, 2016.)

La (figura 26) es la base de la geometría del modelo numérico utilizado, en ella encontramos diversos componentes que integran la pendiente estudiada y que se describen a continuación de la base a la cima.

### a) Metamórfico

Se trata de rocas de color oscuro con estructura a veces esquistosa a veces de gneis, también se observan fragmentos deformados de rocas graníticas, todo sumamente fracturados y con micro fallas. (Garduño *et al.*, 2013). El tipo de roca metamórfica según (Dante, 2000) es tonalita con una edad de  $28.3 \pm 0.6$  M.a. Material fechado biotita WR datada por el método de Rb-Sr.

Entre el contacto de la roca metamórfica con el granito presenta una falla normal derecha que corta la base de la ladera y subduce la planicie de plataforma que forma el poblado de la Pintada.

b) Granito

El granito es de color blanco con manchas en color oscuro producto de biotita, hornblenda, feldespatos potásicos en la profundidad presenta poca alteración y conforme llega a la superficie presenta intemperismo. El tipo de roca ígnea intrusiva según (Dante, 2000) es granodiorita con una edad de  $35 \pm 0.9$  M.a. material fechado zircones datada por el método de U-Pb.

c) Depósitos coluviales o de antiguos deslizamientos

Cubriendo tanto a las rocas metamórficas como a las rocas graníticas se observaron depósitos de un antiguo derrumbe, formado por bloques redondeados y con grandes diámetros y sub redondeados, El bloque que contiene los petroglifos son parte de este antiguo derrumbe. Ellos son visibles en dos escalones, uno que hizo cambiar la velocidad del gran derrumbe y otro que se observó en los costados de lo que fue la calle principal de La Pintada. (Garduño et al., 2013).

d) Granito moderadamente intemperizado

El derrumbe de La Pintada permite observar que los suelos color ocre se formaron por la alteración tanto de rocas graníticas como de aquellas metamórficas. También son visibles en todos los cursos de los ríos y arroyos que fluyen cerca de la población. (Garduño *et al.* 2013). La fracción fina menor a 1" se clasificó como arena arcillosa con un espesor promedio de 20 metros en este estrato se encuentran fragmentos de roca intemperizada de granodiorita.

e) Granito altamente intemperizado o suelo residual

La cual está formada por un estrato de suelo de 14.0 m. en promedio de arena limosa que es la unidad afectada por el deslizamiento su caracterización se presenta adelante.

El muestreo se realizó como se observa en la (figura 27) ubica los puntos de muestreo para caracterizar los estratos encontrados en la ladera.



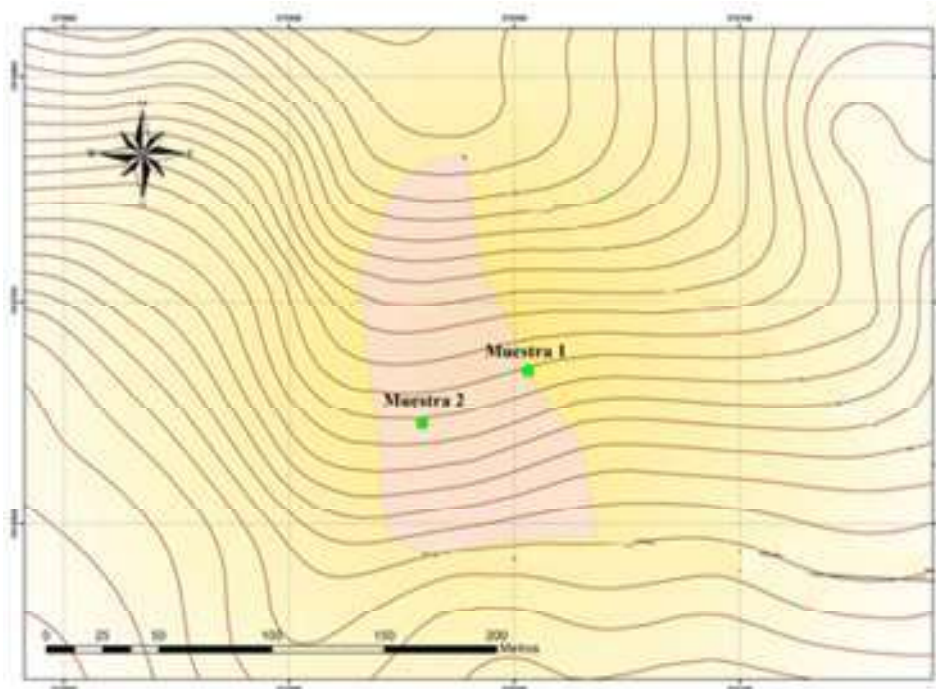


Figura. 27 Ubicación de los puntos de muestreo.

El perfil estratigráfico de la (figura 28) evidencia la homogeneidad de la ladera; básicamente compuesta por una capa de dos estratos de suelos, el primero con un espesor promedio de 14 m de una arena limosa de textura granular fina, color café claro miel, resistencia con el penetrómetro de bolsillo de  $0.75 \text{ Kg/cm}^2$  y resistencia con la veleta de  $0.50 \text{ N/cm}^2$ .

Y el segundo estrato con un espesor promedio de 20.0 m. superficialmente compuesto de una arena arcillosa color café oscuro, los primeros cinco metros con resistencia con el penetrómetro de bolsillo de  $0.50 \text{ Kg/cm}^2$  y con la veleta de  $0.25 \text{ N/cm}^2$ . Posteriormente está compuesto de fragmentos de roca granodiorita intemperizada en tamaños que varían desde 2" hasta 1.0 m. la estratigrafía mostrada es la encontrada en los puntos de muestreo los espesores reales de cada estrato están en el modelo litológico.



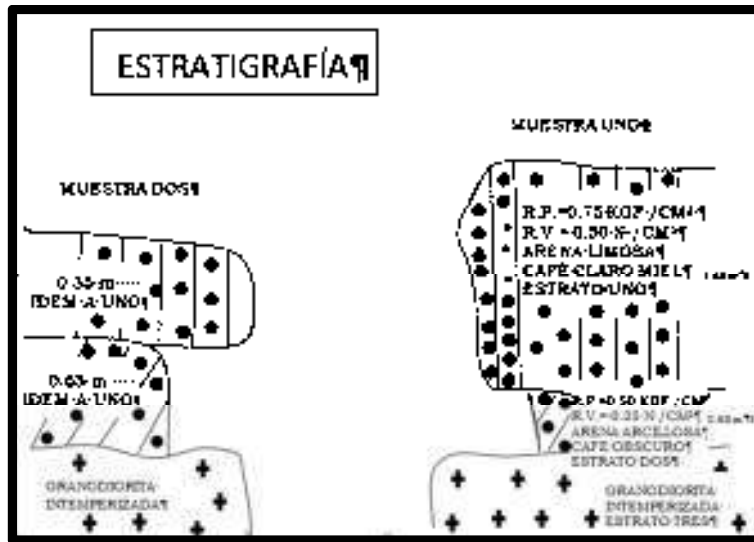


Figura. 28 Estratigrafía de los puntos muestreados del deslizamiento la Pintada Guerrero, México.

La caracterización físico-mecánica de las unidades afectadas por el deslizamiento se presenta en las tablas 5 y 6.

Tabla 5 Resumen de Pruebas Físicas del deslizamiento la pintada.

PROPIEDADES DEL SUELO	Estrato 1	Estrato 2	Roca
% Grava	0	0	
% Arena	59.2	65.5	
% limo	30	22.5	
% Arcilla	10.8	12	
% L. Líquido	40.6	51.1	
% L. Plástico	25.5	21.2	
% I. Plástico	15.1	29.9	
% de contracción lineal	5.5	10.38	
% contracción volumétrica	17.5	24.39	
% de humedad natural	17.6	19.3	
Índice de liquidéz	0.51	0.1	
SUCS	SM	SC	
Roca			Granodiorita
P.V.S. en KN/m	12.6	12.95	
% de Contenido de humedad	17.6	19.3	
Densidad de sólidos	2.32	2.39	

Las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo y roca utilizadas para la elaboración del modelo numérico en los programas SEEP/w Y SLOPE/w, se muestran en las tablas 6 y 7

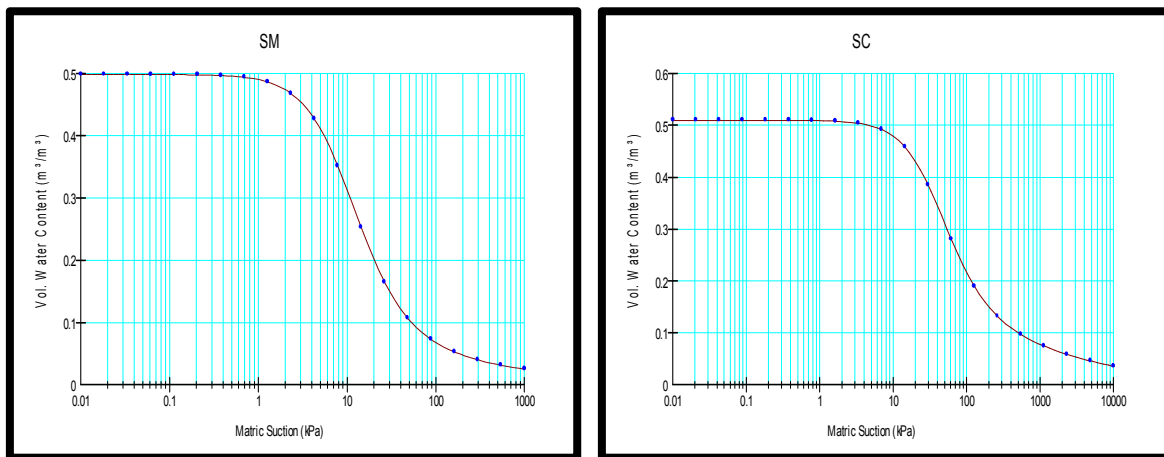
Tabla 6 Propiedades mecánicas de las litologías involucradas en el deslizamiento La Pintada Guerrero México.

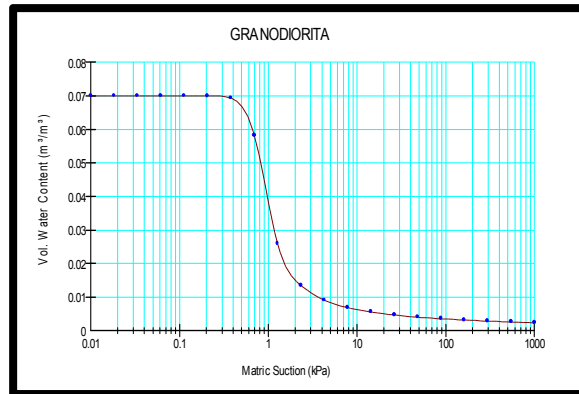
PROPIEDADES DEL SUELO	Estrato 1	Estrato 2	Roca
P.V.H. en KN/m	17.02	17.42	30
Angulo de fricción interna en grados	10.13°	35°	45°
Cohesión en kpa	13.09	123.71	55000

Tabla 7 Propiedades hidráulicas de las mismas unidades litológicas.

PROPIEDADES DEL SUELO	Estrato 1	Estrato 2	Roca
K saturado	1.3230E-06	6.1979E-06	1.0000E-14
Contenido residual de agua en m3/m3	0.10	0.19	0.10
Contenido de agua saturado en m3/m3	0.4986	0.5100	0.0700
Función estimación de Fredlund and Xing	arena limosa	arena arcillosa	grava

En las figuras 29,30 y 31 se indican las curvas características suelo-agua de las unidades consideradas para el análisis de infiltración; y en la figura 32 la geometría y arreglo litológico del modelo numérico.





Figuras. 29, 30 y 31 Gráficas que se utilizaron en el modelo computacional de contenido volumétrico de agua vs. Succión mátrica (estimaciones por el método de Fredlund y Xing., 1994).

En la realización del modelo se usaron 72 puntos para delinear la geometría de la ladera integrada por tres tipos de material, así como las siguientes consideraciones:

Se realizaron varias pruebas del flujo hidráulico para determinar las condiciones de frontera adecuadas que permitieran la formación de un venero en la parte inferior de la ladera (ver el punto 26 de la figura 33), así como el desarrollo de un flujo con desplazamiento paralelo a la roca de sustrato y que no tuviera infiltración en este. Todo ello congruente con las condiciones observadas en campo.

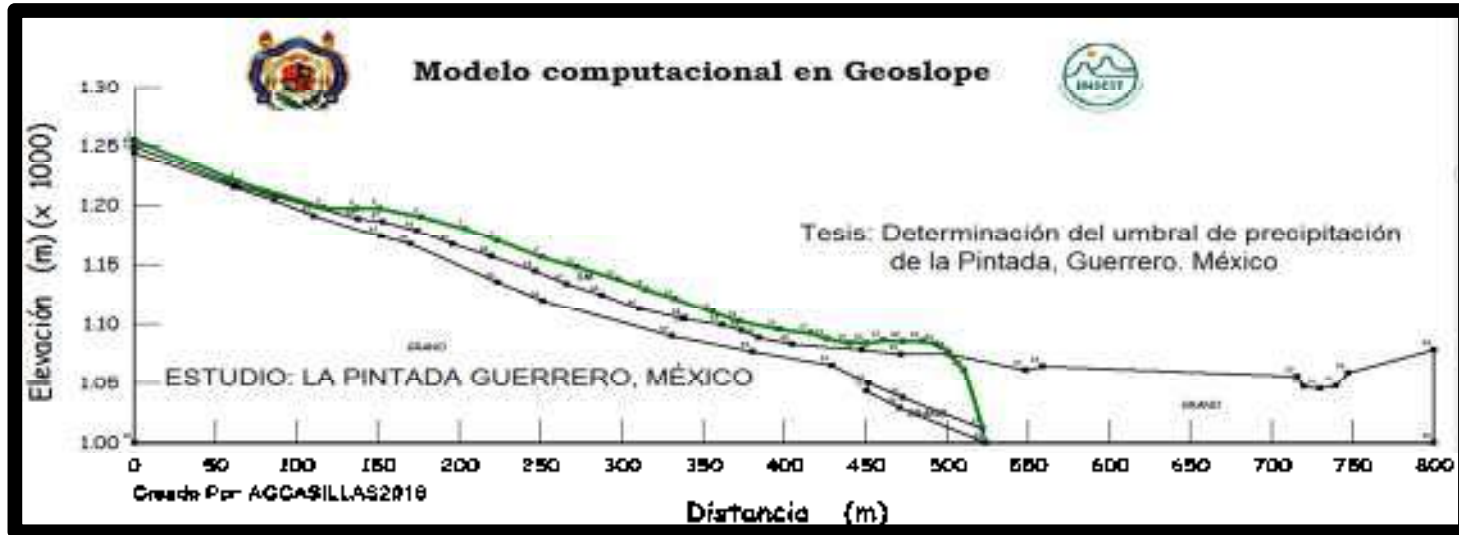


Figura. 32 Modelo computacional en el programa *Geoslope*.

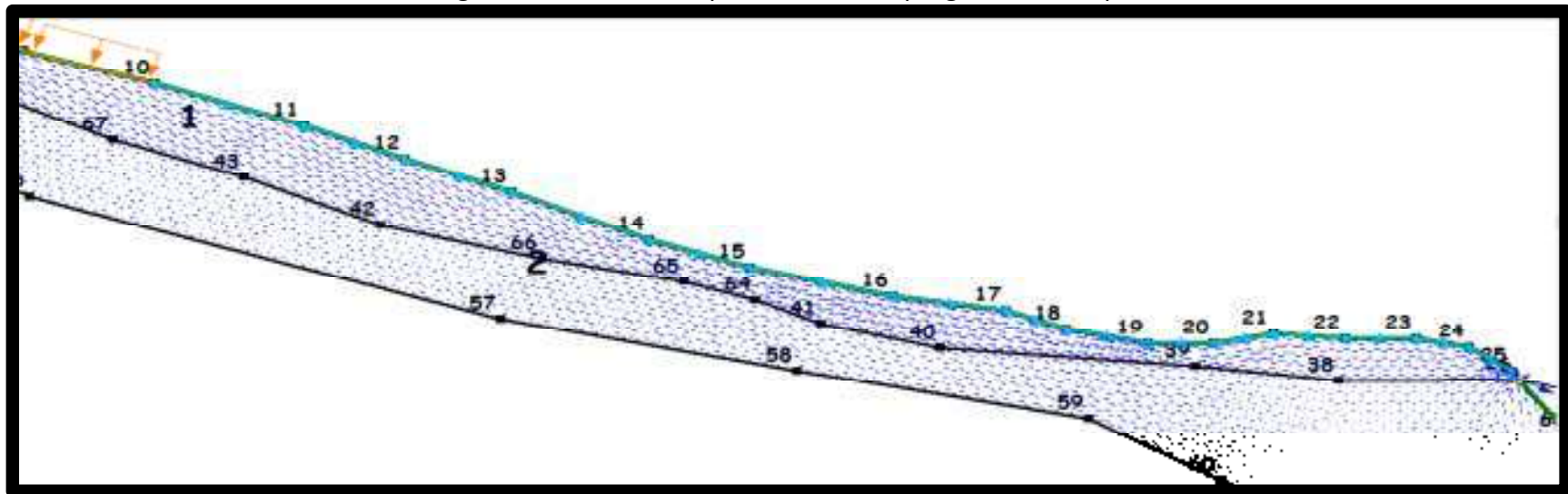


Figura. 33 Modelo computacional del flujo de agua en *Geoslope seep/w*.

Para poder obtener una clara idea de los resultados se subdividió en seis puntos de control cinco para determinar sus propiedades y uno más que sería el mínimo umbral de precipitación.

Periodo de lluvias que se utilizaron en el análisis figura 34.

La condición de frontera de la lluvia es representada por flechas azules indicando hacia abajo. La condición de entrada de lluvia y salida por el mismo punto es por triángulos hacia arriba en color gris, el nivel freático estático en líneas discontinuas en azul, y la condición de veneno en un punto en amarillo (figura. 35).

Las flechas en azul hacia arriba indican puntos de control de volumen de flujo en la figura 35 se observa el modelo terminado y con el cual se llevaron a cabo los cálculos de infiltración de flujo estacionario y transitorio en el tiempo.

El modelo de la (figura 36) es el final que se utilizó en la modelación con slope/w y contiene condiciones de frontera que son las que nos dan la representación del deslizamiento ocurrido, para ello se manejó una frontera en la corona delimitada por flechas rosas inicial de 247 m. a 252 m. final distancia longitudinal y en el pie del deslizamiento de 356 al 361 m. se dejó este margen para que fuera lo más profundo, pero sin llegar al segundo estrato.

La (figura 37) muestra la resolución del problema en estado estacionario se tomó una lluvia de 3.25 mm/día, para la evaluación inicial y tener el punto de partida del factor de seguridad inicial y poder cuantificar la influencia de la lluvia antecesora por medio de comparaciones con el resultado del análisis transitorio en el tiempo, la presión de poro no hay variación ya que se da el resultado en forma instantánea.

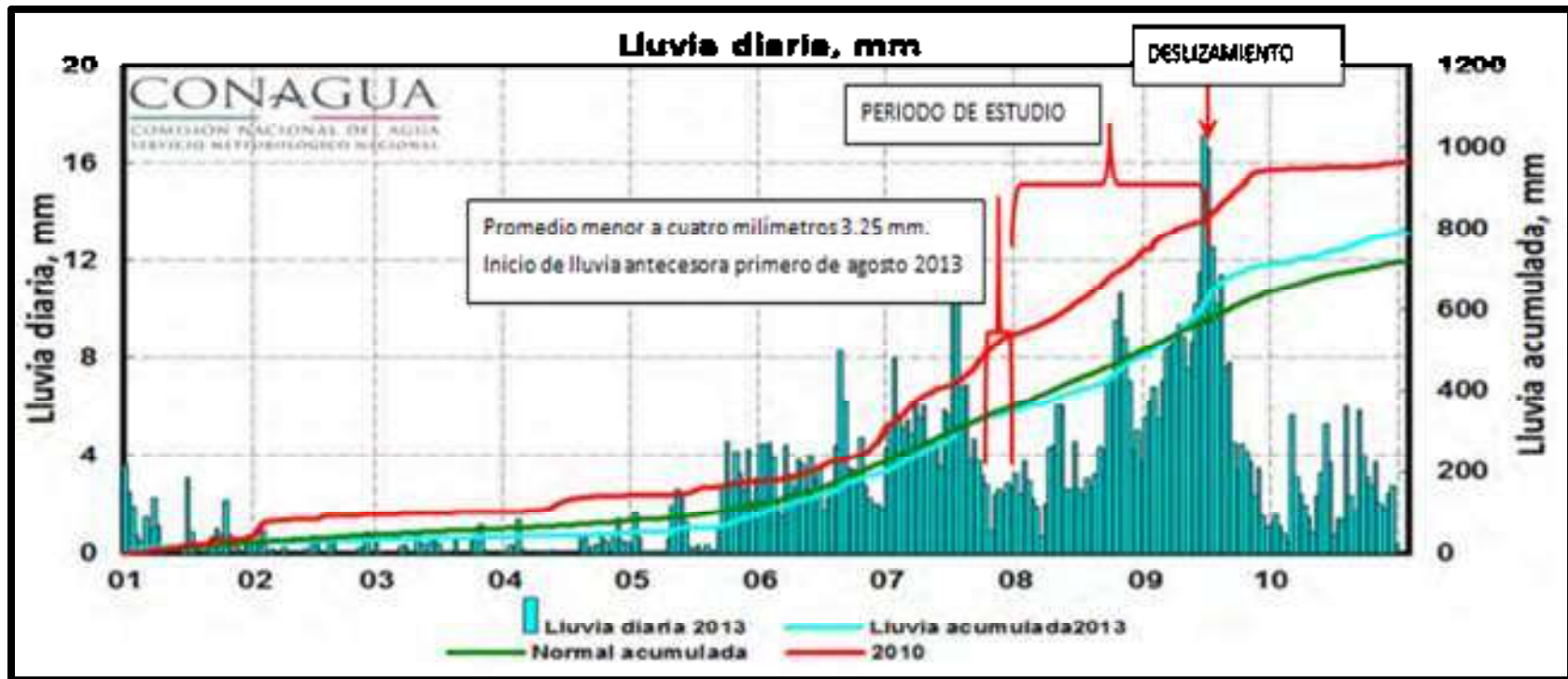


Figura. 34 Lámina de lluvia estimada diaria a nivel nacional. Fuente: sistema de información hidroclimatológica (SIH) de la gerencia de aguas superficiales e Ingeniería de ríos-Conagua.

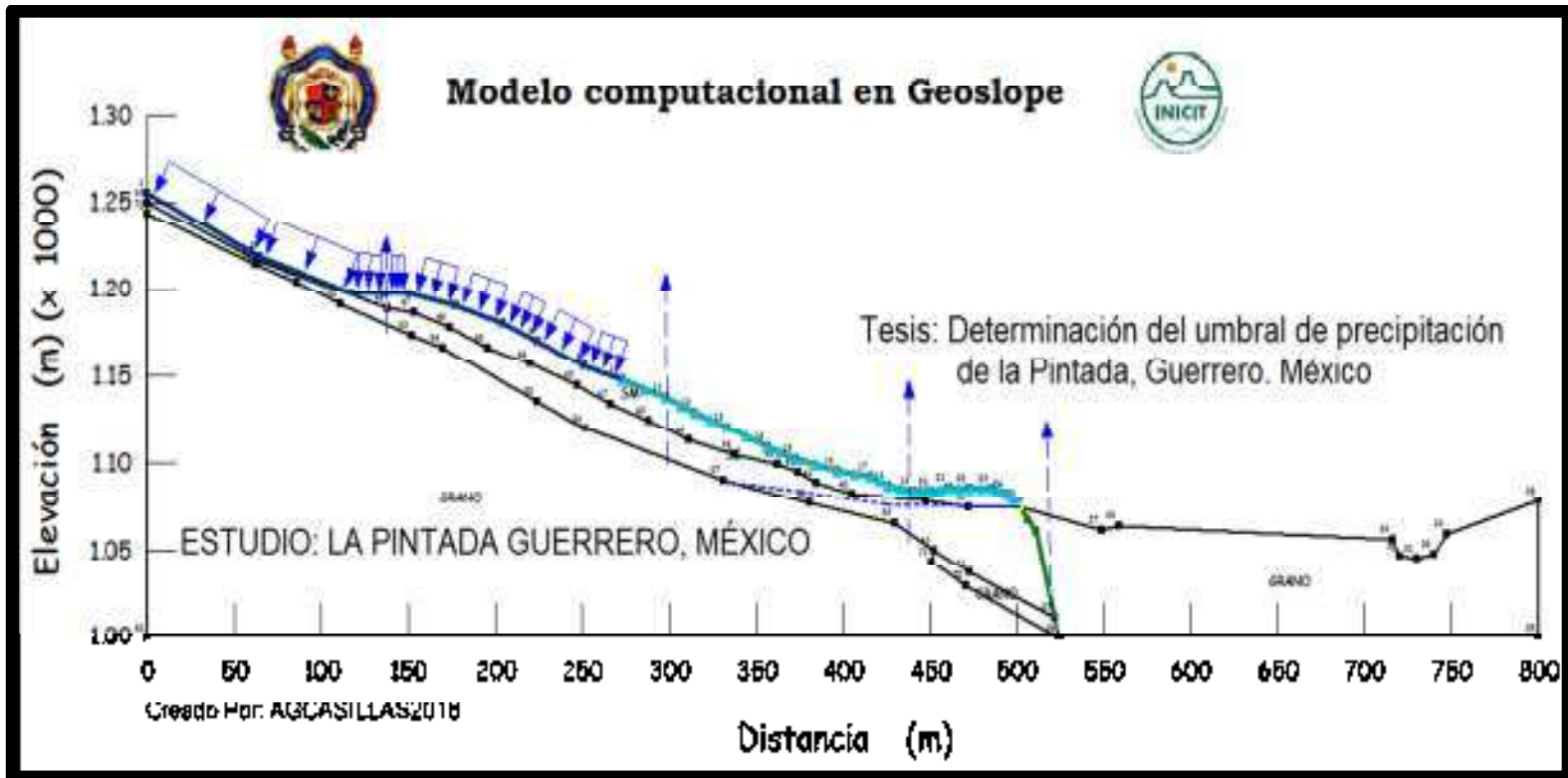


Figura. 35 Modelo computacional en el programa *Geoslope SEEP/W*.

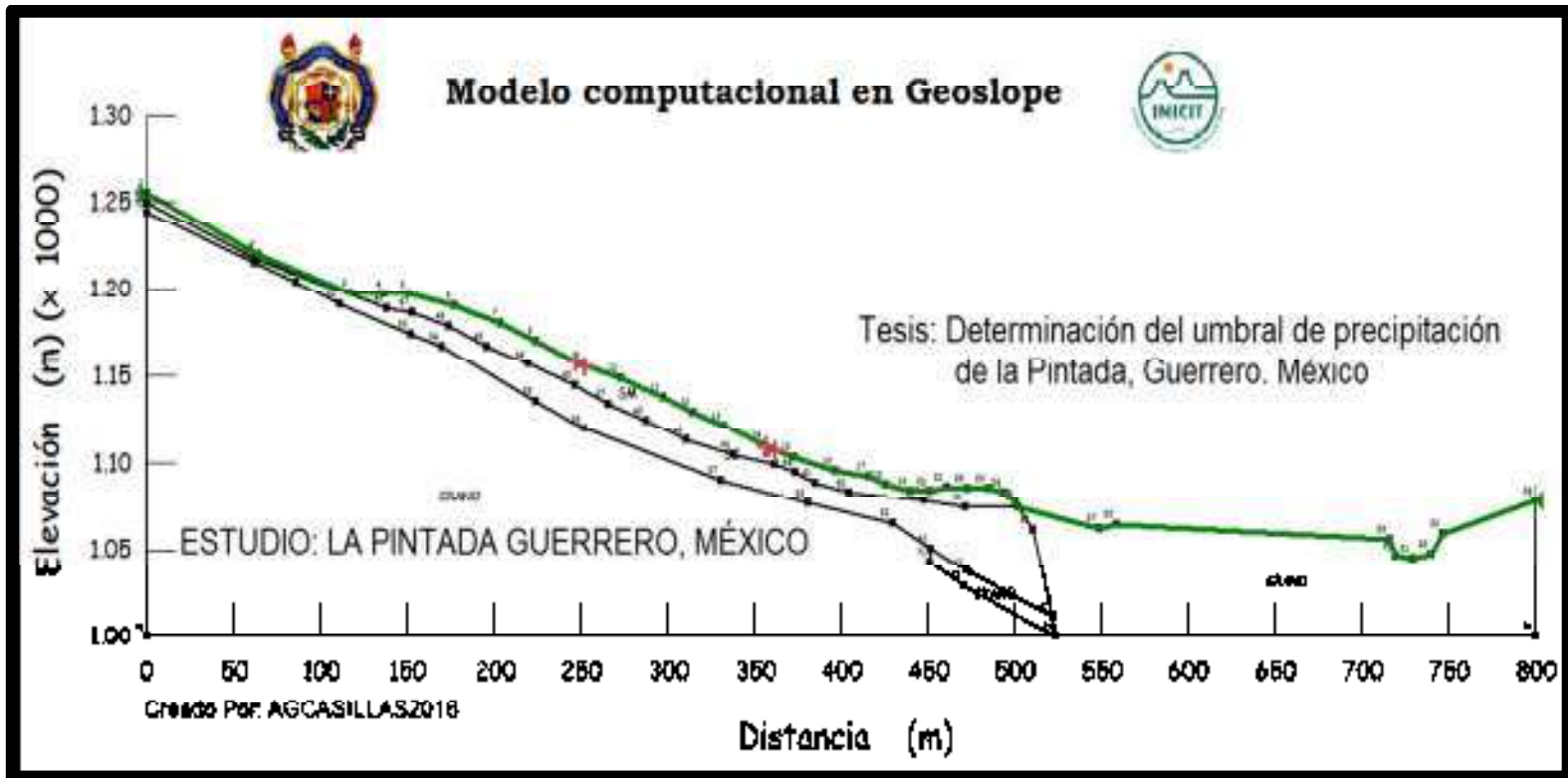


Figura. 36 Modelo computacional en el programa Geoslope Slope/W.



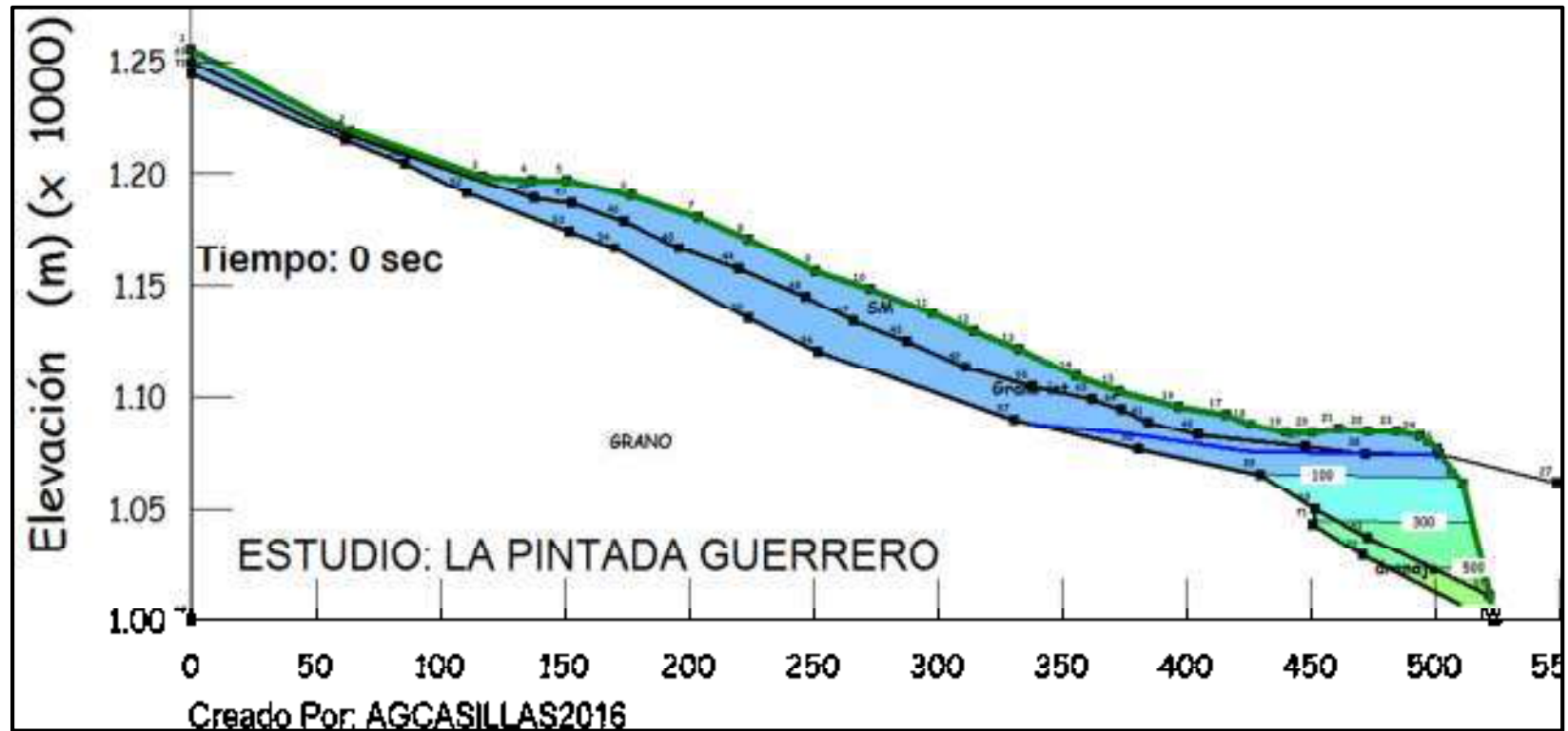


Figura. 37 Programa Geoslope Seep/W (estacionario).

La (figura 38) muestra el resultado del factor de seguridad con la lluvia inicial y es el punto de partida.

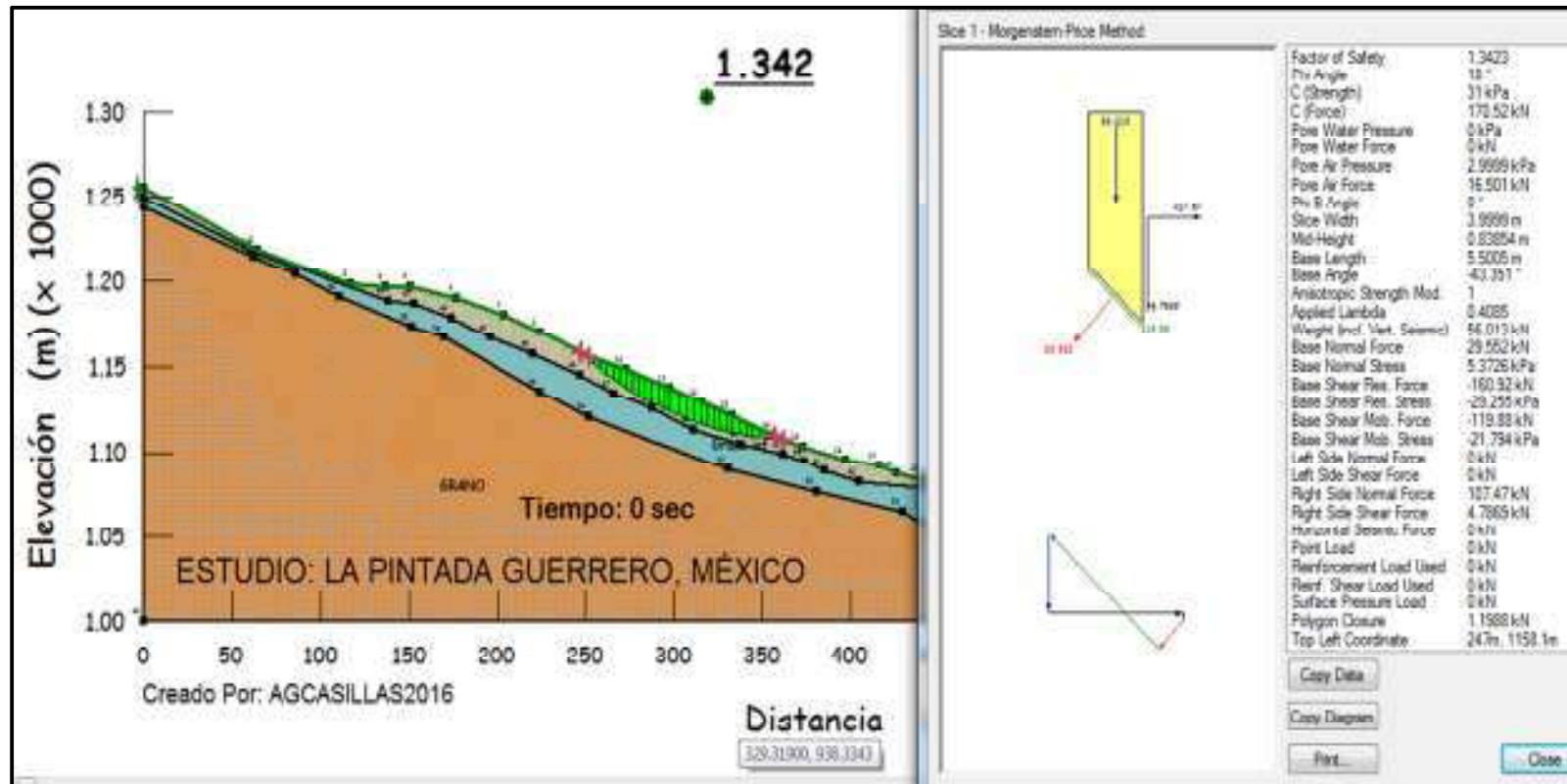


Figura. 38 Programa Geoslope Slope/W (estacionario).

La (figura 39) muestra la distribución y cuantificación de las lluvias utilizadas en el programa seep/w.

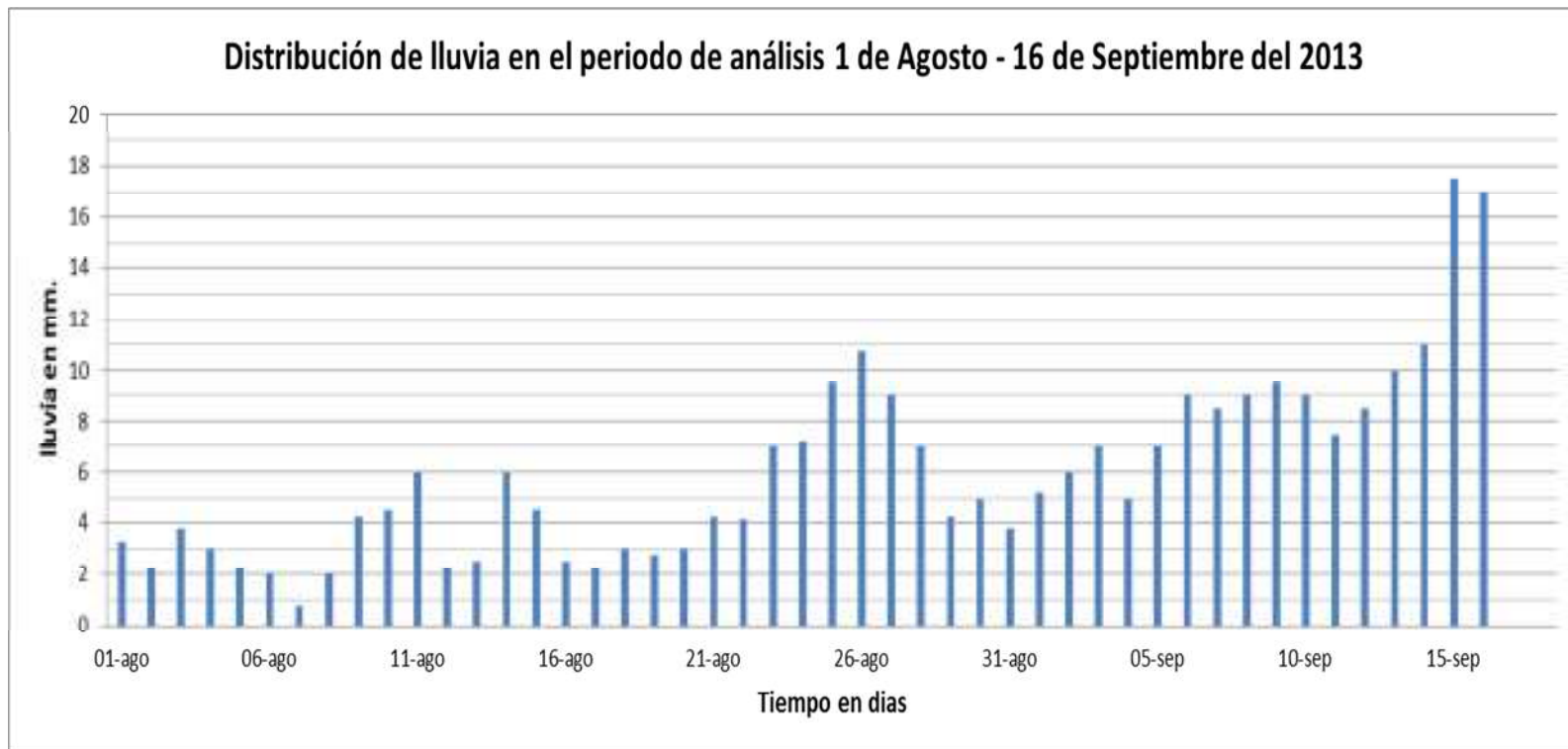


Figura. 39 Distribución de lluvia en los días de análisis para el programa *Geoslope Seep/W* (Transitorio).

Las (figuras 40, 41, 42, 43, y 44) muestran los resultados de la evolución de saturación en el talud y el factor de seguridad.

Obsérvese como la línea azul que representa la línea de saturación o presión cero va descendiendo y la saturación que el suelo está manifestando conforme va pasando el tiempo y es debido a la acción de la lluvia.

En la parte central de la figura se encuentra la línea de nivel freático estático y los niveles de la presión de poro en ese punto no cambia se mantiene estático.

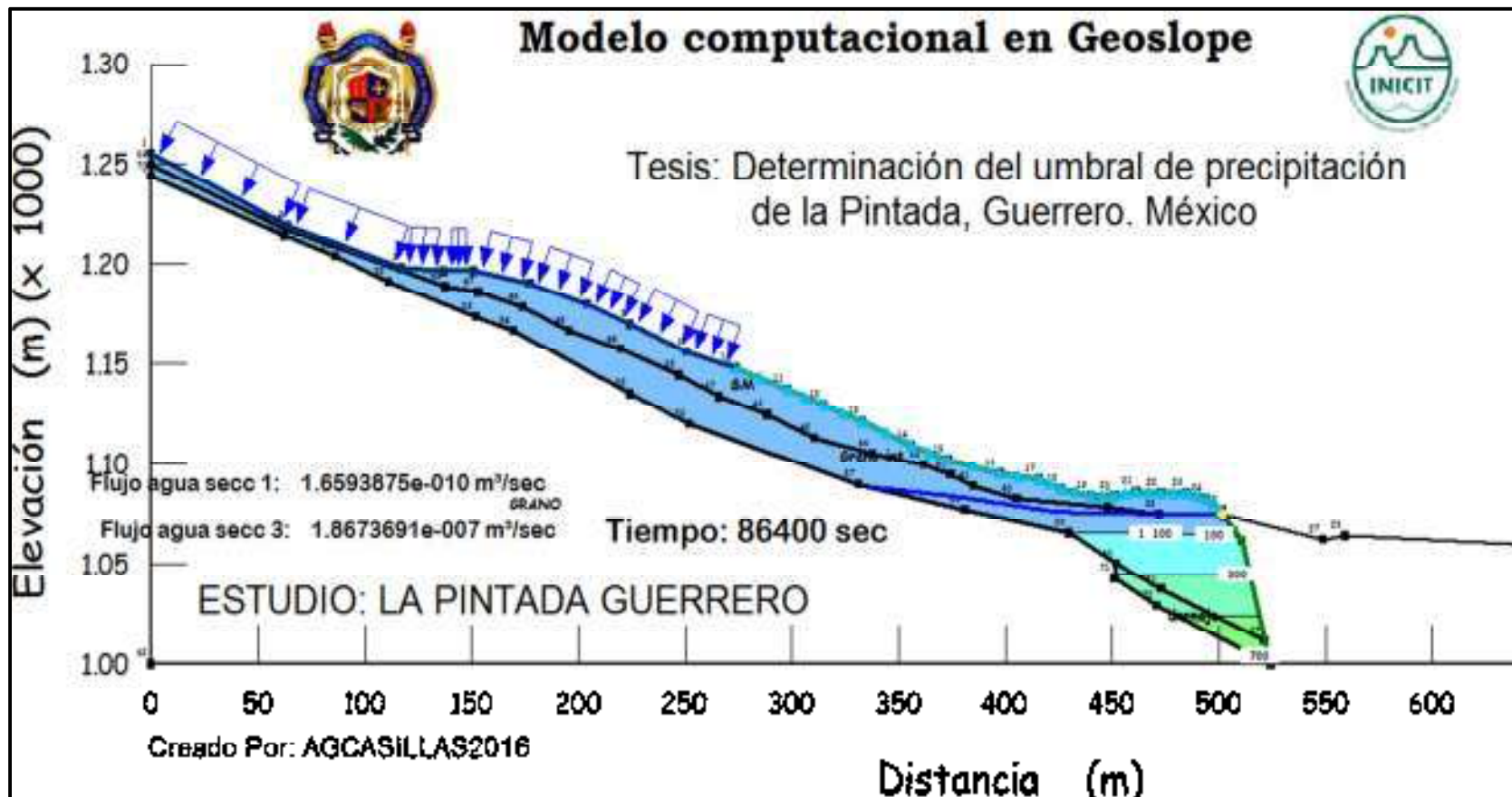


Figura. 40 Resultado para 86400 s. 1 día

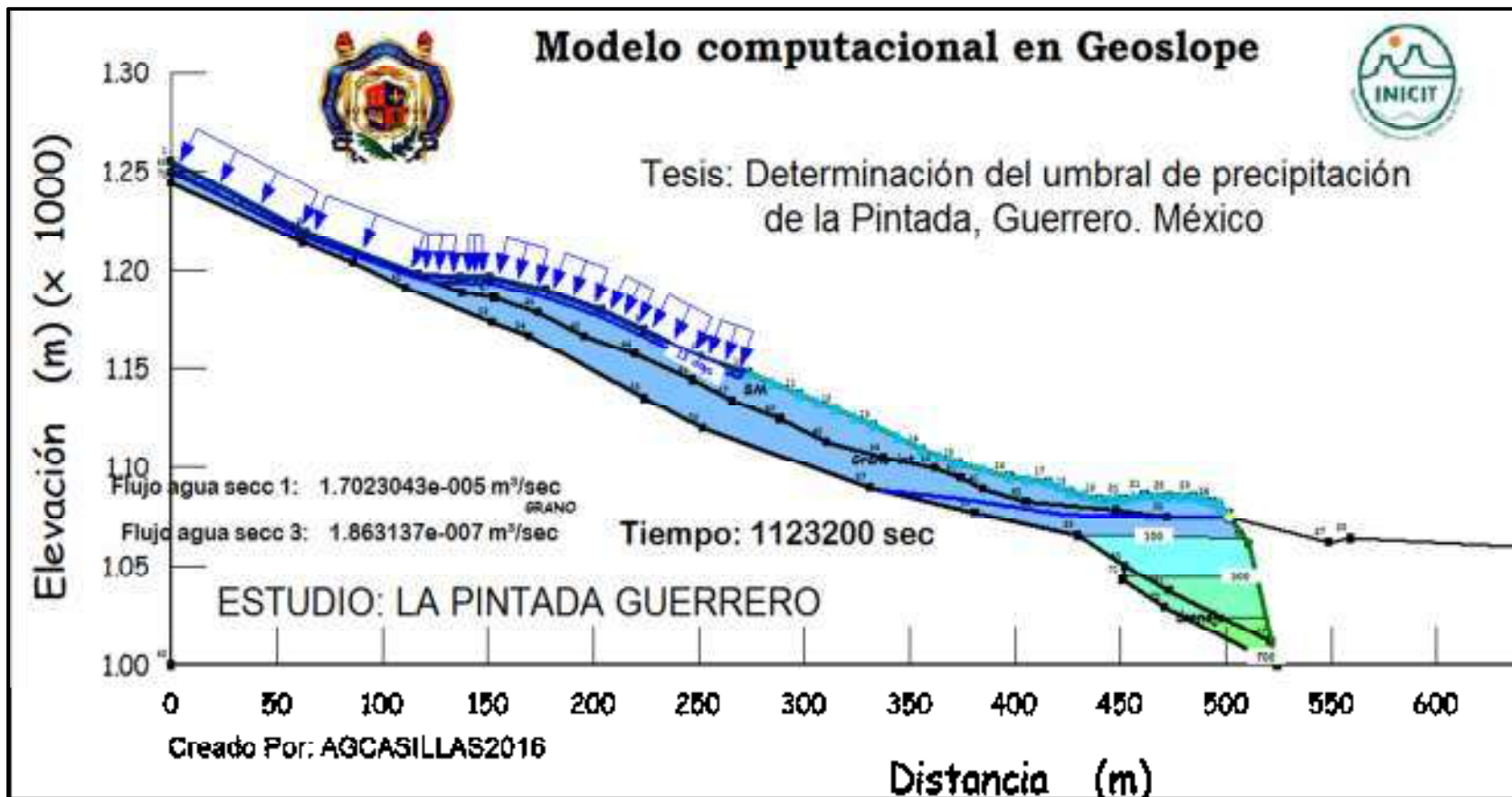


Figura. 41 Resultado para 1123200 s. 13 días.



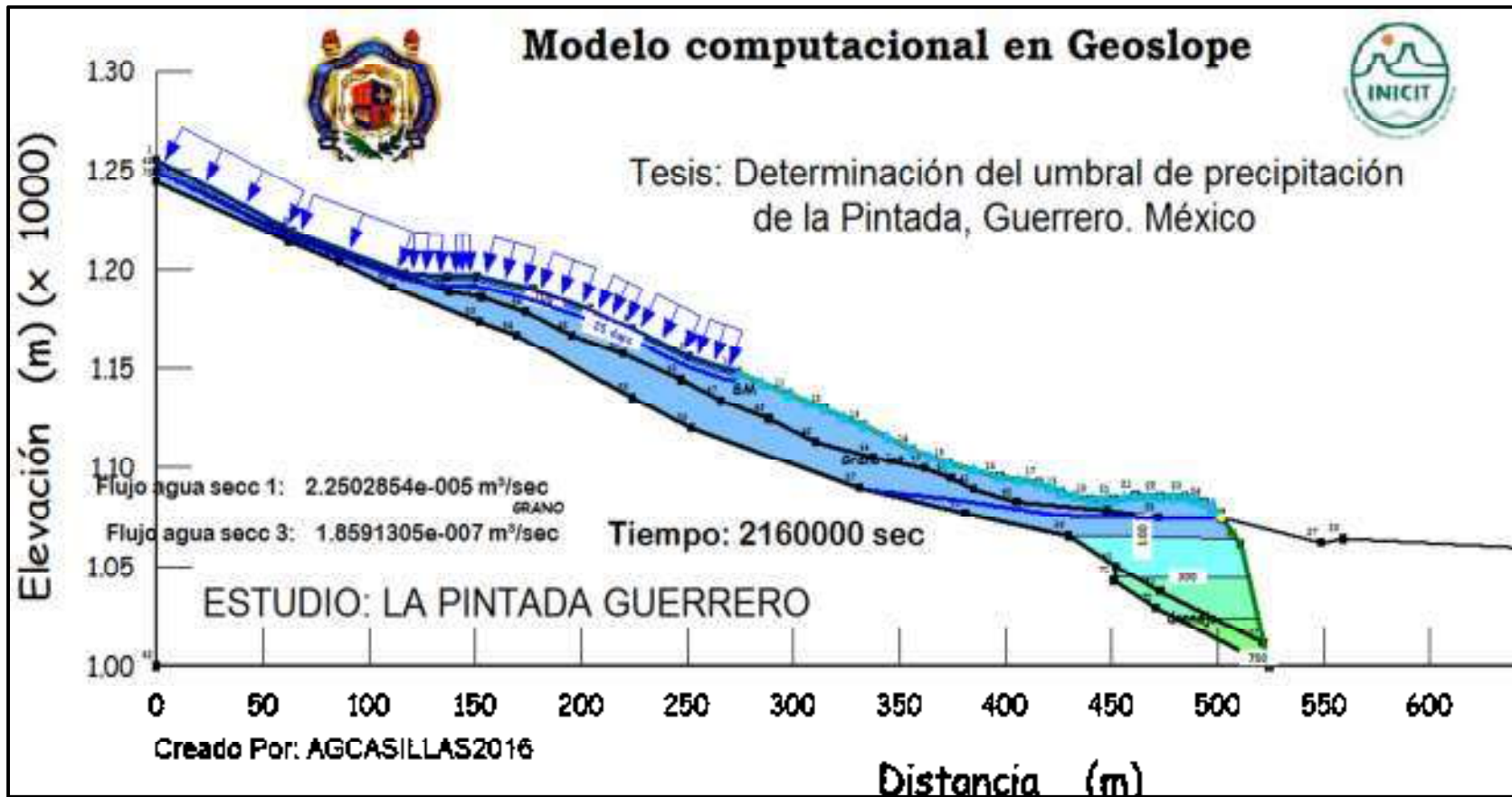


Figura. 42 Resultado para 2160000 s. 25 días

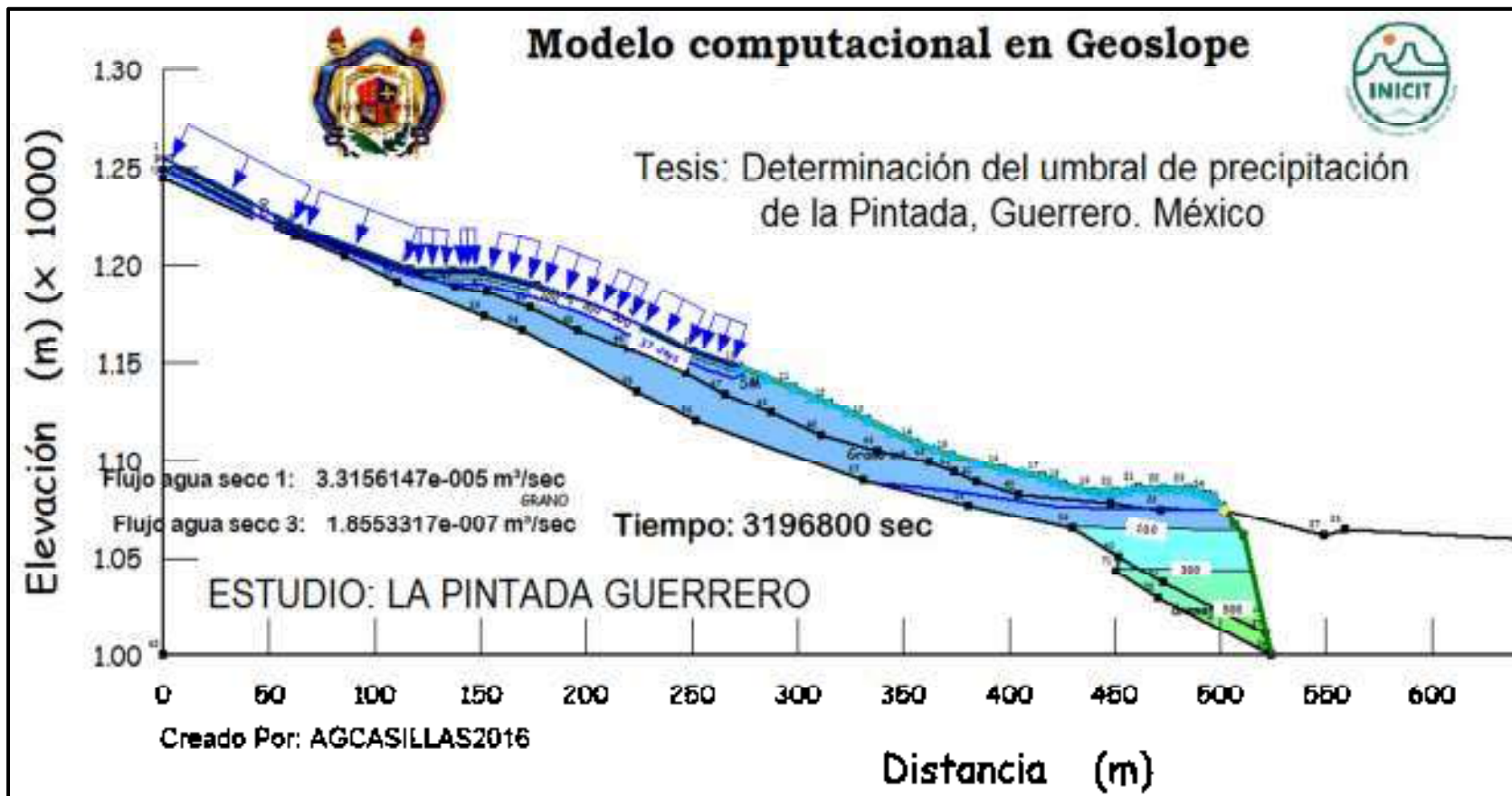


Figura. 43 Resultado para 3196800 s. 37 días



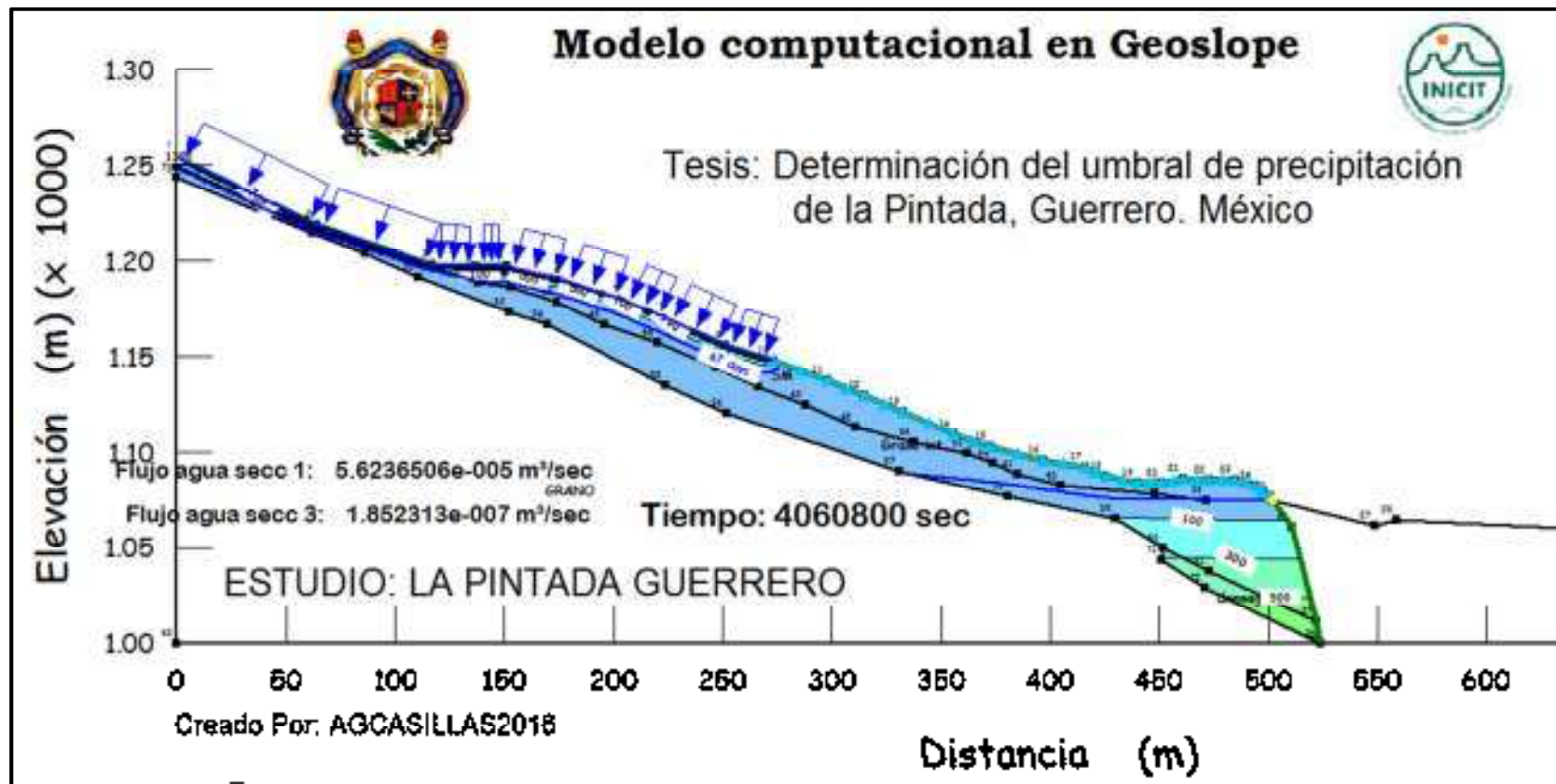


Figura. 44 Resultado para 4060800 s. 47 días.

La evolución de la presión de poro en el suelo del primer estrato, se aprecia cómo la línea de presión cero o nivel freático línea azul va profundizando y parte de la presión de poro negativa igual a -29.5 kPa y evoluciona hasta llegar a ser de 719.8 kPa. En el colapso a los 47 días lo cual indica una sobresaturación del material del primer estrato, no con ello quiere decir que el segundo estrato no este saturado, no dejemos de ver que el análisis se realizó básicamente para que fallara el primer estrato porque así sucedió (figuras del 45 al 49).

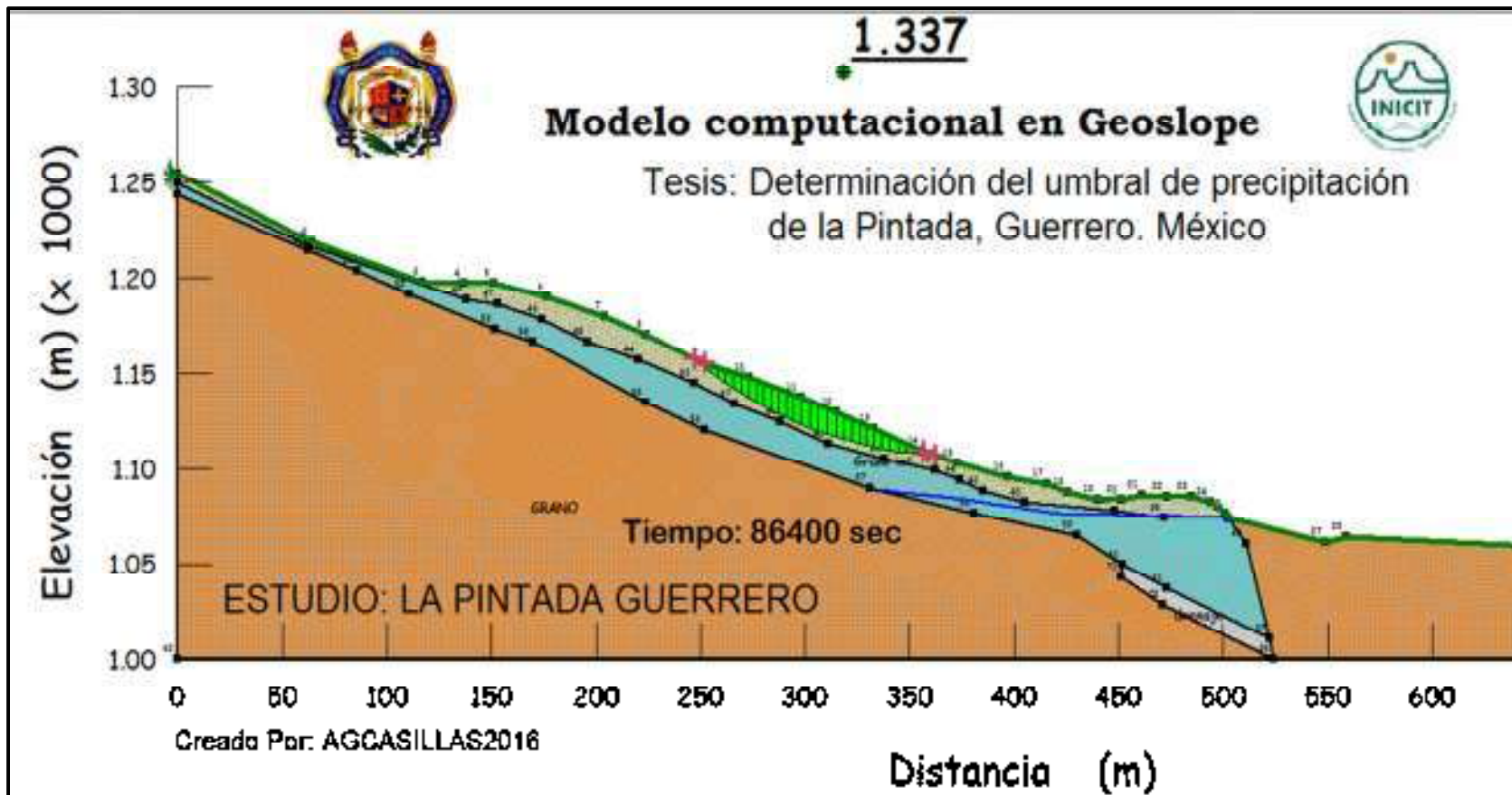


Figura. 45 Resultado para 86400 s. 1 día

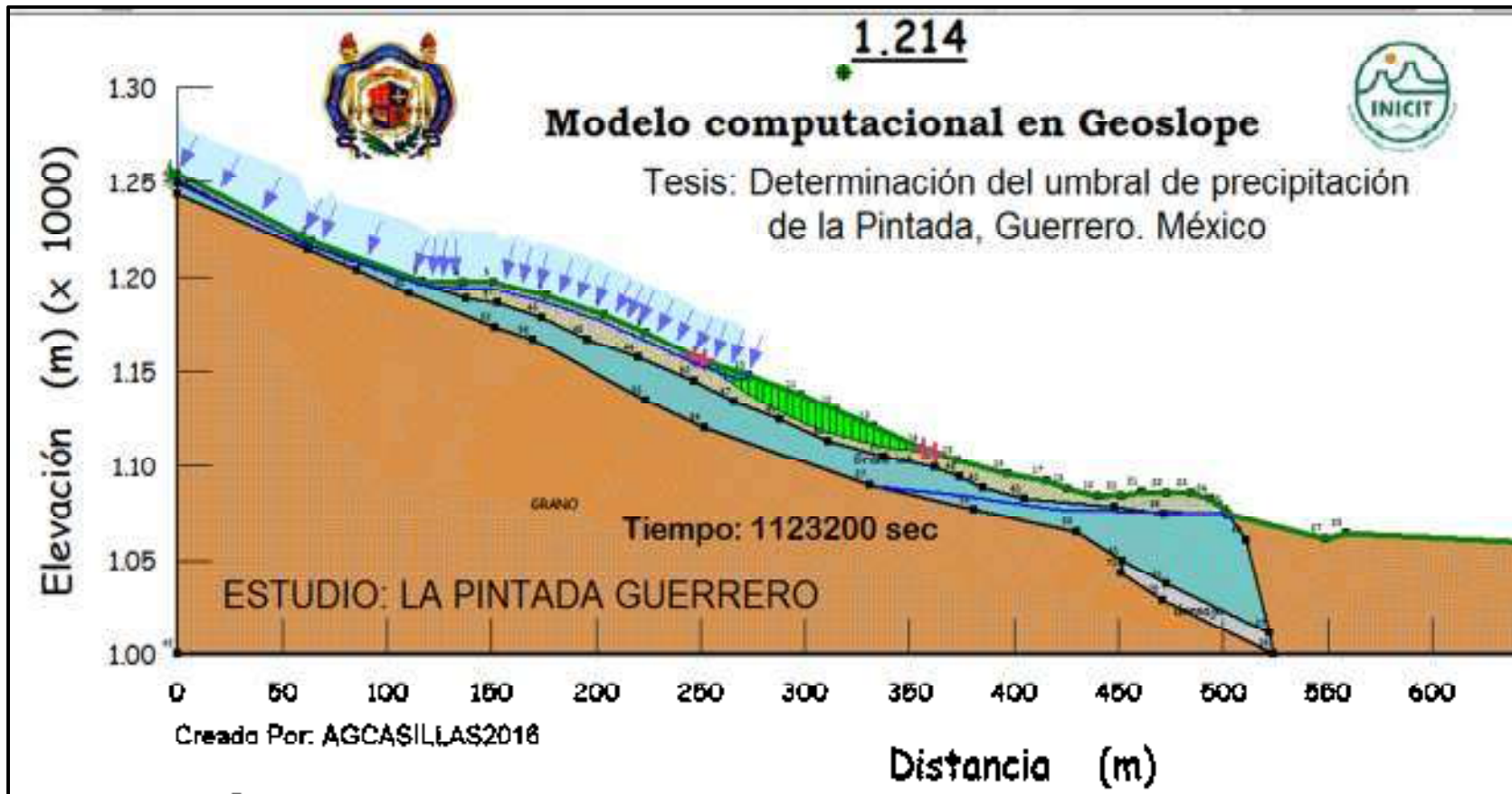


Figura. 46 Resultado para 1123200 s. 13 días

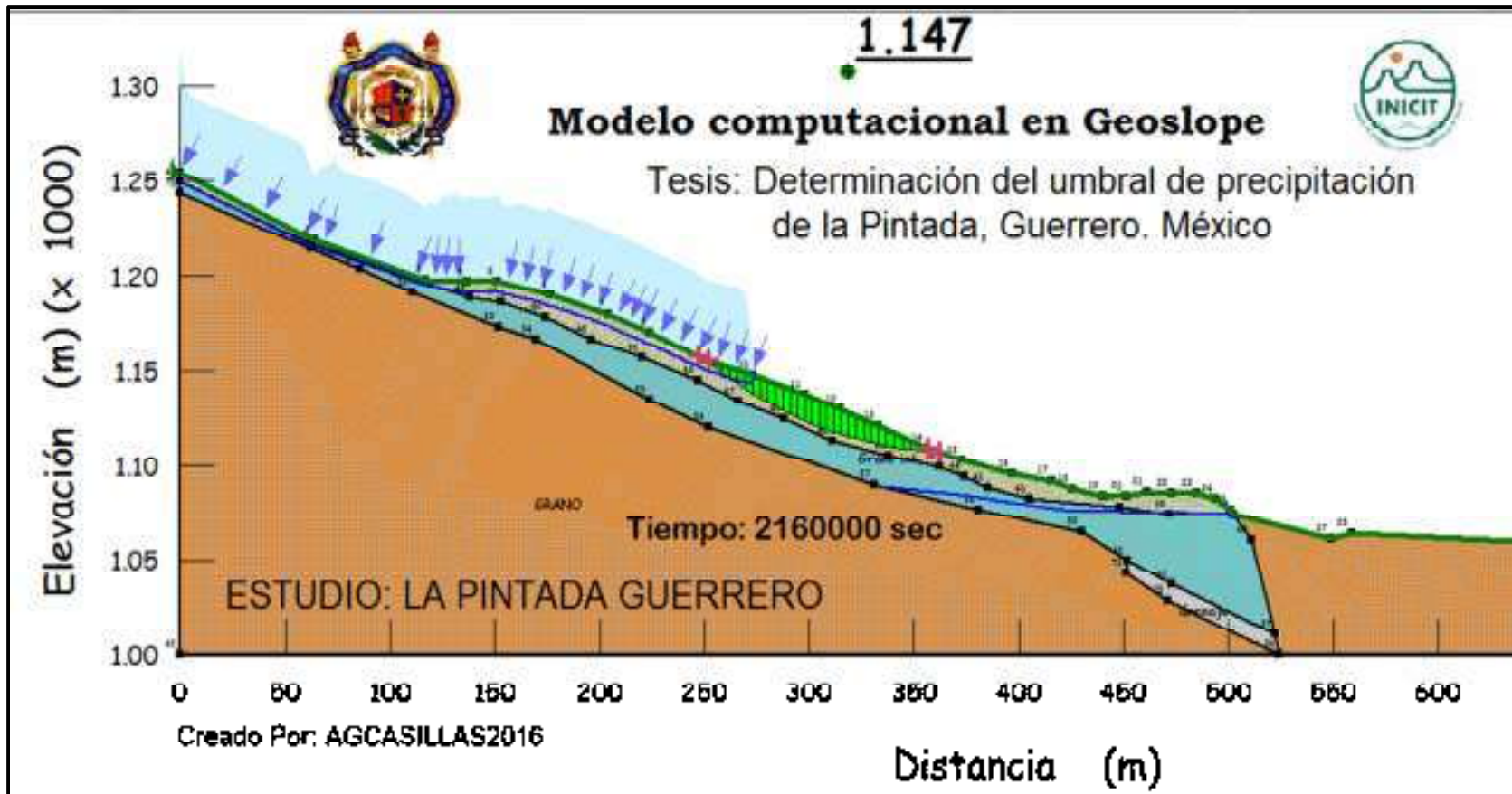


Figura. 47 Resultado para 2160000 s. 25 días



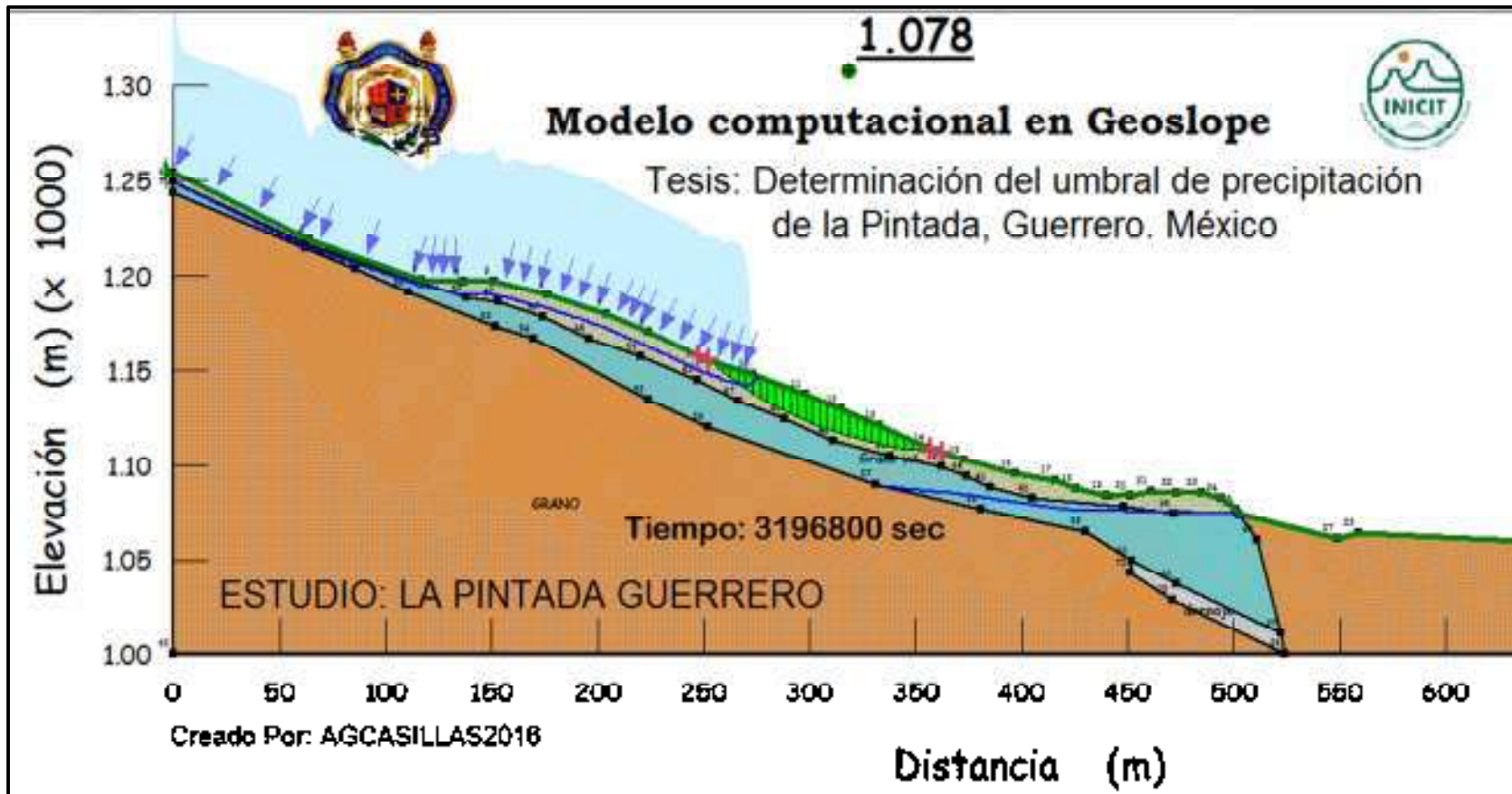


Figura. 48 Resultado para 3196800 s. 37 días.

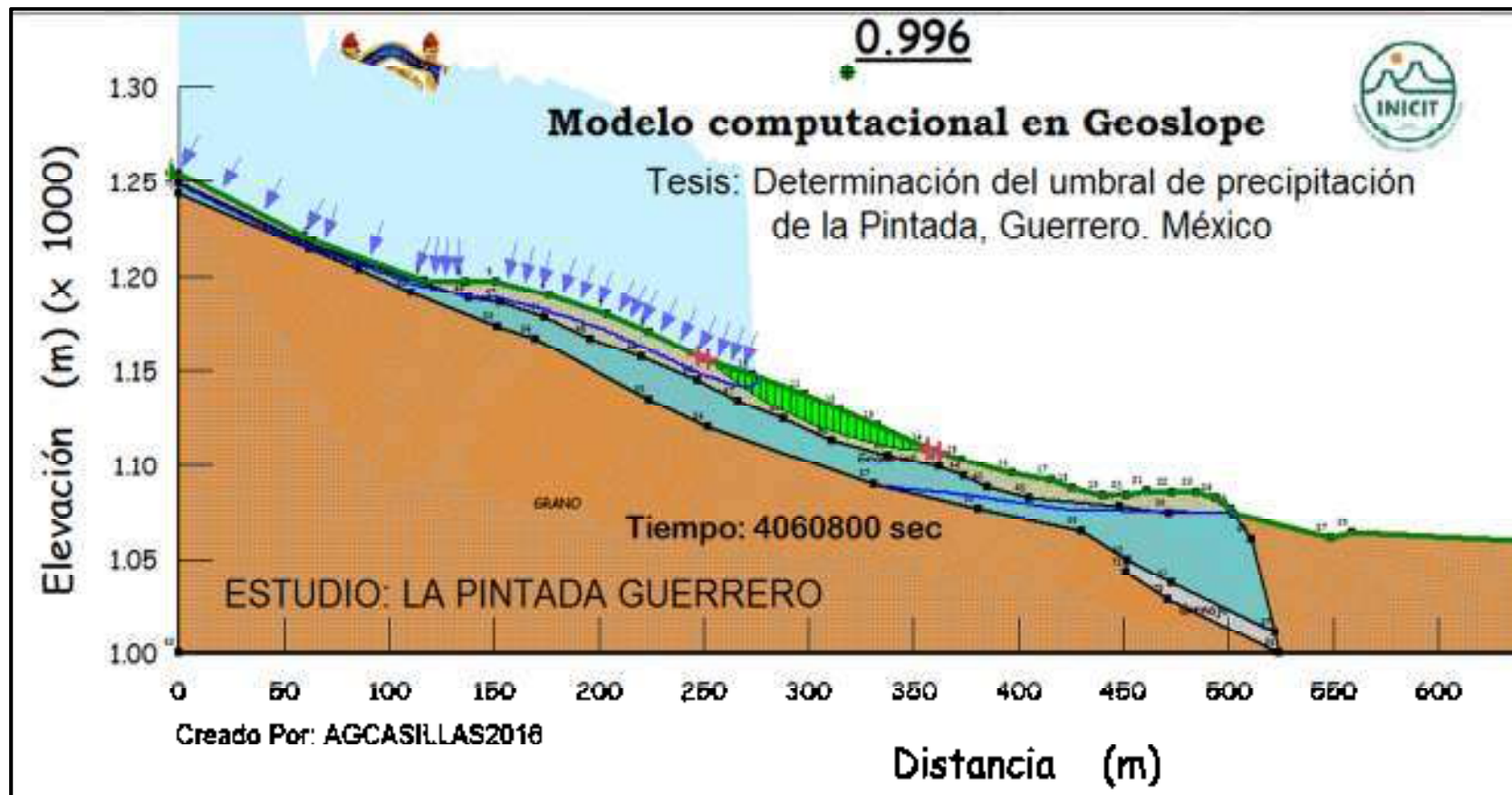


Figura. 49 Resultado para 4060800 s. 47 días.

Se inició el análisis con un factor de seguridad en estado estacionario de 1.342 y por influencia de la lluvia se observa una disminución en el primer día a 1.337, es decir 5 milésimas abajo. Evoluciona de una manera sensiblemente lineal, aparentemente hasta llegar a un estado crítico por debajo de 1.000, presentándose inminentemente el colapso para el cuarentavo séptimo día que corresponde al 16 de septiembre del 2013. Cabe mencionar la gran cantidad de agua acumulada en el talud como se aprecia en los gráficos y la saturación casi por completo del primer estrato.

La influencia directa del agua de lluvia en la disminución de la resistencia del material, se refleja en el decremento del factor de seguridad en el tiempo por lo que para poder determinar cuál es el umbral de precipitación, se realizó la (figura 50).



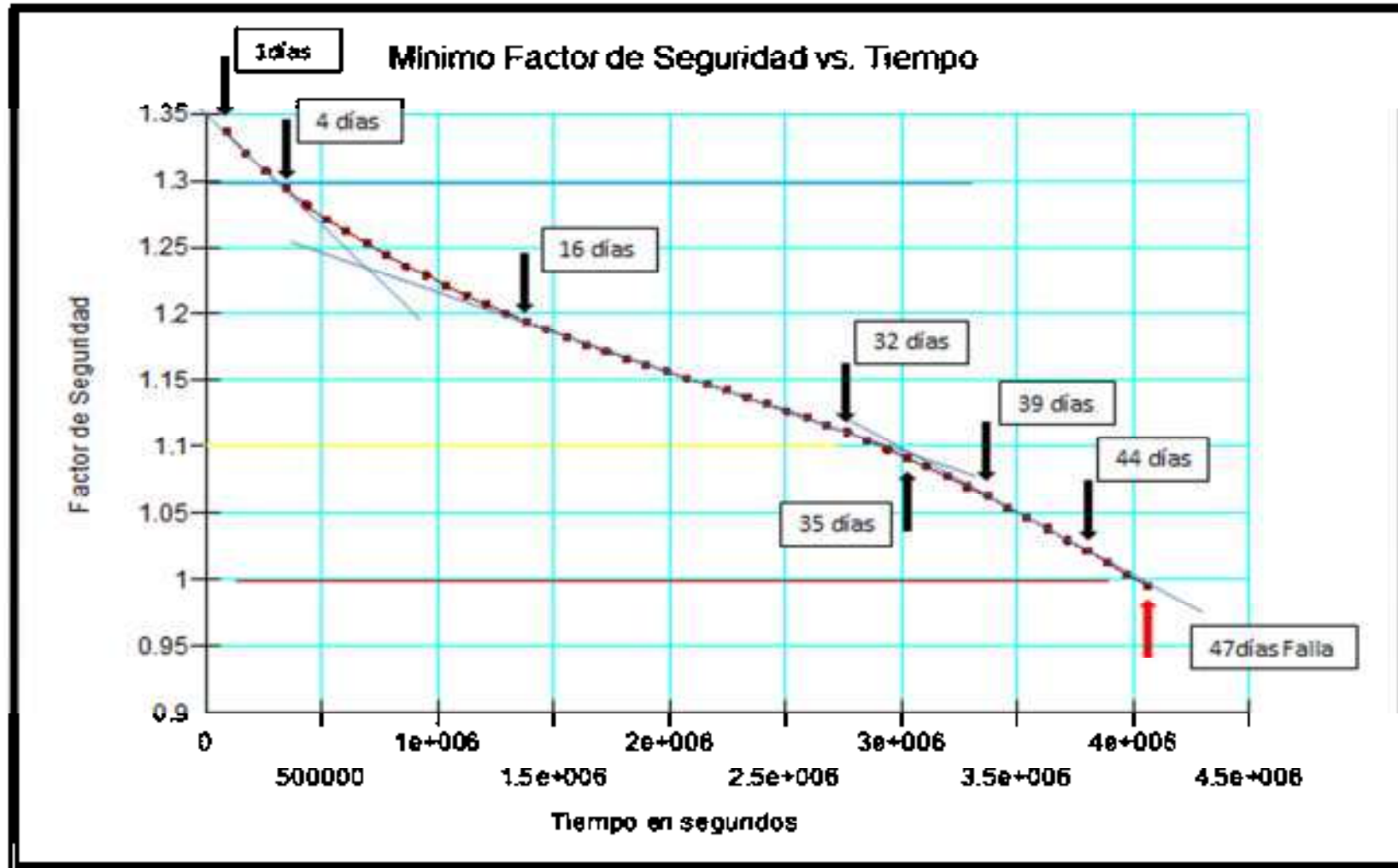


Figura. 50 Gráfica de evolución del factor de seguridad en el tiempo de la Pintada Guerrero, México.

Observamos en la figura 50 que el factor de seguridad es lineal del primer día al cuarto, del quinto día al dieciseisavo día forma una curva cóncava en reacción a la lluvia acumulada, después constante y lineal hasta el trigésimo segundo día, para cambiar de dirección a un decremento en el factor de seguridad y formar una curva convexa hasta el trigésimo noveno, que vuelve a ser lineal hasta el cuadragésimo cuarto día y por último vuelve a disminuir y formar de nuevo una curva convexa hasta el colapso el cuadragésimo séptimo día. Al parecer obedece la geometría de la curva del factor de seguridad al incremento directo de la cantidad de lluvia.

Para poder determinar el umbral de precipitación primero lo definiremos, como la cantidad de lluvia en la que empieza a perder la estabilidad un talud. Se considera en primera instancia que el día trigésimo quinto es donde comienza a perder la estabilidad, se corroborará con los resultados mecánicos del talud las figuras. 51, al 56 muestran un cambio drástico en los valores entre el día 25 y el 35.

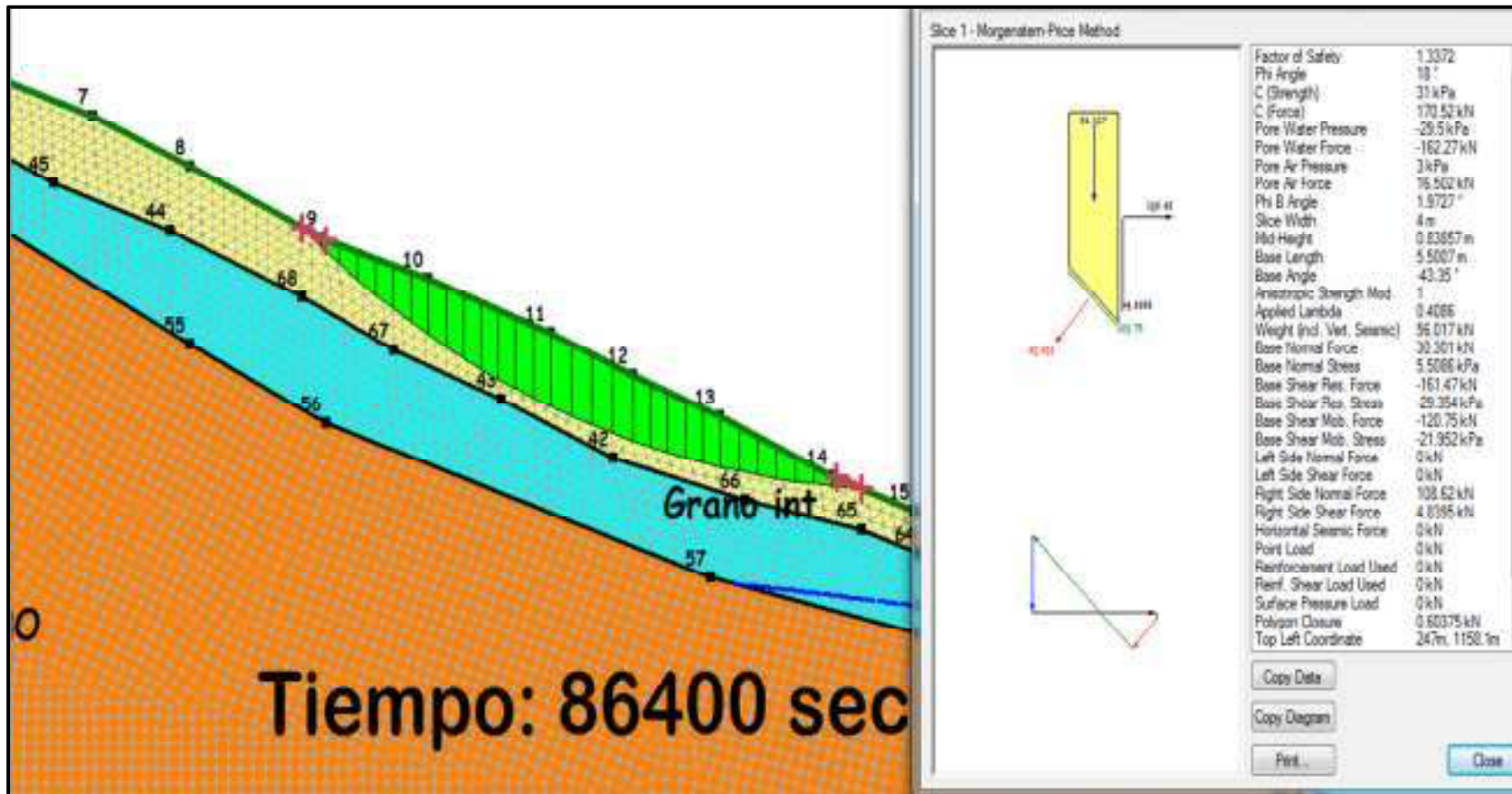


Figura. 51 Resultado para 86400 s. 1 día

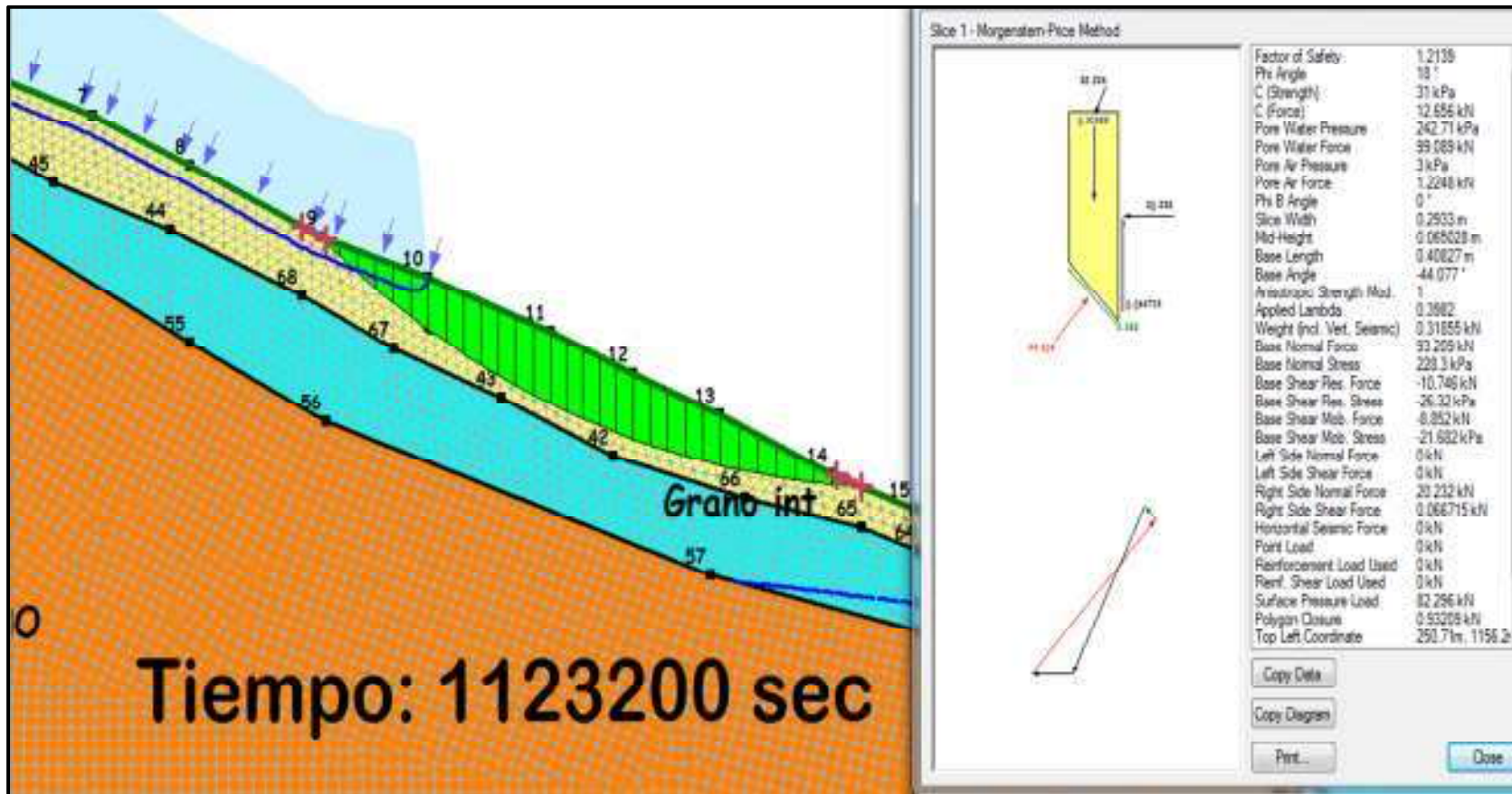


Figura. 52 Resultado para 1123200 s. 13 días.



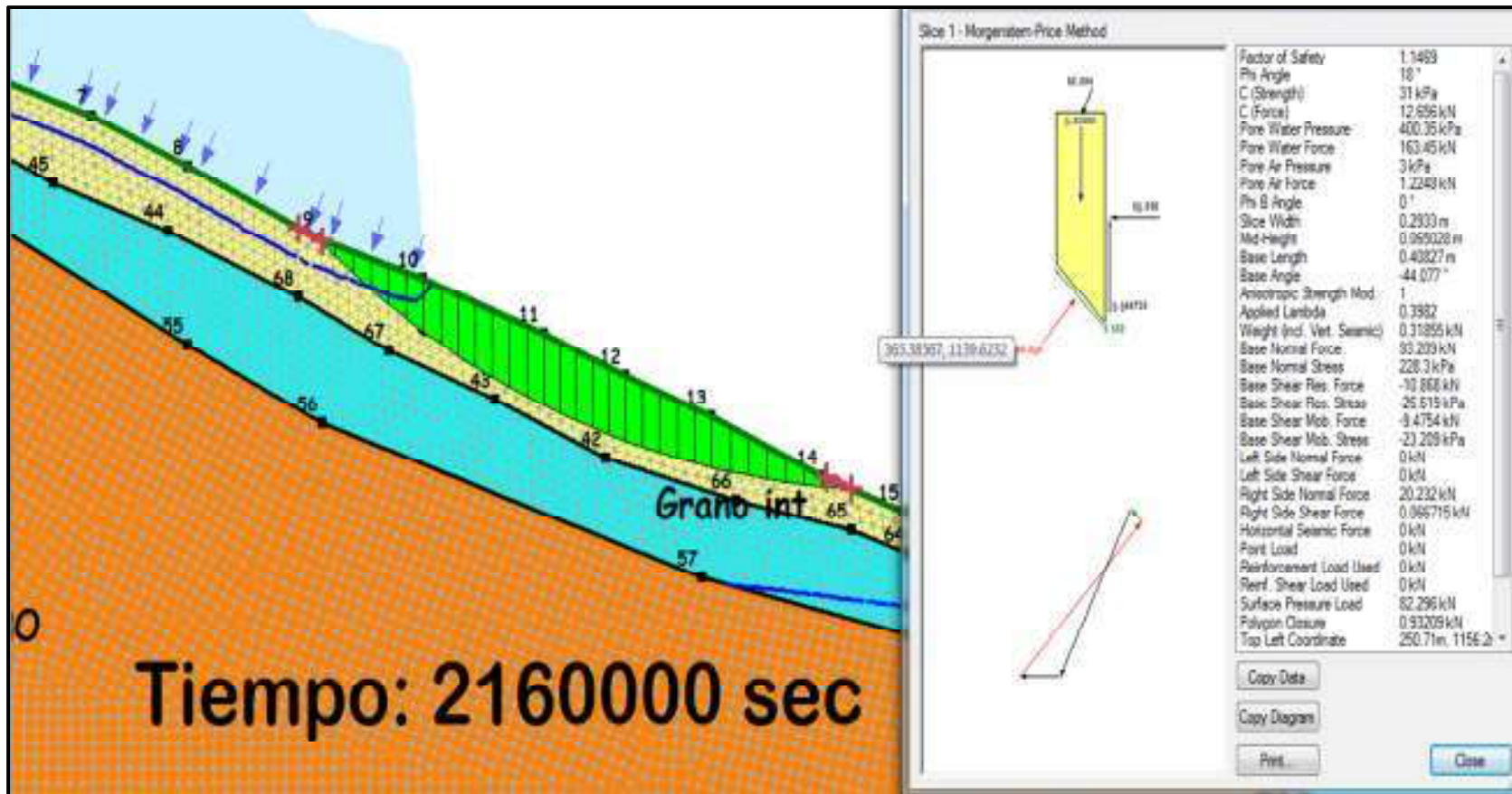


Figura. 53 Resultado para 2160000 s. 25 días

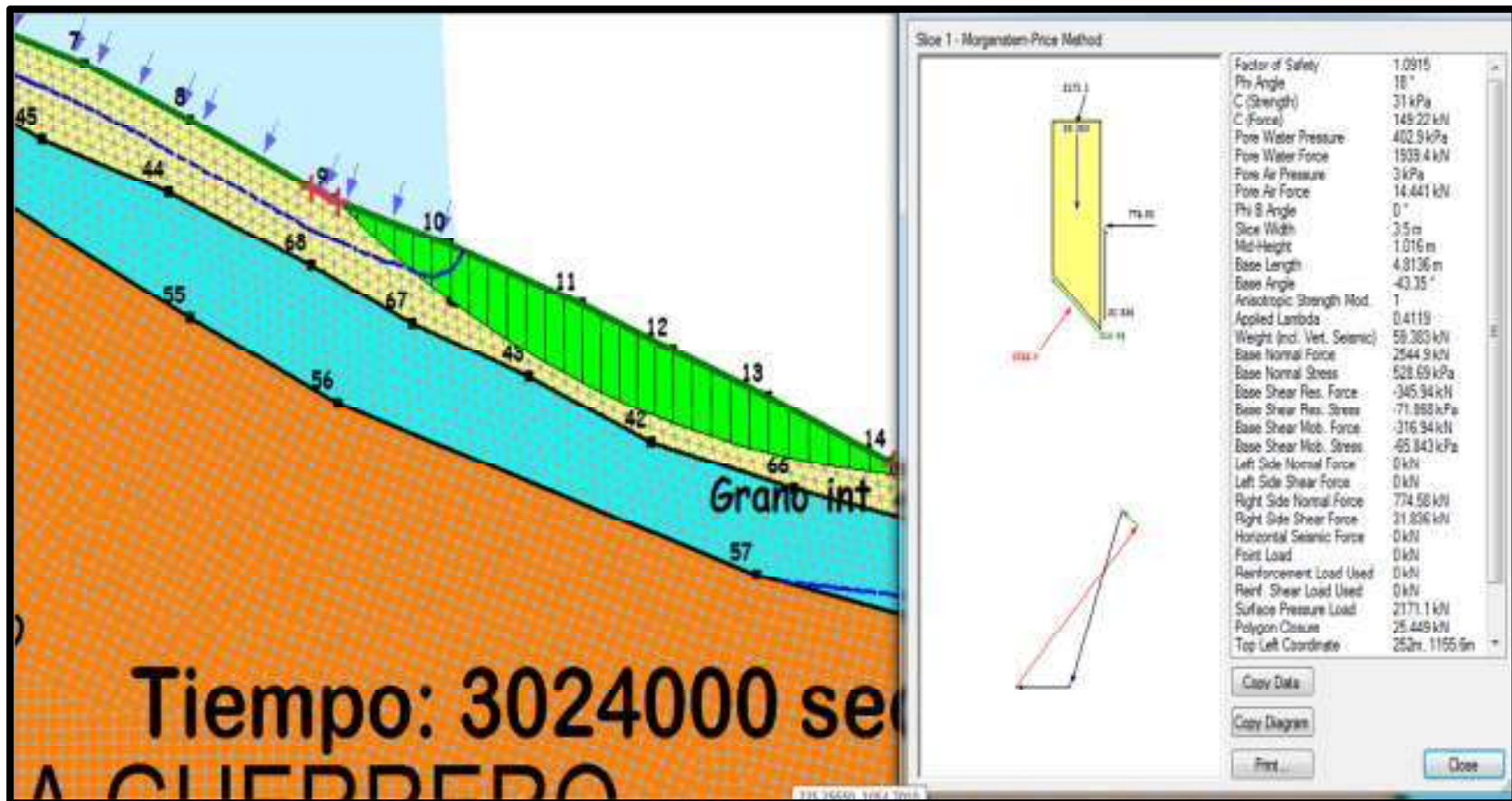


Figura. 54 Resultado para 3024000 s. 35 días.

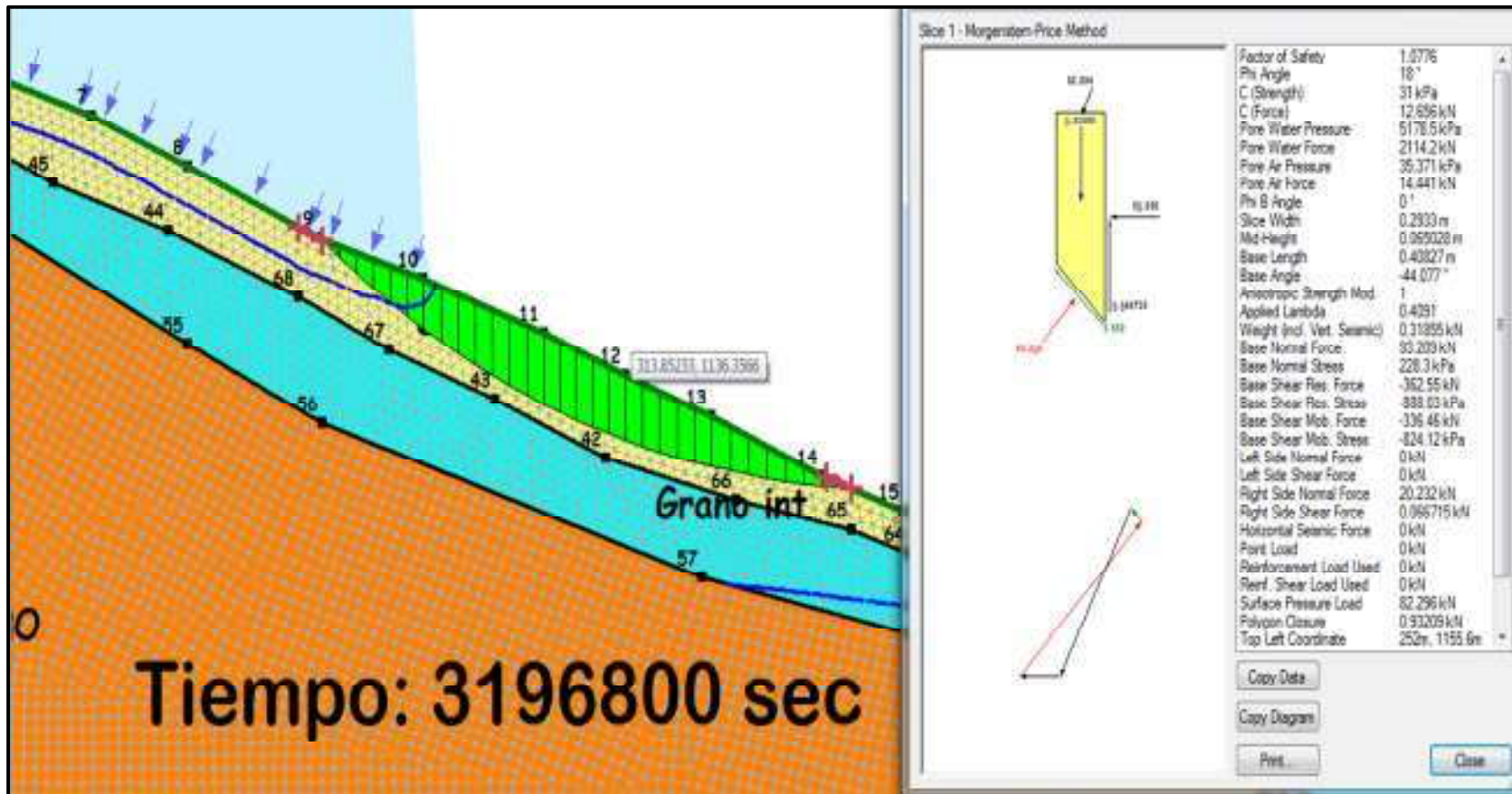


Figura. 55 Resultado para 3196800 s. 37 días



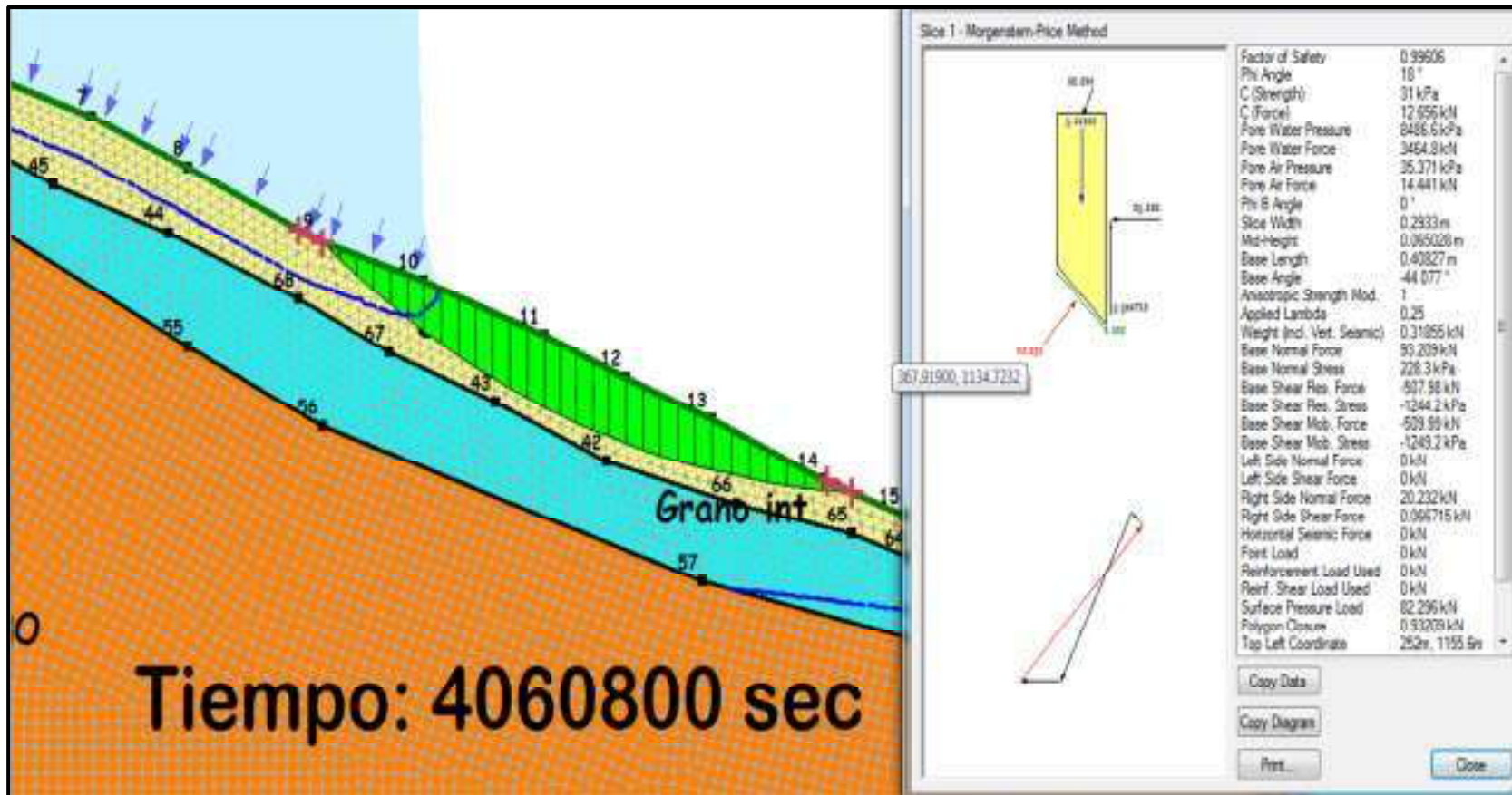


Figura. 56 Resultado para 4060800 s. 47 días.

Para comprobarlo graficamos los valores de presión de poro en el agua, esfuerzo normal en la base, cortante normal en la base, fuerza normal al lado derecho, cortante normal al lado derecho y carga de presión normal contra factor de seguridad.





Figura. 57. Resultado F.S. vs. PWP.

En la (figura 57) se observa un cambio de negativo a positivo en la presión de poro, coincidiendo con un factor de seguridad de 1.3. Una zona de aumento de presión de poro constante a llegar al (día 32) y se observa una caída brusca de presión (23 % 117.7 KPa) debido al cambio de geometría considerándose llegar a la crítica y la geometría permanece constante hasta la falla, se puede inferir que define concretamente la línea de falla por cortante, lo que le da la forma característica de un deslizamiento rotacional; el (día 43) determina una zona de relajación constante de presión que se mantiene por un día y sube constante hasta la falla (719 KPa).

El cambio de geometría de la dovela de estudio es más claro en su percepción si observamos la tabla 8.

Tabla 8 Dimensiones de la dovela en estudio del deslizamiento La Pintada Guerrero.

PROPIEDAD	0 días	1	2	3	4	5	6	13	16	18
Factor of Safety	1.342	1.337	1.321	1.307	1.294	1.282	1.271	1.214	1.194	1.183
Top Left Coordinate m.	247, 1158.1	247, 1158.1	248.24, 1157.5	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2
Top Right Coordinate m.	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156	251, 1156
Bottom Left Coordinate m.	247, 1158.1	247, 1158.1	248.24, 1157.5	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2
Bottom Right Coordinate m.	251, 1154.3	251, 1154.3	251, 1154.8	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9
PROPIEDAD	25	30	32	34	35	37	39	43	44	47
Factor of Safety	1.152	1.122	1.111	1.098	1.092	1.078	1.063	1.022	1.022	0.996
Top Left Coordinate m.	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6
Top Right Coordinate m.	251, 1156	251, 1156	251, 1156	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4	255.5, 1154.4
Bottom Left Coordinate m.	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	250.71, 1156.2	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6	252, 1155.6
Bottom Right Coordinate m.	251, 1155.9	251, 1155.9	251, 1155.9	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3	255.5, 1152.3

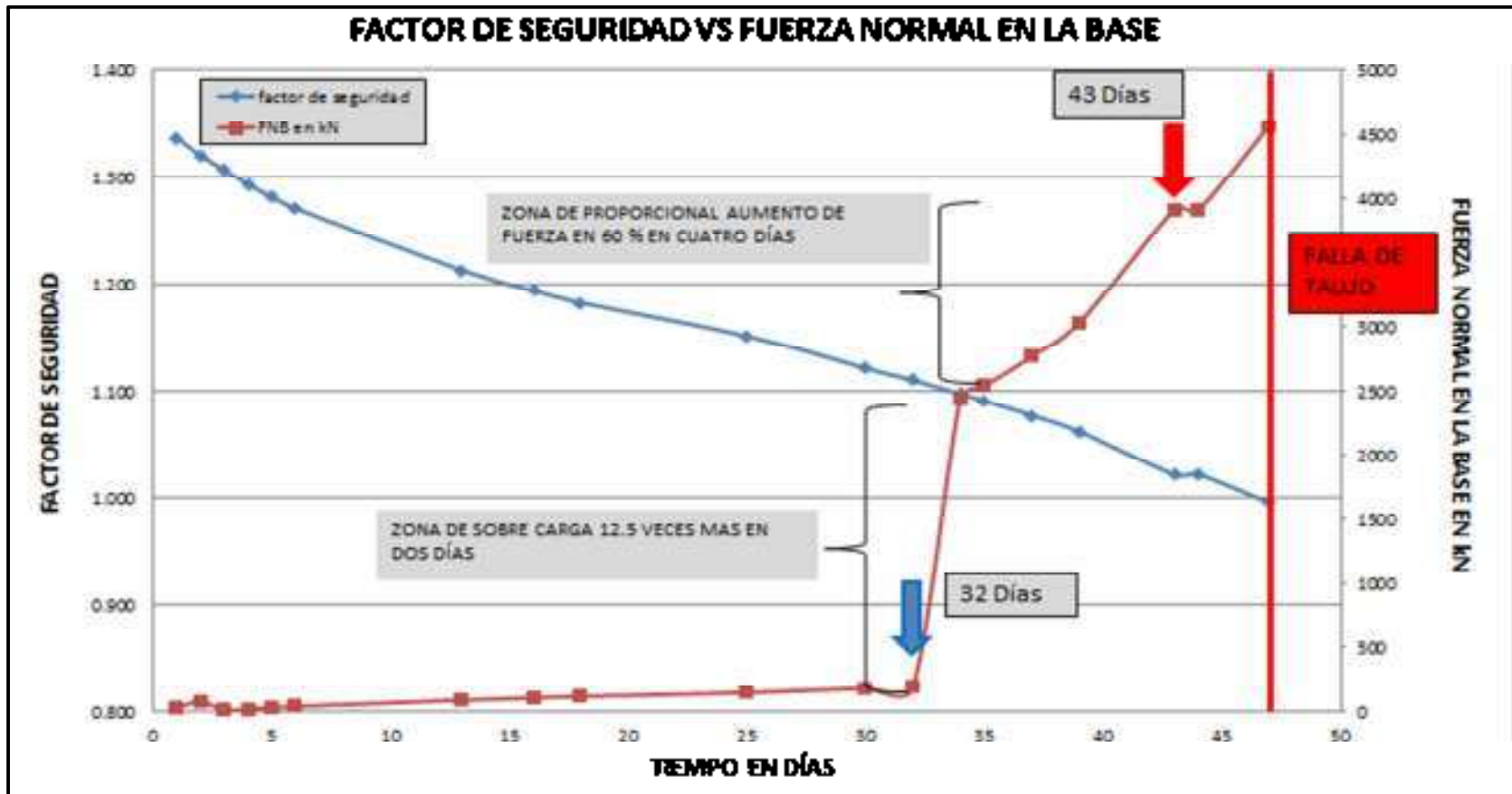


Figura. 58 Resultado F.S. vs. FNB.

La gráfica de fuerza normal en la base (figura 58) nos marca tres zonas definidas, la primera empieza en el (día 32) con una sobre carga proporcional de 12.5 veces en dos días y cruza en el factor de seguridad de 1.1 y enmarcar la segunda zona cuasi proporcional que representa un aumento en un 60 % su resistencia en cuatro días y cuadruplicando su fuerza y llegar a una zona de relajación al (día 43) y a su falla al (día 47) donde su fuerza máxima es de 4569 KN (465908 Kf).

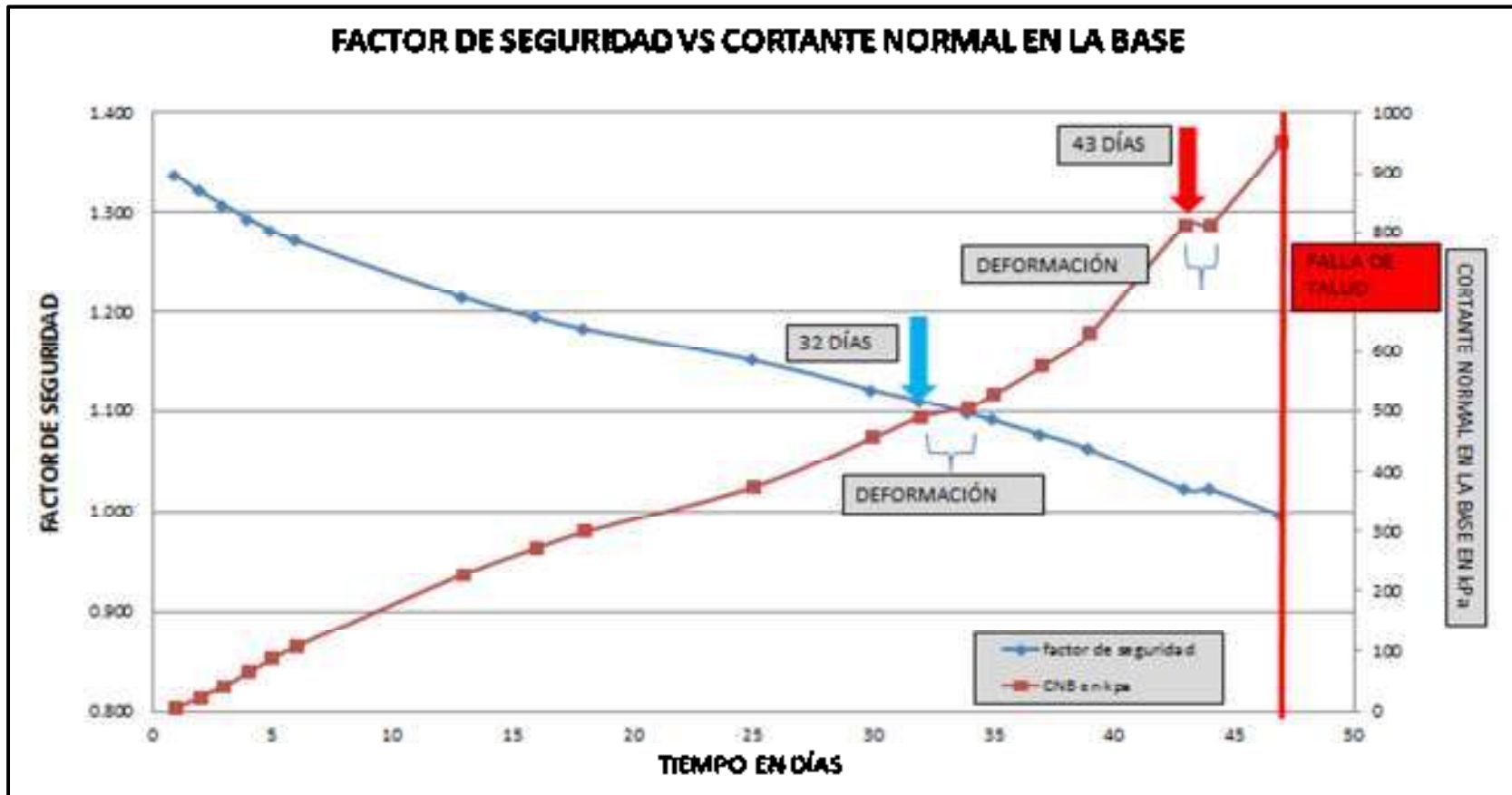


Figura. 59 Resultado F.S. vs. CNS

La (figura.59) denota una intercepción entre el (día 32 y 34) en el factor de seguridad en 1.1 y una zona de relajación el (día 43) y el cortante normal en la base el día de falla es de (949 KPa) 9.68 kg/cm<sup>2</sup>.

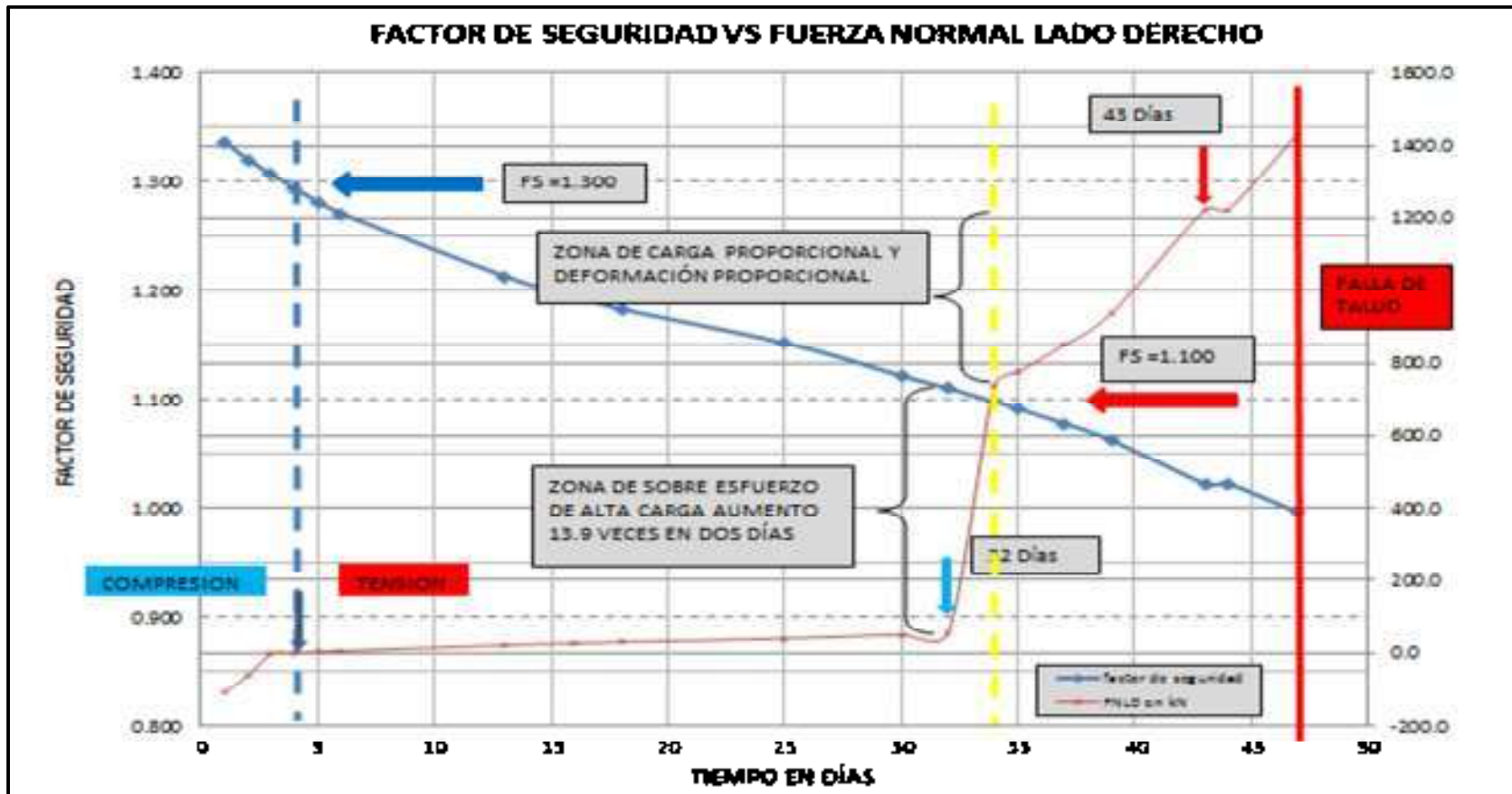


Figura. 60 Resultado F.S. vs. FNLD.

Los resultados se presentan en la (figura. 60). la línea en azul define dos zonas cuando el valor del factor de seguridad es mayor 1.3 limita una zona en compresión y al ser menor a 1.3 una zona de tensión, siendo el valor de 1.3 es el eje neutro de esfuerzos, cuando el factor de seguridad toma valores que tienden a 1.1 marca una zona de deformación proporcional hasta el días 32, se incrementan la fuerza normal en 13.9 % en dos días y considera una zona de deformación elástica, a su vez intercepta por sobre posición de graficas un punto límite donde el valor del factor de seguridad es de 1.1 (línea amarilla) y llegando hasta el día 34 días; donde se vuelve proporcional hasta llegar al día 43 y un periodo de deformación o zona de endurecimiento plástico sin incremento de fuerza normal hasta el día 44 para continuar fluyendo plásticamente hasta alcanzar fuerza normal del lado derecho de ruptura 1435 KN (146329 Kf).





Figura. 61 Resultado F.S. vs. FCLD.

En la (figura. 61) al igual que la gráfica anterior marca los límites del factor de seguridad en 1.3 una zona de compresión y cambiando a tensión. El material fluye plásticamente hasta el día 32 donde el cortante incrementa en 175.4 veces su valor en dos días, en su fluencia por superposición intercepta la curva de factor de seguridad en 1.1 línea amarilla y el material sigue fluyendo plásticamente hasta llegar al día 39 donde se considera como el límite de fluencia superior máximo y continua con su deformación en menor medida y con menos cortante hasta llegar al día 43 donde el límite de fluencia inferior mínimo aparece y permanece en periodo de deformación (zona de endurecimiento plástico) sin incremento de fuerza cortante hasta el día 44 y sufre un incremento (zona de endurecimiento por deformación plástica o zona de deformación por constricción plástica) donde la fuerza cortante alcanza la falla el día 47 con un valor de 35.79 KN (3650 Kf).

A continuación la (figura 62) muestra en resumen todas las propiedades descritas, en ella encontramos definidos los valores límite del factor de seguridad donde cobran importancia y definiéndolos en colores característicos de peligro, a su vez también están incluidos dos puntos muy importantes en la estabilidad del talud, el umbral mínimo que es cuando sus propiedades físico- mecánicas comienzan a desestabilizar la ladera y el umbral máximo es cuando se llega a la máxima cantidad de lluvia en la ladera que se considera estable, tomando esta referencia como un aviso de alta peligrosidad y de poder emitir una alerta temprana de evacuación.

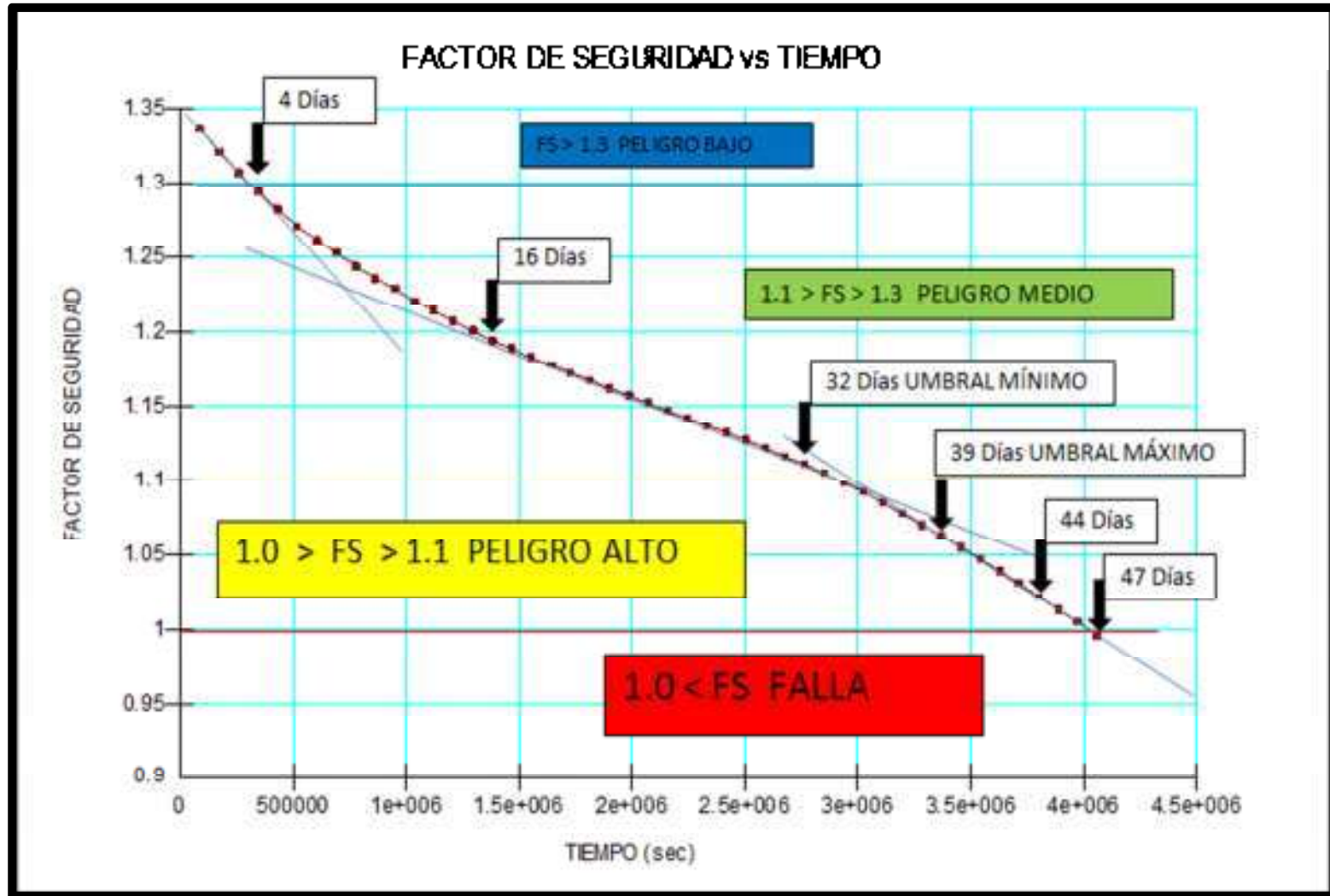


Figura. 62 Gráfica de resultados de límites del factor de seguridad y los umbrales de precipitación.

La (figura 63) determina la lluvia diaria registrada en el periodo del 1 de agosto al 16 de septiembre del 2013, así mismo se observa la curva de la lluvia acumulada en mm que es la base de la obtención correspondiente a los umbrales encontrados: siendo el umbral mínimo de 139.6 mm de la lluvia acumulada al periodo de prueba y su factor de seguridad de 1.111 dentro del rango de peligro medio y el umbral máximo de 191.4 mm y su factor de seguridad de 1.063 que corresponde a un rango de alta peligrosidad y el punto donde debió de emitirse una ALERTA TEMPRANA 08 de septiembre del 2013. La precipitación máxima acumulada es de 281.4 mm en 47 días.



Figura 63 Umbrales de precipitación de la Pintada Guerrero, México.

En las (figuras 64, 65 y 66) se observan cambios en el contenido volumétrico de agua (**C.V.A.**), la humedad natural y en estado inicial (**w<sub>nat</sub>** de 17.6 %) su contenido volumétrico es de 13.88 % como se aprecia en la tabla 8, al llegar al umbral mínimo es decir (día 32) el **C.V.A.** de 55 % y **w** es de 41.99 %, al (días 39) **C.V.A.** de 70 % y **w** de 49.47 % y por último a ( 47 días) **C.V.A.** del 110 % Y **w** de 68.20 %.

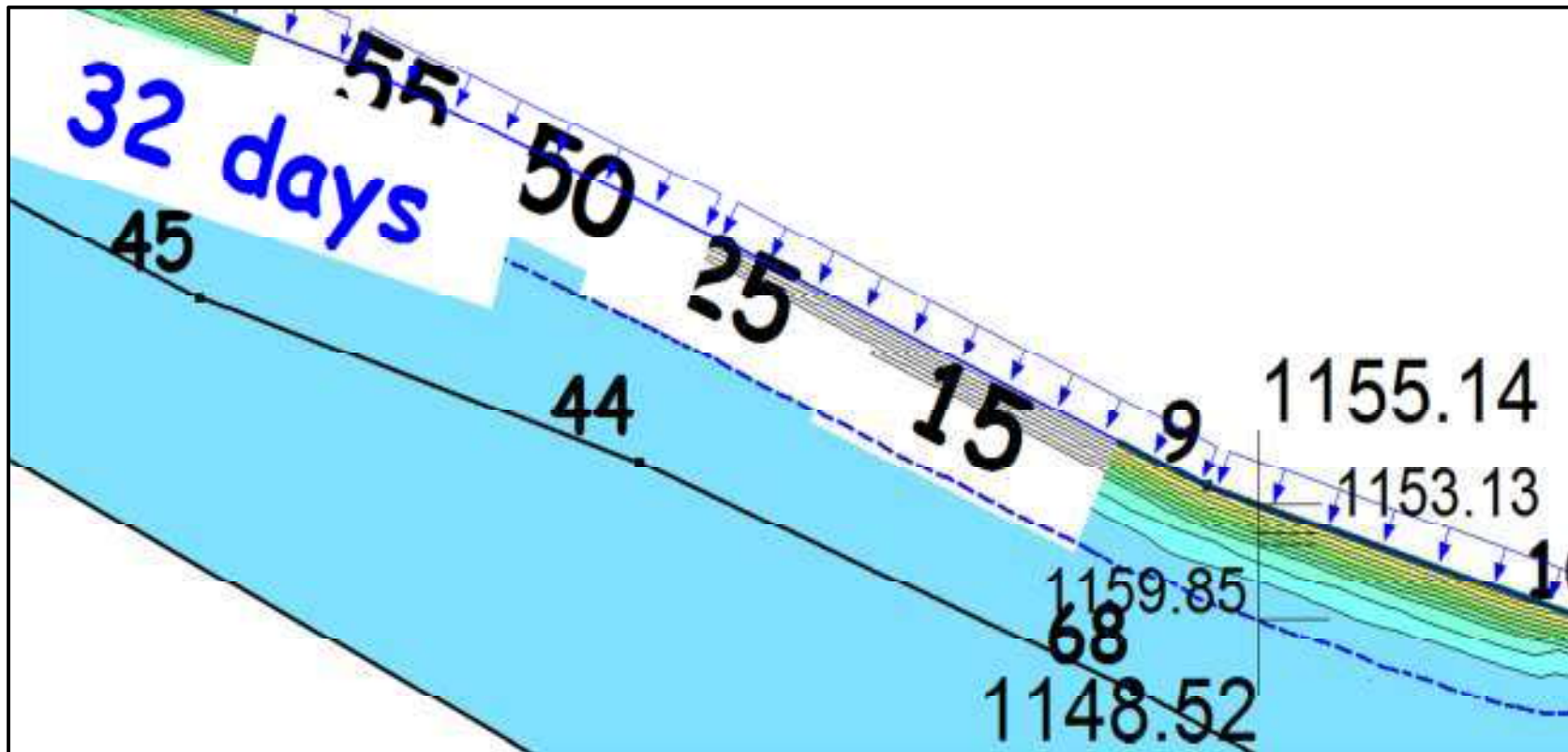


Figura. 64 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 32 días



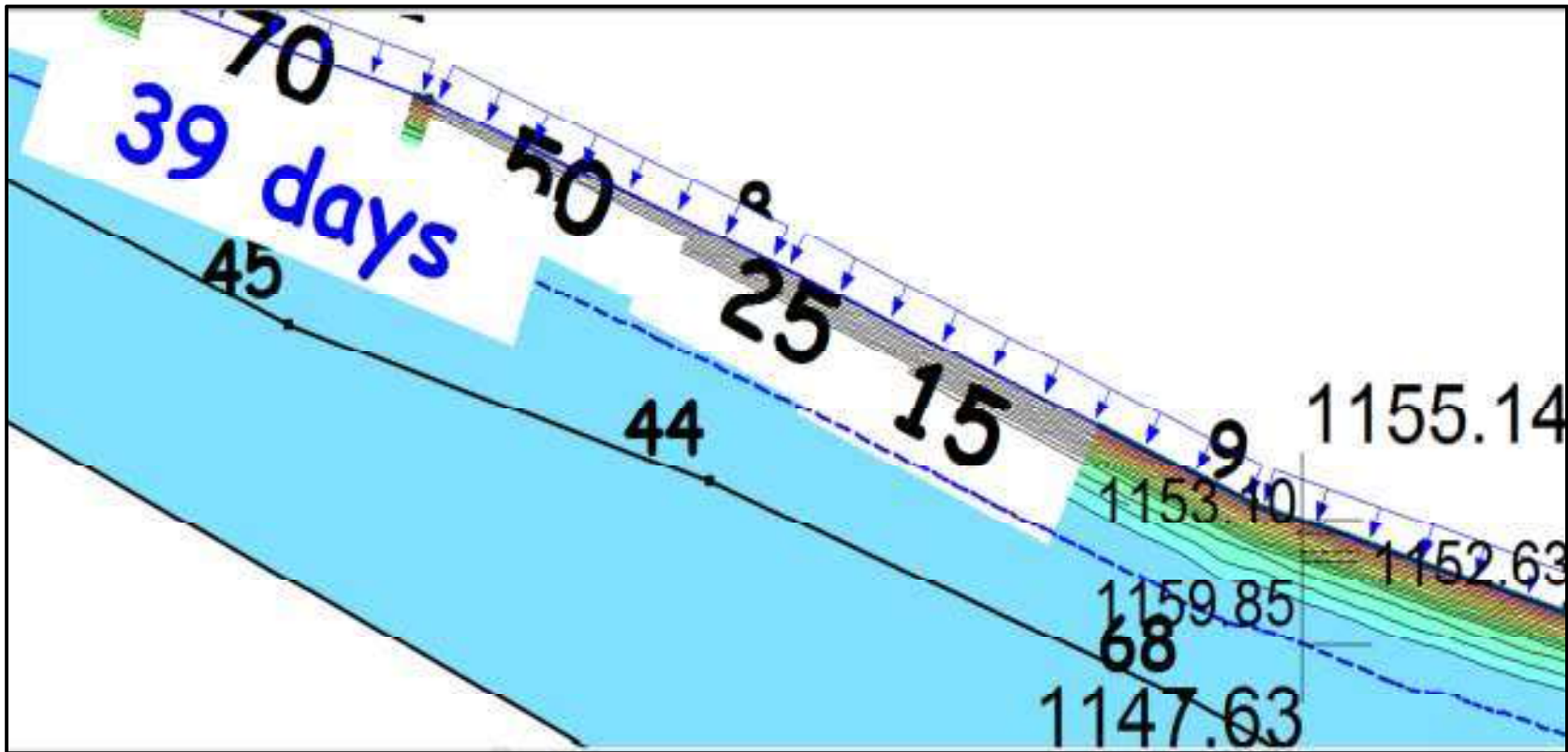


Figura. 65 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 39 días.



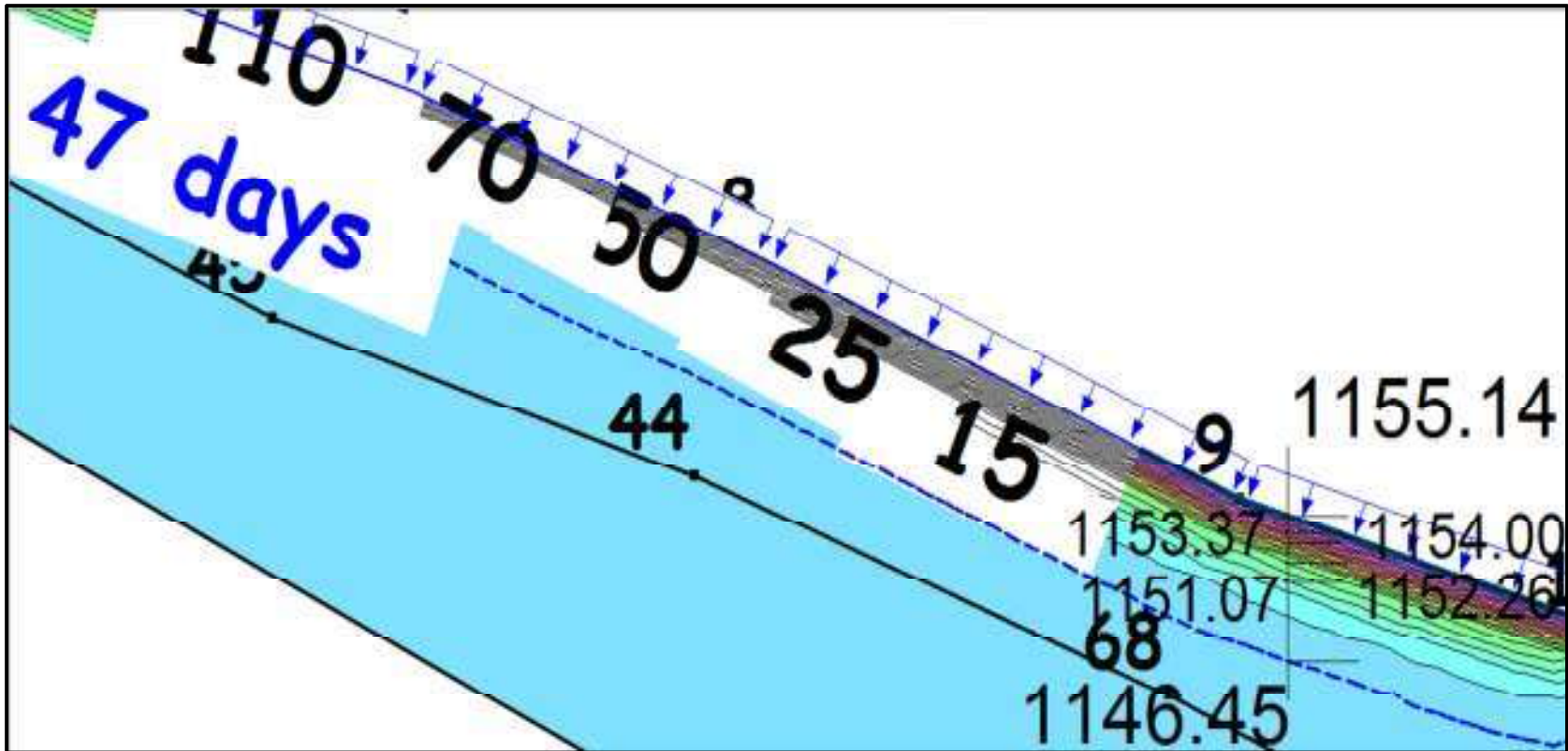


Figura. 66 Gráfica de contenido volumétrico de agua a 47 días.

En la tabla 9 se muestra cómo evolucionó el contenido volumétrico de agua ( $\Theta_2$ ) con respecto a la humedad natural ( $w$ ) y como se realizó una correlación del volumen de agua en una muestra de masa constante en estado seco y la humedad natural y sus relaciones gravimétricas para obtener, los límites de estabilidad volumétrica (condición o atributo) de un talud ( $\zeta$ ). Para ellos como base la humedad natural  $w_{nat}$  17.67 % (1 punto de partida) y se dividió entre el volumen de agua correspondiente a diferentes humedades naturales y a su vez se obtuvieron las demás relaciones gravimétricas como porosidad ( $n$ ), relación de vacíos ( $e$ ) y grado de saturación ( $s$ ) y con ellas se calculó el contenido volumétrico ( $\Theta_1$ ) en función de volumen de agua y volumen de la muestra expresada en decimales y ( $\Theta_2$ ) en función de la porosidad por el grado de saturación expresada en porcentaje.

Obteniendo una correlación directa con los puntos de importancia obtenidos anteriormente y con ello determinar la humedad del material al tener un contenido volumétrico calculado con el programa *Geoslope inc.* Y poder comprender mejor los resultados.

Tabla 9 Límites de estabilidad de una ladera en función de su humedad natural para una arena limosa (SM).

	va	psh g.	vw	pss g.	w	vs	wv	e	n	s	Θ 1	Θ 2	Límites de estabilidad $\zeta$	IL
Ss 2.52 Vt 9.6 cm3	3.9706	37.26	0.80	12.17	0.0657	4.8294	4.7706	0.16565325	0.14211194	16.769	0.08333333	2.3831	0.37	-1.2534
	2.9706	38.26	1.80	12.17	0.1479	4.8294	4.7706	0.3727198	0.27151921	37.731	0.1875	10.2446	0.84	-0.7092
	2.7706	38.46	2.00	12.17	0.1643	4.8294	4.7706	0.41413311	0.29285299	41.923	0.20833333	12.2773	0.93	-0.6004
	2.7206	38.51	2.05	12.17	0.1684	4.8294	4.7706	0.42448644	0.29799262	42.971	0.21354167	12.8051	0.95	-0.5732
	2.6706	38.56	2.10	12.17	0.1726	4.8294	4.7706	0.43483977	0.30305807	44.019	0.21875	13.3404	0.98	-0.5460
w nat	2.6206	38.61	2.15	12.17	0.1767	4.8294	4.7706	0.4451931	0.30805094	45.067	0.22395833	13.8830	1.00	-0.5188
	2.5706	38.66	2.20	12.17	0.1808	4.8294	4.7706	0.45554643	0.31297279	46.115	0.22916667	14.4329	1.02	-0.4916
	2.3706	38.86	2.40	12.17	0.1972	4.8294	4.7706	0.49695974	0.33197936	50.308	0.25	16.7011	1.12	-0.3827
	2.1706	39.06	2.60	12.17	0.2136	4.8294	4.7706	0.53837305	0.34996261	54.500	0.27083333	19.0730	1.21	-0.2739
Límite Plástico	1.9706	39.26	2.80	12.17	0.2301	4.8294	4.7706	0.57978636	0.36700302	58.692	0.29166667	21.5403	1.30	-0.1651
	1.6656	39.565	3.11	12.17	0.2551	4.8294	4.7706	0.64294166	0.39133566	65.086	0.3234375	25.4703	1.44	0.0009
	0.9706	40.26	3.80	12.17	0.3122	4.8294	4.7706	0.78685292	0.44035685	79.654	0.39583333	35.0762	1.77	0.3791
	0.7706	40.46	4.00	12.17	0.3287	4.8294	4.7706	0.82826623	0.45303371	83.846	0.41666667	37.9852	1.86	0.4879
	0.5706	40.66	4.20	12.17	0.3451	4.8294	4.7706	0.86967954	0.46514898	88.039	0.4375	40.9511	1.95	0.5968
	0.3706	40.86	4.40	12.17	0.3615	4.8294	4.7706	0.91109285	0.47673919	92.231	0.45833333	43.9701	2.05	0.7056
	0.1706	41.06	4.60	12.17	0.3780	4.8294	4.7706	0.95250616	0.48783772	96.423	0.47916667	47.0389	2.14	0.8144
	0.0706	41.16	4.70	12.17	0.3862	4.8294	4.7706	0.97321282	0.49321229	98.519	0.48958333	48.5910	2.19	0.8688
Probable umbral	0.0506	41.18	4.72	12.17	0.3878	4.8294	4.7706	0.97735415	0.4942737	98.939	0.49166667	48.9028	2.20	0.8797
	0.0306	41.20	4.74	12.17	0.3895	4.8294	4.7706	0.98149548	0.49533067	99.358	0.49375	49.2150	2.20	0.8906
	0.0106	41.22	4.76	12.17	0.3911	4.8294	4.7706	0.98563681	0.49638323	99.777	0.49583333	49.5277	2.21	0.9015
umbral mín	0.0006	41.23	4.77	12.17	0.3919	4.8294	4.7706	0.98770748	0.49690786	99.987	0.496875	49.6842	2.219	0.9069
	-0.0094	41.24	4.78	12.17	0.3928	4.8294	4.7706	0.98977814	0.49743141	100.196	0.49791667	49.8408	2.22	0.9124
	-0.0294	41.26	4.80	12.17	0.3944	4.8294	4.7706	0.99391947	0.49847523	100.616	0.5	50.1544	2.23	0.9233
Límite líquido	-0.1694	41.40	4.94	12.17	0.4059	4.8294	4.7706	1.02290879	0.50566234	103.550	0.51458333	52.3614	2.30	0.9994
	-1.0294	42.26	5.80	12.17	0.4766	4.8294	4.7706	1.20098603	0.54565818	121.577	0.60416667	66.3395	2.70	1.4674
	-1.0694	42.3	5.84	12.17	0.4799	4.8294	4.7706	1.20926869	0.54736153	122.416	0.60833333	67.0056	2.72	1.4892
	-1.1094	42.34	5.88	12.17	0.4832	4.8294	4.7706	1.21755136	0.54905216	123.254	0.6125	67.6729	2.73	1.5110
	-1.1294	42.36	5.90	12.17	0.4848	4.8294	4.7706	1.22169269	0.54989274	123.673	0.61458333	68.0070	2.74	1.5218
umbral máx	-1.1494	42.38	5.92	12.17	0.4864	4.8294	4.7706	1.22583402	0.5507302	124.092	0.61666667	68.3415	2.75	1.5327
	-1.1894	42.42	5.96	12.17	0.4897	4.8294	4.7706	1.23411668	0.5523958	124.931	0.62083333	69.0113	2.77	1.5545
	-1.2294	42.46	6.00	12.17	0.4930	4.8294	4.7706	1.24239934	0.5540491	125.769	0.625	69.6824	2.79	1.5763
	-1.4294	42.66	6.20	12.17	0.5094	4.8294	4.7706	1.28381265	0.56213571	129.962	0.64583333	73.0561	2.88	1.6851
	-1.6294	42.86	6.40	12.17	0.5259	4.8294	4.7706	1.32522597	0.56993427	134.154	0.66666667	76.4590	2.98	1.7939
	-1.8294	43.06	6.60	12.17	0.5423	4.8294	4.7706	1.36663928	0.5774599	138.346	0.6875	79.8895	3.07	1.9028
	-2.0294	43.26	6.80	12.17	0.5588	4.8294	4.7706	1.40805259	0.58472668	142.539	0.70833333	83.3462	3.16	2.0116
	-3.0294	44.26	7.80	12.17	0.6409	4.8294	4.7706	1.61511915	0.61760824	163.500	0.8125	100.9791	3.63	2.5558
falla	-3.5294	44.76	8.30	12.17	0.6820	4.8294	4.7706	1.71865242	0.63217071	173.981	0.86458333	109.9857	3.86	2.8278
	-4.0294	45.26	8.80	12.17	0.7231	4.8294	4.7706	1.8221857	0.64566471	184.462	0.91666667	119.1005	4.09	3.0999
	-5.0294	46.26	9.80	12.17	0.8053	4.8294	4.7706	2.02925226	0.66988553	205.423	1.02083333	137.6102	4.56	3.6441
	-6.0294	47.26	10.80	12.17	0.8874	4.8294	4.7706	2.23631882	0.69100696	226.385	1.125	156.4336	5.02	4.1883
	-7.0294	48.26	11.80	12.17	0.9696	4.8294	4.7706	2.44338537	0.70958813	247.347	1.22916667	175.5142	5.49	4.7324
	-8.0294	49.26	12.80	12.17	1.0518	4.8294	4.7706	2.65045193	0.72606132	268.308	1.33333333	194.8081	5.95	5.2766
	-9.0294	50.26	13.80	12.17	1.1339	4.8294	4.7706	2.85751849	0.74076599	289.270	1.4375	214.2811	6.42	5.8208
	-10.0294	51.26	14.80	12.17	1.2161	4.8294	4.7706	3.06458505	0.75397243	310.231	1.54166667	233.9058	6.88	6.3649
	-11.0294	52.26	15.80	12.17	1.2983	4.8294	4.7706	3.2716516	0.76589851	331.193	1.64583333	253.6601	7.35	6.9091

Tabla 10 Espesores del material a diferentes límites.

CONCEPTO	DÍA 32	DÍA 39	DÍA 47
PROFUNDIDAD AFECTADA	6.67	7.51	8.95
ESPESOR POR DEBAJO DE wnat	4.18	5.00	4.62
en porcentaje	62.67	66.58	51.62
ESPESOR DE wnat al LÍM. PLÁS.	0.43	0.47	1.19
en porcentaje	6.45	6.26	13.30
ESPESOR DE LIM.PLAS al LÍM. LIQ.	2.01	1.09	1.11
en porcentaje	30.13	14.51	12.40
ESPESOR DE LIM.LIQ al UMBRAL MAX.	0.05	0.95	0.63
en porcentaje	0.75	12.65	7.04
ESPESOR DE UMBRAL MAX A FALLA.	0	0	1.4
en porcentaje	0.00	0.00	15.64
total porcentajes	100	100	100

Tabla 11 Obtención de peso por factores de estabilidad.

CONCEPTO	DÍA 32	DÍA 39	DÍA 47
PROFUNDIDAD AFECTADA	6.67	7.51	8.95
ESPESOR POR DEBAJO DE wnat	4.18	5.00	4.62
$((1746) * ((0.84 + 0.98) / 2) * 4.18$	6641.00	7944.00	7340.00
ESPESOR DE wnat al LÍM. PLÁS.	0.43	0.47	1.19
$((1746) * ((1.00 + 1.44) / 2) * 0.43$	915.00	1001.00	2535.00
ESPESOR DE LIM.PLAS al LÍM. LIQ.	2.01	1.09	1.11
$((1746) * ((1.44 + 2.30) / 2) * 2.01$	6563.00	3559.00	3624.00
ESPESOR DE LIM.LIQ al UMBRAL MAX.	0.05	0.95	0.63
$((1746) * ((2.30 + 2.75) / 2) * 0.05$	220.00	4188.00	2777.00
ESPESOR DE UMBRAL MAX A FALLA.	0	0	1.4
$((1746) * ((2.75 + 3.86) / 2) * 1.4$	0.00	0.00	8079.00
total	14339	16692	24355
PORCENTAJE	1.00	1.1641	1.6985
$6.67 * 1746$	11645	1.2313	1.4334
			2.0915

A partir de los espesores obtenidos de las (figuras. 64, 65 y 66) en el mismo punto, se realizó la (tabla 10) que nos da cuenta de los espesores para diferentes contenidos volumétricos de humedad y poder realizar con sus datos la (tabla 11) nos dice lo húmedo que estaba el material en tres días de importancia de la historia del talud de La Pintada.

La tabla 11 tiene una gran importancia ya que muestra el incremento del peso de los materiales desplazados con respecto a la precipitación. Primero se realizó una rebanada hipotética de 6.67 m de altura por un metro de ancho reportando 11,645 kg. En ella sólo se tenía la humedad natural del 17.6 % y en función de los límites de estabilidad obtenidos anteriormente se concluyó que el peso correspondiente a 32 días era de 23.13 % mayor que el peso inicial, para los 39 días fue del 43.34 % más y por ultimo a los (47 días) se incrementó un 109.15 % (tabla 10) esto nos indica que la capacidad del suelo es rebasada por su propio peso y la gran acumulación de agua en el suelo.

Una correlación del contenido de **w<sub>nat</sub>**, contenido volumétrico, factor de seguridad y límite de estabilidad nos da una idea de cómo serán los valores esperados en un cálculo de estabilidad de taludes con el programa de Geoslope.

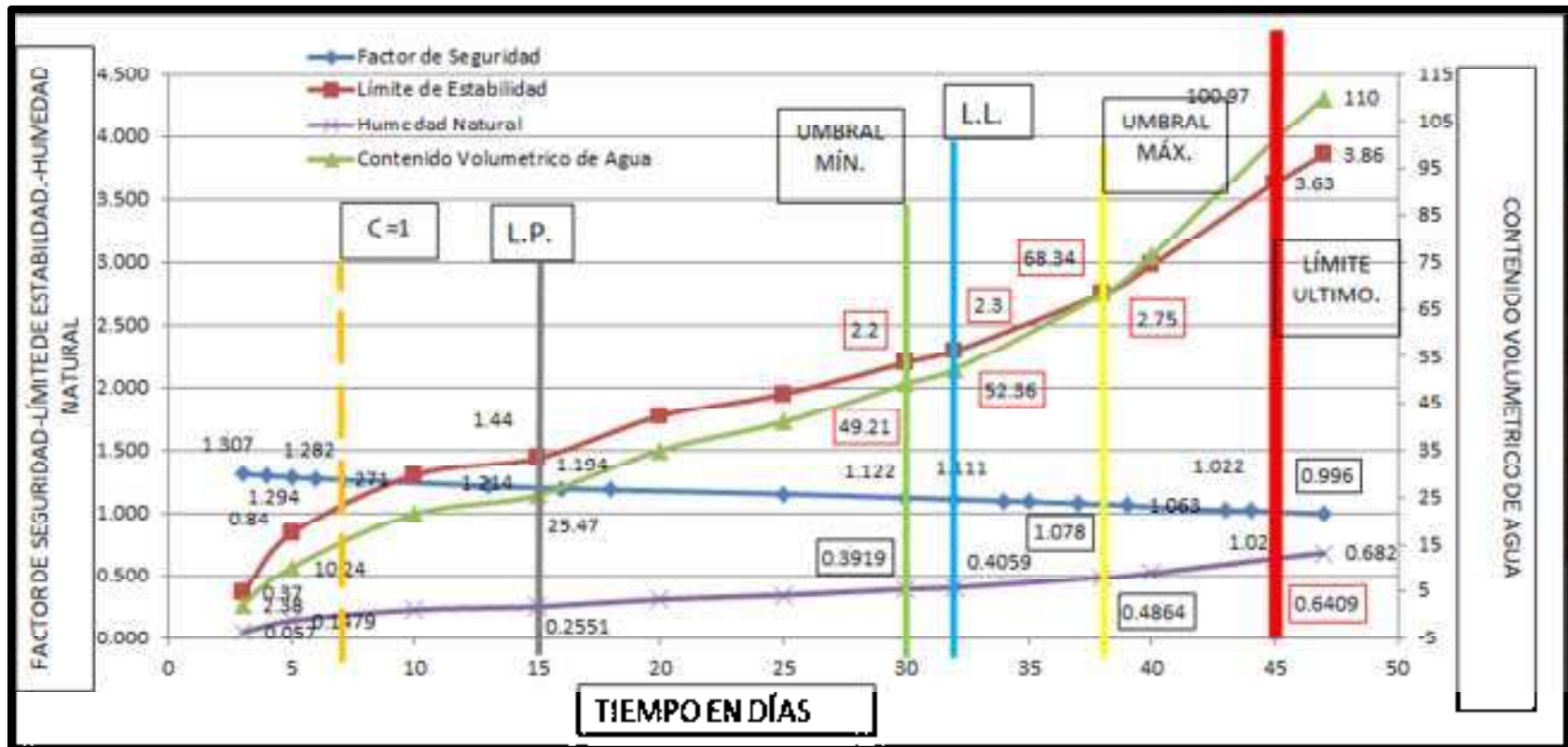


Figura. 67 Gráfica de correlación de factor de seguridad-límites de estabilidad-humedad natural vs contenido volumétrico de agua para una (SM).

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la tabla 12 se muestran la clasificación de Chandler (1991), que realizó en función de los límites del índice de liquidez y los clasificó en cuatro tipos de evento.

Tabla 12 Tipo de movimiento en función de su Índice de liquidez.

TIPO DE EVENTO	LÍMITES de IL
Flujos de lodo ( <i>mudflows</i> )	IL = 0.80 - 1.00
Deslizamiento de Flujo de lodo ( <i>mudslide-mudflows</i> )	IL = 0.50 - 0.80
Deslizamiento Translacional de Flujo de lodo ( <i>mudslide</i> )	IL = 0.30 - 0.50
Deslizamiento de Tierra ( <i>landslide</i> )	IL = 0.00 - 0.30

La comparación de la tabla 12 con el índice de liquidez obtenido para el primer estrato IL= 0.51; el tipo de evento es un: Deslizamiento de Flujo de lodo (*mudslide-mudflows*) y para el segundo IL=0.1 solo Deslizamiento de tierra.

La lluvia penetró en el suelo de la ladera en la parte alta por la vegetación existente, y en la parte media y baja, permitió el flujo hacia la roca y lograr salir si era necesario por la falta de vegetación, no como evapotranspiración sino como flujo, ya que comentaron lugareños que se veían manchas de suelo saturado en la falda.

La localización de un venero en el punto 26 con escurrimiento constante en el año, nos dio una solución de colocar el nivel freático estático en ese punto, logrado lo anterior, se realizó una función en el programa *Geoslope seep/w*.

Se realizaron promedios de la lluvia por periodos cortos hacia atrás del evento, se comenzó de uno en uno y se realizaron los cálculos y se observó como el factor de seguridad evolucionó hasta llegar a un punto donde el factor de seguridad solo se



modificó en cinco milésimas, la lluvia antecesora era constante y menor a cuatro (4 mm.) en promedio 3.25 mm.



Figura. 68 Superposición factor de seguridad fuerza cortante lado derecho.

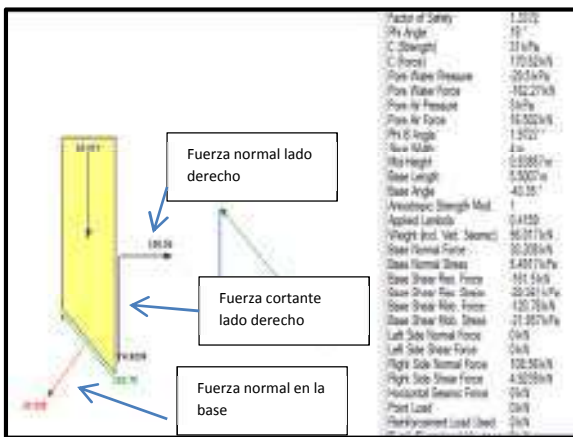


Figura. 69 Diagrama fuerzas fs.=1.337

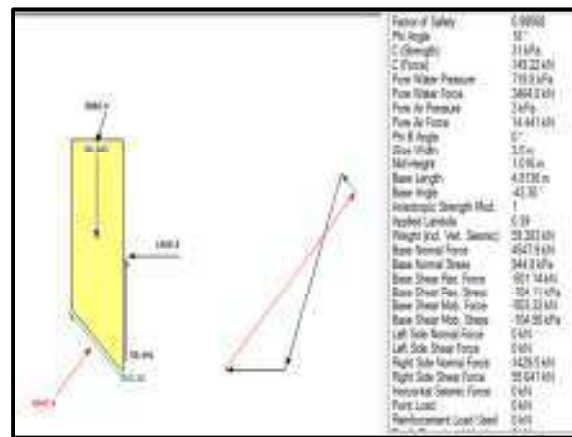


Figura. 70 Diagrama esfuerzo fs.=0.996

Primeramente recordemos que el suelo es puramente compresible es su naturaleza y si recordamos la (figura. 68) aunque no es una curva esfuerzo deformación se puede interpretar así ya que la deformación (es una fuerza aplicada en una área que ocasiona una disminución o aumento de área a un elemento) se podría medir en tiempo y cumpliría con la misma función de una curva esfuerzo-deformación.



Por otro lado la (figura 60) muestra el estado inicial del suelo y las fuerzas que intervienen son de compresión y los de la (figura 61) muestra el cambio de dirección.

De la tabla 4 página 43 se comparan los límites de los precipitación acumulada en diferentes países, está comprendido entre 50 mm y 325 mm a los 30 días para un flujo de barro, por lo que es oportuno mencionar que la precipitación acumulada obtenida está dentro del rango observado en otros eventos similares, el obtenido es de 281.4 mm.

Los límites de estabilidad son propuestos en función de una prueba sencilla que se puede realizar a bajo costo y que nos puede ayudar a entender un análisis de estabilidad de laderas.

Deberá de realizar un nuevo modelo más completo incluyendo nuevas condiciones de frontera para ver si cambian los datos obtenidos.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el análisis realizado el detonante principal fueron las lluvias que se presentaron en la temporada de Agosto a Septiembre del 2013 en la región de La Pintada y en general en el país.

El objetivo general se cumplió obteniéndose el umbral mínimo de 139.9 mm y el umbral máximo de 191.4 mm.

Los objetivos particulares se cumplieron con la obtención de las propiedades de los materiales físico-mecánicas y la adecuación de la curva característica del suelo teórica, a su vez la obtención de los modelos hidráulicos con variación de lluvia, obteniéndose los datos de presión de poro que influyen en la estabilidad de taludes a diferentes días con el programa seep/w y el modelo de estabilidad de taludes que obtuvo los datos de presión de poro del modelo hidráulico para calcular el factor de seguridad por el método de M-P con el programa slope/w.

El inicio de la lluvia antecesora que afectó al evento del deslizamiento o que tenía alguna influencia directa en las propiedades mecánicas o físicas del material, lo que nos llevó a comenzar nuestros cálculos el 1° de agosto del 2013.

Se demuestra en este trabajo que la influencia de las lluvias antecesoras de más de 3.2 mm por tres días consecutivos fueron de gran importancia y representan influencia directa en el comportamiento de la ladera estudiada, disminuyendo el factor de seguridad en cuando menos 5 milésimas.

Se comprueba que precipitaciones de cuando menos 3.0 mm por más de treinta días cumplirían el umbral mínimo de 139.9 mm necesarios para empezar a desestabilizar un talud de arena limosa.

El deslizamiento fue de tipo rotacional por cortante debido a las características observadas en el lugar y por el ajuste del modelo a la realidad se produjeron en dos etapas y posteriormente como un flujo de lodo (*Mud flow*).

El material que colapsó fue la arena limosa del primer estrato y fue debido al exceso de agua acumulada en la superficie en sus primeros nueve metros, llevando al material de la profundidad de 13.88 m a un incremento de las fuerzas cortantes en la base, hasta exceder su límite de carga y fallando por cortante.

El talud se empezó a desestabilizar a los 32 días en su esfuerzo cortante en la base, sufriendo un incremento de 175 veces al día anterior en el esfuerzo cortante y el valor del umbral mínimo en lluvia para ese día es de 139.6 mm.

El umbral máximo es la cantidad de precipitación en la que el suelo comienza perder su propiedad elástica y de ser dúctil, se convierte en un material plástico, entra en una fase de fluencia plástica-rígida de no recuperación y antecesor a su falla. Este umbral es el día 39 y el valor de lluvia es de 191.4 mm.

Se consideró 281.4 mm. Como el 100 % de lluvia reconocida para el colapso, entonces 139.9 mm equivale al **49.7 %** y 191.4 el **68.0 %** se necesita un incremento del 20 % en términos generales para emitir una alerta temprana.

Se establece que la precipitación acumulada para el colapso de la ladera de la pintada necesito solo 281.4 mm acumulados para colapsar.

Se establece que el cambio de compresión a tensión o sea el eje neutro coincide con el valor de 1.3 del factor de seguridad y posteriormente en la zona de incremento de cortante entre los días 32 y 33 cruza en 1.1 con ello se reafirma que los límites del factor de seguridad son:

Un factor de seguridad por arriba de 1.30 peligro BAJO o ningún problema para el suelo ya que su esfuerzo cortante es estable, es compresional. Cuando el factor de seguridad está comprendido entre **1.30 < F.S. < 1.10** el suelo presenta esfuerzos proporcionales en tensión y dependerá de las características del suelo para soportarlo POR LO QUE SE CONSIDERA PELIGRO MEDIO, si **1.10 < F.S. < 1.00** el suelo entra en la última etapa de fluencia dúctil y se convierte en plástico y entrar en una fase fluencia plástica-rígida de no recuperación por lo que se considera DE PELIGRO ALTO, Y SI **F.S. < 1.00** LA FALLA DE UNA LADERA.

Por otro lado determinar una correlación EL LÍMITE DE ESTABILIDAD DE UN LADERA ( $\zeta$ ) es útil y de gran ayuda, porque nos ayuda a entender el comportamiento de un suelo húmedo y determina rangos esenciales en la mecánica de suelos y tomarse la libertad de realizar una prueba simple y económica como son los límites de consistencia y determinar sus propiedades índice y calcular su contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) para cada uno de las variantes de humedad recomendando se realice desde el cinco % de  $w$  natural hasta 100 % y determinar los límites de estabilidad.

UN SUELO CON UN **0 <  $\zeta$  < 1** EL SUELO SECO ES ESTABLE

UN SUELO CON UN **1 <  $\zeta$  < 1.44** EL SUELO ELÁSTICO-PLÁSTICO ES MEDIA ESTABILIDAD

UN SUELO CON UN **1.44 <  $\zeta$  < 2.22** EL SUELO DÚCTIL ES POCO ESTABLE

UN SUELO CON UN **2.22 <  $\zeta$  < 2.30** EL SUELO ESTA SEMI-LIQUIDO y FLUENCIA PLÁSTICA RIGIDA ESTABILIDAD NULA

UN SUELO CON UN **2.30 <  $\zeta$  < 2.75** EL SUELO FLUYE (probable falla)

UN SUELO CON UN  $2.75 < \zeta < 3.86$  EL SUELO SUPER FLUJO NULA ESTABILIDAD (falla inminente).

Es recomendable utilizar el umbral obtenido para laderas que presenten condiciones de material semejantes, y realizar pruebas físicas de clasificación de suelos y se compruebe que se trata de un material parecido y poder tener en términos generales una posible emisión de alerta temprana, si se llega a lluvias acumuladas semejantes y en pendientes que tengan población en su cima recomendando realizar estudios oportunos con la finalidad de conocer su umbral específico.

Como conclusión general se obtiene que la lluvia modifica las propiedades de estabilidad de un suelo, disminuyendo el factor de seguridad en sobre manera y que hay límites definidos que se pueden interpretar antes de que suceda una tragedia.

## REFERENCIAS

- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS (2004). *international standard world wide*. section four construction, volumen 04.08 soil and rock (i): astm c 117, astm c 127-15, astm c 136., astm d 1140., astm d 1452., astm d 1586., astm d 1587. astm d 2166 -06, astm d 2435-80, astm d 2488-75, astm d 2850 -03<sup>a</sup> (2007), astm d 3740, astm d 422, astm d 4318-84, astm d 95.
- ARISTIZABAL, (2007). características, dinámica y causas del movimiento en masa del barrio el socorro (31 de mayo de 2008) en medellín revista eia, issn 1794-1237 número 10, p. 19-29.
- AYALA, F.J.; ANDREU, F.J.; FE, M.; FERRER, M.; DE SIMÓN, A.; FERNÁNDEZ, I.; OLALLA, C.; GÓMEZ, J.; SAN PEDRO, J. Y CIENFUEGOS, F.J. (1987). "manual de taludes". serie geotecnia. igme. madrid. 456 pp.
- BRAND, E.W., (1992). slope instability in tropical areas. proc. of the vi international symposium on landslides, christchurch, vol. 3. balkema, rotterdam, pp. 2031–2051
- CAINE N (1980). the rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. geografiska annaler series a-physical geography 62: 23-27
- CAMPBELL, R.H. (1975). soil slips, debris flows, and rainstorms in the santa monica mountains and vicinity, southern california. u.s. geological survey professional paper 851. washington dc, 51 pp.
- CAMPBELL, R.H. (1975). soil slips, debris flows, and rainstorms in the santa monica mountains and vicinity, southern california. u.s. geological survey professional paper 851. washington dc, 51 pp.
- CANCELLI A., NOVA R., (1985). landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in valtellina (central alps-italy) proc. iv int. conf. and field workshop on landslides, tokyo 267-272.
- CANNON SH, GARTNER JE (2005). wildfire-related debris flow from a hazards perspective. in: debris flow hazards and related phenomena (jakob m, hungro, eds). springer berlin heidelberg, 363-385
- TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)

- CANNON, S.H., AND ELLEN, S.D. (1985). rainfall conditions for abundant debris avalanches in the san francisco bay region, california: *california geology*, 1985, 38(12), 267-272.
- CERIANI, M., LAUZI, S., AND PADOVAN, N. (1994) rainfall thresholds triggering debris-flows in the alpine area of lombardia region, central alps – italy, *proc. man and mountain, i conv. intern. per la protezione e lo sviluppo dell’ambiente montano, ponte di legno (bs)*, 123–139.
- CHANDLER (1991). stability of soil slope msc. lectura notes
- COROMINAS, J. & ALONSO, E. (1984). inestabilidad de laderas en el pirineo catalán. tipología y causas. *jornadas sobre inestabilidad de laderas en el pirineo. barcelona*, c.1-c.53
- COROMINAS, J. & GARCÍA YAGÜE A. (1997). terminología de los movimientos de ladera. i v simposio nacional sobre taludes y laderas inestables. granada. vol. 3,1051-1072.
- COROMINAS, J. & MOYA, J. (1999). reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the llobregat river basin, eastern pyrenees, spain. *geomorphology*, 30, 79-93
- COROMINAS, J. (2000). landslides and climate. en bromhead, e., dixon, n. y ibsen, m.l. (eds.): keynote lecture of proceedings of the 8th international symposium on landslides. balkema, cardiff, wales, 1-33.
- COROMINAS, J.; MOYA, J.; LEDESMA, A.; RIUS, J.; GILI, J.A. & LLORET, A. (1999). monitoring of the vallcebre landslide, eastern pyrenees, spain. *proceedings international symposium on slope stability engineering: is-shikoku’99. matsuyama. japan*, vol. 2: 1239-1244
- CROSTA GB, FRATTINI P (2001). rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. in: mediterranean storms (mugnai a, guzzetti f, roth g, eds), *proceedings of the 2nd egs plinius conference on mediterranean storms. siena, italy*, 463-487
- CROSTA, G., (1998). regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. *environmental geology* 35 (2–3), 131–145.

- CROSTA, G., FRATTINI, P., AND STERLACCHINI, S. (2001). *valutazione e gestione del rischio da frana. regione lombardia, milano*, 169 pp., 2001.
- CROSTA, G.B., FRATTINI, P. (2003). *distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. natural hazards and earth system sciences* 3 (1-2), 81-93.
- CROZIER, (1996). *sin referencia.*
- CROZIER, M.J., (1999). *prediction of rainfall triggered landslides: a test of the antecedent water status model. earth surface processes and landforms* 24, 825–833.
- D.G. FREDLUND AND A. XING (1994). “*equation for the soil-water characteristic curve*” *departamento of civil engineering, university of saskatchewan, canadian geotechnical journal*, pp. 521-532
- DANTE J. MORÁN-ZENTENO, BÁRBARA MARTINY GUSTAVO TOLSON, GABRIELA SOLÍS-PICHARDO, LETICIA ALBA-ALDAVE, MA. DEL SOL HERNÁNDEZ-BERNAL, CONSUELO MACÍAS-ROMO, RAYMUNDO G. MARTÍNEZ-SERRANO, PETER SCHAAF, GILBERTO SILVA-ROMO. (2000). *geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la sierra madre del sur boletín de la sociedad geológica mexicana v. liii, 27-58*
- DELMONACO ET. AL., (1999). *sin referencia*
- FERRER, M. (1988). “*deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas*”. en: *riesgos geológicos. serie geología ambiental. igme. madrid. pp. 175-192*
- FREDLUND, D.G AND KRAHN, J (1977). *comparison of slope stability methods of analysis, canadian geotechnical journal, vol. 14 pp. 429-439.*
- FREDLUND, D.G AND KRAHN, J (1981). *the relationship between limit equilibrium slope stability methods proceedings of the international conference on soil mechanics and foundation engineering, vol. 3 pp. 409-416 stockholm, sweden. 1981*
- GARCÍA Y CONABIO (1998). *mapa 1:100000*
- GARCÍA-YAGÜE, A. & GARCÍA-ÁLVAREZ, J. (1988). *grandes deslizamientos españoles. ii simposio sobre taludes y laderas inestables. andorra la vella, 599-612.*
- GARDUÑO-MONROY, HERNÁNDEZ-MADRIGAL Y TOSCA-DELGADO, (2013). *deslizamiento la pintada, guerrero. secretaria de desarrollo agrario, territorial y urbano,*
- TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)



- fideicomiso fondo nacional de habitaciones populares y grupo de oro. morelia mich. 4 de octubre del 2013.
- GEO-SLOPE. SEEP/W (2007). manual de modelado filtraciones con seep/e, versión 2007, calgary, alberta, canada. geo-slope international ltd.
- GEO-SLOPE. SLOPE/W (2007). *manual de modelado de estabilidad*, versión 2007, calgary, alberta, canada. geo-slope international ltd.
- GLADE, T., CROZIER, M. & SMITH, P. PURE APPL. GEOPHYS. (2000). applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “antecedent daily rainfall model 157: 1059. doi: 10.1007 /s000240050017
- GONZÁLEZ L., FERRER M., ORTUÑO L. Y OTEO C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall, España.
- GOVI, M., MORTARA, G., AND SORZANA, P. F. (1985). eventi idrologici e frane, geologia applicata ed idrogeologia, xx, part ii, 359–375.
- GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M, STARK CP (2008). the rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. landslides 5: 3-17
- HERNÁNDEZ MADRIGAL V.M (2001). “caracterización y estudio de la arcilla y estudio geomorfológico del movimiento de masas de san miguel del monte, michoacán, méxico tesis de maestría, instituto de investigaciones metalúrgicas –umsnh pp. 95.
- HUTCHINSON. J. N. (1968). "mass movement". en fairbridge. r. w. (ed.), encyclopedia of earth sciences, reinhold, new york, pp. 688-695
- HUTCHINSON. J. N. (1988). "general report morphological and geotechnical parameters if landslides in relation to geology and hydrogeology", in bonnard, c. (ed.). proceedings of the International symposium on landslides, a. a. balkema, rotterdam, netherlands, vol. i, pp. 3-35.
- IRASEMA ALCÁNTARA AYALA, ALFONSO ECHEVARRÍA LUNA, CARLOS GUTIÉRREZ MARTÍNEZ, LEOBARDO DOMÍNGUEZ MORALES E IGNACIO NORIEGA RIOJA (2001). inestabilidad de laderas cenapred isbn: 970-628-615-2 pp. 3
- IVERSON, R.M. (2000). landslide triggering by rain infiltration. water resour res 36(7):1897–1910
- TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA (GEOTECNIA) U.M.S.N.H. [Agcasillas](#)

- JIBSON RW (1989). debris flow in southern porto rico. geological society of america, special paper 236, 29–55
- LAN, H.; ZHOU, C.; LEE, C. F.; WANG, S. AND WU F. (2003). rainfall-induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure- a case study of natural terrain landslide in hong kong. science in china, vol. 46 (suppl.), p. 52-68.
- LARSEN, M. C. (2008). “rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies”. *advances in geosciences*, vol. 14 (january), pp. 147-153.
- LUMB P. (1975). slope failatures in hong kong. quartely journal of enginnering geology 8: 31-65
- MAPLES-VERMEERSCH (1992). mapa 1:100000
- MONTGOMERY, D.R., DIETRICH, W.E., (1994). a physically-based model for the topographic control on shallow landsliding. water resources research 30, 1153–1171.
- MORGENSTERN, N.R., AND PRICE, V.E., 1965. the analysis of the stability of general slip surfaces. geotechnique, vol. 15, pp. 79-93.
- P J FINLAY, R FELL, P K MAGUIRE (1997). the relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall, *canadian geotechnical journal*, 1997, 34(6): 811-824
- REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; DE VITA, P. AND GUZZETTI, F. (1998). “regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy)”. *environmental geology*, vol. 35, no. 2-3, pp. 146-159.
- REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; DE VITA, P. AND GUZZETTI, F. (1998). “regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy)”. *environmental geology*, vol. 35, no. 2-3, pp. 146-159.
- SHARPE C., F.S. (1938). landslides and related phenomena, columbia university press, new york
- SPENCER, E. (1967). a method of analysis of the stability of embankerments assuming parallel interlice forces, geotecnique, 17, pp. 11-26.

TERLIEN, M. T. J. (1998). "the determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds". *environmental geology*, vol. 35, no. 2-3, pp. 124-130.

V.M. HERNÁNDEZ Y OTROS 2016.

WHITE, I.D., MOTTERSHEAD, D.N. Y HARRISON, J.J. (1996). *environmental systems*, 2nd ed. chapman & hall, london, 616 pp.

WIECZOREK, G.F. (1987). effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central santa cruz mountains, california. geological society of america. *reviews in engineering geology*, 7, 93-104.

WIECZOREK, G.F. (1996). landslide triggering mechanisms. en: turner, a.k. y schuster, r.l. (eds): *landslides: investigation and mitigation*. transportation research board, national research council, special report, washington dc, 76-90.