

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Proceso de Estabilización del Deslizamiento de LLacao

Proyecto técnico

Daniel Alejandro Burbano Barzallo

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 15 de mayo de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO POLITÉCNICO

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Proceso de Estabilización del Deslizamiento de LLacao

Daniel Alejandro Burbano Barzallo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Magno Rivera Z., Magister en
Geotecnia

Firma del profesor

Quito, 15 de mayo del 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Daniel Alejandro Burbano Barzallo

Código: 00106922

Cédula de Identidad: 171573470-1

Lugar y fecha: Quito, mayo del 2017

DEDICATORIA

Este trabajo dedico a Dios, a mi padre Edison Guillermo Burbano J., mi madre María del Carmen Barzallo V., a mi hermano Guillermo Burbano Barzallo, a mi abuela Lila Valdivieso, a mi novia Alejandra Villavicencio R. y a mis compañeros de carrera. Gracias por acompañarme en este gran hito de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la USFQ y especialmente a los profesores de ingeniería civil, que me brindaron el conocimiento para poder ser un gran profesional. A mis padres que con su esfuerzo y su amor lograron que me convierta en una persona de bien. A mi hermano y mi abuela que siempre me brindaron buenos consejos ante las adversidades. Y a mi novia Alejandra que ha estado en los buenos momentos y especialmente en los malos apoyándome incondicionalmente. A todos ustedes, gracias de todo corazón.

RESUMEN

El siguiente trabajo comprende un estudio de factores de seguridad de la amenaza que yace en la parroquia de Llaoca. Este macro deslizamiento tiene un área de aproximadamente 1.5 Km² en diferentes estados: activo, latente y relictos. Existe una presión de parte de propietarios de terrenos desocupados en la parroquia para seguir construyendo viviendas dentro del deslizamiento. Este estudio comprende una revisión de la literatura para continuar con las partes para la investigación de deslizamiento que son: estudios topográficos, geológicos, hidrológicos, geotécnicos que proveerán información para el estudio de factores de seguridad que autorizarán o no la actividad de la construcción en la zona.

Palabras clave: Suelo, esfuerzos, hidrología, geología, pendiente, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer, cohesión, factor de seguridad.

ABSTRACT

The following work includes a study of the safety factors of the threat that lies in the parish of Llaçao. This macro slide has an area of approximately 1.5 Km² in several states: active, latent and relict. There is a pressure from landowners who have unused lands in the parish, to continue with the construction activity in the landslide. This study includes a review of the literature to continue with the necessary information to analyze slope instability, this information comprehends: topographical investigation, study of the local geology, hydrology of the zone, geotechnical studies that test information for the study of safety factors that authorize or not the construction activity in area

Key words: Soil, stress, hydrology, geology, slope, Bishop, Morgenstern-Price, Spencer, cohesion, safety factor

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVO GENERAL	4
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2. DESARROLLO DEL TEMA.....	5
2.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES	5
2.1.1. INGENIERIA GEOLÓGICA.....	5
2.1.2. FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE SUELOS	10
2.1.3. LOS TERRENOS INESTABLES Y LA APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA	20
2.1.4. INFLUENCIA DE LA CARGA SÍSMICA EN INESTABILIDAD DE TALUDES. ..	31
2.1.5. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS IN SITU.....	35
2.1.6. FACTOR DE SEGURIDAD Y MODELOS DE ANALISIS	39
2.2. INVESTIGACIÓN DESARROLLADA EN EL DESLIZAMIENTO DE LLACAO	47
2.2.1. PROCESO DE INVESTIGACIÓN PARA DESLIZAMIENTOS	47
2.2.2. TOPOGRAFÍA DE LA ZONA E IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA	48
2.2.3. ESTUDIOS GEOLÓGICOS DE LA ZONA.....	50
2.2.4. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS DE LA ZONA	52
2.2.5. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS REALIZADAS.....	57
2.3. APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA EN EL CASO DE ESTUDIO	62
2.3.1. DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE ANÁLISIS.....	63
2.3.2. MODELACIÓN EN SOFTWARE	64
2.3.3. FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS.....	64
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM de Llaeo	1
Tabla 2. Formaciones geológicas frente al agua (González de Vallejo, 2002)	7
Tabla 3. Relación de permeabilidad con infiltración (Suarez, 2009)	8
Tabla 4: características de los suelos sedimentarios (Suarez, 1998)	9
Tabla 5. Depósitos de suelo y rocas. (Valverde, 2013)	11
Tabla 6. Relaciones volumétricas y gravimétricas de un suelo (Das & Cera, 2001)	13
Tabla 7. Elementos de un talud/ladera. (Suarez, 2009)	23
Tabla 8. Elementos de un deslizamiento. (Suarez, 2009)	25
Tabla 9. Clasificación de los perfiles de suelo (NEC_SE_DS, 2015)	32
Tabla 10. Coeficiente de amplificación Fa (NEC_SE_GC, 2015)	35
Tabla 11. Resistividad eléctrica para distintos suelos (Suarez, 2009)	36
Tabla 12. Resistividad eléctrica para distintos suelos (González de Vallejo, 2002)	36
Tabla 13. Resistividad eléctrica para distintos suelos (Rivera M., 2009)	37
Tabla 14. Factores de Seguridad mínimos (NEC_SE_GC, 2015)	39
Tabla 15. Coordenadas del área de estudio.	48
Tabla 16. Precipitaciones críticas anuales (Corpac, 2013)	54
Tabla 17. Resultados de sondeos directos e indirectos (Rivera, 2009)	59
Tabla 18. Resumen de parámetros geo mecánicos del estudio de suelos (Rivera, Estudio para la estabilización del deslizamiento de Llaeo, Consultoria, 2013)	61
Tabla 19. Parámetros Físico-Mecánicos (PRECUPA, 1998)	61
Tabla 20. Factores de seguridad Perfil 1	65
Tabla 21. Factores de seguridad Perfil 2	67
Tabla 22. Factores de seguridad Perfil Activo	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Área de estudio de la parroquia de Llacao (Google Maps, 2017).....	2
Ilustración 2. Hidrología e Hidrogeología. (Suarez, 2009)	6
Ilustración 3. Perfil Estratigráfico (Valverde, 2013)	10
Ilustración 4. Esquema general de una ladera en un suelo residual de granito. (Suarez Díaz, 2009).....	11
Ilustración 5.a) Suelo estado natural. b) Tres fases de un suelo. (Das & Cera, 2001)	12
Ilustración 6. Límites de Atterberg (Das & Cera, 2001)	13
Ilustración 7. Carta de Plasticidad (Das &Cera, 2001)	14
Ilustración 8. Esquema de clasificación de suelos. (Díaz Rodríguez, 2014).....	15
Ilustración 9. Representación de un suelo saturado sometido a esfuerzos normales. (Suarez, 2009).....	17
Ilustración 10. Envolvente de falla y círculo de Mohr. (Suarez, 2009)	18
Ilustración 11. Deslizamiento en el sector Reina De La Paz parroquia Llacao (M. Rivera, abril 2017).....	21
Ilustración 12. Fluage. (Parent J.,1988.).....	22
Ilustración 13. Ladera (Izq.) Talud (Der.) (Suarez, 2009).....	24
Ilustración 14. Deslizamiento esquemático, rotacional. (Suarez, 2009)	25
Ilustración 15. Deslizamiento de tipo rotacional. (Suarez, 2009)	26
Ilustración 16. Deslizamiento traslacional. (Suarez, 2009).....	27
Ilustración 17. Efecto del agua en un suelo. (Suarez, 2009)	29
Ilustración 18. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (NEC-SE-DS, 2015).....	34
Ilustración 19. Talud infinito con infiltración (Das & Cera, 2001).....	40
Ilustración 20. Espiral Logarítmica (Suarez, 2009)	41
Ilustración 21. Talud por método de Fellenius (Suarez, 2009)	42
Ilustración 22. Fuerzas actuantes en dovelas por método Fellenius (Duncan y Wright, 2005).....	42
Ilustración 23. Interacción de fuerzas por método de Bishop (Duncan y Wright, 2005).....	43
Ilustración 24. Figura de deslizamiento y diagrama para determinación de factor (Suarez, 2009).....	44
Ilustración 25. Interpretación del método de Spencer (Huang, 2014).....	45
Ilustración 26. a) Potencial superficie de falla. b) Fuerzas actuantes en una dovela. (Morgenstern N.R. & Price V.E., 1956).....	46
Ilustración 27. Topografía de Llacao (Google Maps)	48
Ilustración 28. Deslizamiento de Llacao (Rivera M, 2009)	49
Ilustración 29. Formaciones y miembros geológicos parroquia de Llacao (PRECUPA, 1998)	51
Ilustración 30. Formación existente en la parroquia de Llacao (Hugerbuhler, 2002).....	51
Ilustración 31. Diagrama esquemático de las principales entradas de agua en un deslizamiento (Chapeau & Durville, 2005).....	52
Ilustración 32. Precipitación anual desde 1989-2013 (Corpac, 2013)	53
Ilustración 33. Precipitación periodos críticos (Corpac, 2013)	55
Ilustración 34. Ubicación sondeos eléctricos verticales (Rivera M., 2009).....	57
Ilustración 35. Sondeos directos (Rivera M., 2013).....	58

Ilustración 36. Estratigrafía de Llaeo	60
Ilustración 37. Perfiles: Perfil 1: Latente+Activa, Perfil 2: Latente, Perfil 3: Activo.....	63
Ilustración 38. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.	66
Ilustración 39. Análisis dinámico material débil, nivel freático 5 m de prof.	66
Ilustración 40. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 5 m de prof.....	66
Ilustración 41. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.....	67
Ilustración 42. Análisis dinámico material débil, nivel freático 5 m. de prof.	68
Ilustración 43. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 5 m. de prof.....	68
Ilustración 44. Análisis estático, nivel freático 1 m de prof.	70
Ilustración 45. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.	70
Ilustración 46. Análisis estático, nivel freático 10 m de prof.	70
Ilustración 47. Análisis dinámico material débil, nivel freático 1 m de prof.	71
Ilustración 48. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 10 m de prof.....	71

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

“Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año” (Suárez Díaz, 2009).

En la parroquia de Llacao, ubicada en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, existe una presencia notable de deslizamientos que amenazan con la integridad de las edificaciones y una complicación ante futuros proyectos que se deseen realizar en la zona.

Según la página web de la parroquia de Llacao (2011), esta se ubica a una distancia de 14 Km de la ciudad de Cuenca; tiene un área de aproximadamente de 57.4 Km² y una altitud de 2680 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a su relieve se destaca por su topografía accidentada como valles, ensenadas, quebradas a lo largo de toda el área. El área de estudio se encuentra delimitado por las siguientes coordenadas

COORDENADAS UTM		LATITUD/LONGITUD	
X (ESTE)	Y (NORTE)	LAT	LONG
728000	9685000	-2.848045145	-78.948943512
730000	9687000	-2.829930521	-78.930991826

Tabla 1. Coordenadas UTM de Llacao



Ilustración 1. Área de estudio de la parroquia de Llaqueo (Google Maps, 2017)

1.2. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los últimos siete años (o más), la presencia de deslizamientos ha amenazado continuamente a la comunidad. El medio de comunicación impreso *El Tiempo* (2009), publicó la reactivación de deslizamientos que amenazaron a 26 viviendas habiendo destruido ya 14 casas en ese entonces activando el comité de operaciones emergentes para declarar como una zona de emergencia. De la misma manera, el mismo medio publica en el año 2012 otra noticia de deslizamientos que afectaban a cuatro casas que presentaron ya fallas estructurales debido a la presencia de agua a menos de un metro de profundidad. Dos años después, el diario *El Mercurio* (2014) publica una noticia haciendo énfasis en el control de deslizamientos de tierra en la parroquia. “Este territorio, según el Municipio de Cuenca, está en una zona de riesgo, al igual que otras parroquias cercanas como Sidcay y Octavio Cordero, debido a la inestabilidad del suelo” (*El Mercurio*, 2014).

Así mismo, el gobierno autónomo descentralizado municipal del cantón Cuenca, ha creado estudios pertinentes para la zona, identificando las características de los deslizamientos y

clasificándolos según su peligrosidad. En el presenta año, se ha desarrollado una actualización de la zona la cual indica el estado actual de los deslizamientos especialmente el de Llacao.

Sin embargo, la situación en la zona se convierte en un estado de emergencia para las familias asentadas a lo largo de la parroquia. Actualmente en la zona, existe aproximadamente siete deslizamientos en estado sub-estables o relictos y latentes.

El área de influencia del deslizamiento de Llacao, comprende aproximadamente 150 hectáreas las cuales se encuentra en distintos estados simultáneamente: relictos, latente y activo. Existe una presión social la cual exige la autorización para la construcción de viviendas en la zona, sin embargo, las condiciones actuales del deslizamiento aparentan no permitir desarrollar esta actividad. El propósito de este estudio se basa en la obtención de los factores de seguridad los cuales servirán para establecer el estado del deslizamiento y así determinar la factibilidad de construir o no en la zona afectada.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Estudio del deslizamiento de Llaeo para desarrollo urbano.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Conocer la metodología a seguir en la investigación geotécnica para que una obra de ingeniería civil sea estable.

Determinar las propiedades físico-mecánicas de los suelos

Determinar los factores de seguridad para la construcción de obras de infraestructura dentro del deslizamiento.

2. DESARROLLO DEL TEMA

2.1. REVISIÓN DE LA LITERATURA PARA LA ESTABILIDAD DE TALUDES

2.1.1. INGENIERIA GEOLÓGICA

2.1.1.1. Concepto de ingeniería geológica.

“La ingeniería geológica es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y del ambiente producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico” (González de Vallejo, 2002). Dentro de esta ciencia, la importancia de conocer los antecedentes históricos, características de los materiales en la zona de proyecto y conocer la amenaza que estas supondrían para la obra, son factores que se debe considerar de suma importancia juntamente con un estudio geotécnico para asegurar desde el inicio la integridad del proyecto, e inclusive de la sociedad.

Es importante considerar en la geología, la anatomía del planeta para tener un conocimiento histórico de la proveniencia de los materiales que implica en esta ciencia. La estructura de la tierra se compone de cuatro capas que forman el radio de nuestra esfera. Núcleo interno se considera solido (hierro y níquel) y se ubica entre 5000 km y 6000 km de profundidad. Núcleo exterior considerado liquido (gracias a ondas S) y tiene una profundidad entre 2900 km y 5000 km. El manto se encuentra en estado plástico (magma) con un espesor de 2900 km. Y finalmente tenemos la litosfera donde se encuentra la corteza terrestre entre 100 a 150 km de espesor y es donde se ubica toda la composición rocosa.

2.1.1.2. Concepto de Hidrología e Hidrogeología

“La hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos” (Aparicio Mijares, 1993).

La hidrogeología por otro lado, es el flujo del agua en un plano subterráneo los cuales son también conocidos como acuíferos. “El termino acuífero es utilizado para hacer referencia a aquellas formaciones geológicas en las cuales se encuentra agua y que son permeables permitiendo así el almacenamiento de agua en espacios subterráneos y cederlo para su aprovechamiento.” ("Definición de Acuífero", n.d.).

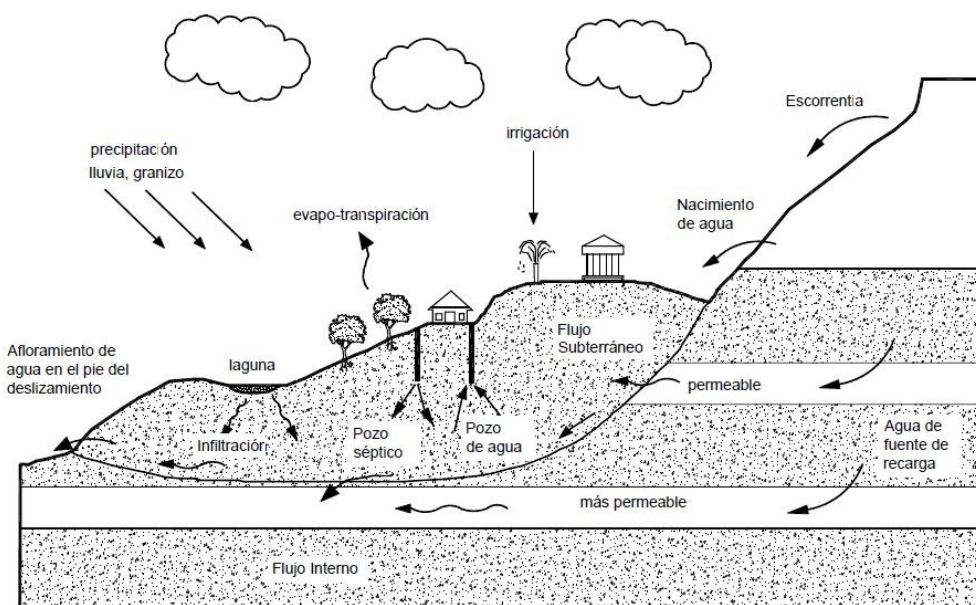


Ilustración 2. Hidrología e Hidrogeología. (Suarez, 2009)

Existen cuatro grupos principales de formaciones hidrogeológicas definidas a continuación:

	Capacidad de Almacenar	Capacidad de drenar	Capacidad de transmitir	Formaciones características
ACUIFEROS	ALTA	ALTA	ALTA	Gravas, arenas grano grueso, calizas
ACUITARDOS	ALTA	MEDIA/BAJA	BAJA	Limos, arenas limosas y arcillosas
ACUICLUDOS	ALTA	MUY BAJA	NULA	Arcillas
ACUIFUGOS	NULA	NULA	NULA	Granitos, gneises, mármoles

Tabla 2. Formaciones geológicas frente al agua (González de Vallejo, 2002)

Como se puede observar en la tabla, el flujo del agua, al menos en un cuerpo subterráneo dependerá de su porosidad que esta tenga para poder tener otra distribución. La porosidad según Das B (2001), depende de factores como la viscosidad, la distribución y tamaño de los poros, la estructura geológica por donde se encuentra, etc. Teniendo en cuenta estos factores, el agua se moverá y también tendrá una altura dentro del perfil, es decir, el agua puede estar prácticamente en la superficie como no puede haber. La altura de agua que esta tenga en un suelo es también conocido como el nivel freático; este tendrá un impacto significativo más adelante.

La precipitación, como proceso hidrológico, incide directamente dentro de la hidrogeología debido a que el flujo de agua reposará sobre una superficie que en este caso es el suelo y dependerá de factores geométricos de la superficie, vegetales y tipo de suelo. Un factor muy importante es la infiltración el cual se define como “el movimiento de agua a través de una superficie de suelo y hacia adentro del mismo producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares” (Aparicio Mijares, 1993).

La infiltración del agua sobre la superficie de la tierra, es uno de los factores detonantes o disparadores responsables de la generación de fenómenos de inestabilidad de terrenos ya que, como se verá más adelante, la presión de poro aumenta en los suelos de granulometría fina

(limos, arcillas y arenas) y la resistencia al cortante disminuye. De esta manera, la infiltración puede dividirse en dos partes: parte contribuyente hacia suelos no saturados y la recarga al sistema ya saturado (Suarez, 2009).

Suelo	Conductividad hidráulica (permeabilidad) K (cm/seg)	Capacidad de infiltración (mm/hora)
Arcillas	$< 10 \times 10^{-9}$	0.25 a 2.5
Limos	1×10^{-9} a 1×10^{-7}	2.5 a 8
Arenas finas	1×10^{-7} a 1×10^{-5}	8 a 13
Arenas gruesas	1×10^{-5} a 1×10^{-2}	13 a 20
Gravas	$> 1 \times 10^{-2}$	20 a 30

Tabla 3. Relación de permeabilidad con infiltración (Suarez, 2009)

2.1.1.3.Litología

La litología forma parte de la geología y se dedica al estudio de las características de las rocas. “Una roca es un agregado de minerales; su clasificación es natural y se distribuyen en tres grupos, con orígenes marcadamente diferentes: rocas ígneas, rocas metamórficas y las rocas sedimentarias.” (Gispert, 1999).

Rocas Ígneas

Las rocas ígneas se dividen en dos grupos, las rocas ígneas intrusivas y las rocas ígneas extrusivas. Los minerales encontrados comúnmente en este tipo de rocas son un 62% de feldespatos, un 21% de cuarzo y el porcentaje restante de otros minerales. Las rocas intrusivas provienen del producto del enfriamiento del magma antes de aflorar a la superficie. Se consideran rocas densas con una alta resistencia al corte en estado natural sin embargo si este presenta fracturas o una meteorización, su previa resistencia disminuye sustancialmente. Las rocas

extrusivas o volcánicas son el producto de la cristalización de material expulsado por los volcanes. El uso y la resistencia que tiene cada uno depende del grado de solidificación. Ejemplos tenemos a la riolita, tobas, andesitas, basaltos, etc.

Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas son el resultado de una serie de procesos en donde se someten las rocas sedimentarias y las rocas ígneas a cambios físicos, mecánicos e inclusive mineralógicos. Los minerales encontrados en este tipo de rocas son cloritas, granates y epidolitas. En las rocas metamórficas tenemos varios tipos de roca como los esquistos, pizarras, filitas, mármol, chert, etc.

Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias como su nombre lo indica son creadas a partir de sedimentos conjuntamente de una cementación de partículas de arcilla, arena y grava. Dependen explícitamente del tamaño de grano, plano de estratificación y tenemos minerales como carbonatos, arcillas, yeso y anhidritas. (Suarez,1998)

Roca	Componente	Características
Conglomerado	Partículas grandes redondeadas de roca y fragmentos de minerales.	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Breccia	Partículas angulares de roca y fragmentos de minerales	Más del 50% de los granos mayores de 2 mm y menos del 25% de arcilla
Arenisca	Partículas redondeadas menores de roca	Más del 50% de los granos entre 2 y 0.06 mm y menos del 25% de arcilla.
Limolita	Partículas del tamaño de limos	Más del 50% de los granos menores de 0.06 mm y menos del 25% de arcilla
Arcillolita	Partículas de arcilla	Más del 50% de arcilla.
Lodolita	Rocas arcillosas con alto contenido de limos	Más del 50% de los limos.
Caliza	Granos de calcita	Más del 50% de calcita y menos del 25% de arcilla.

Tabla 4: características de los suelos sedimentarios (Suarez, 1998)

2.1.2. FUNDAMENTOS DE MECÁNICA DE SUELOS

2.1.2.1. Concepto de Mecánica de suelos

Un suelo se define como una combinación de agregados no cementados de sedimentos minerales y materia orgánica en descomposición, creando un cuerpo definido por líquidos, sólidos y gases. Teniendo en cuenta esta estructura, la mecánica de suelos es la rama de la ciencia que se dedica al estudio de sus propiedades tanto mecánicas como físicas ante la interacción de fuerzas internas y externas. (Das & Cera, 2001).

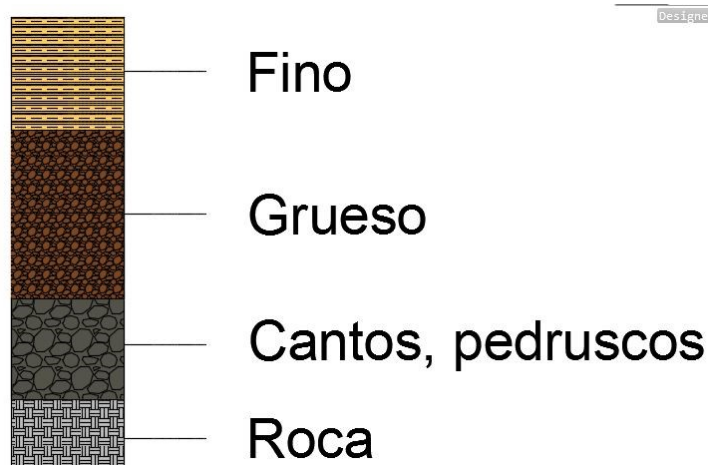


Ilustración 3. Perfil Estratigráfico (Valverde, 2013)

La composición de los suelos va a variar por consecuencia del intemperismo haciendo que, bien permanezcan en la roca de origen, o se trasladen por los mismos agentes geológicos creando un depósito de suelo (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1974). Existen varios tipos de depósitos:

Deposito	Características
<i>Residual</i>	Permanecen donde se forman (Lacustre)
<i>Aluvial (fluvial)</i>	Depositados por el agua en movimiento de acuerdo con el tipo de grano
<i>Glacial</i>	Transportados por glaciares
<i>Eólicos</i>	Transportados por aire
<i>Coluviales</i>	Producto de deslizamientos
<i>Marinos</i>	Transportados por el mar
<i>Lacustres</i>	Producto del secado de un lago. Generalmente son estratos finos o de arena, arcilla o limos

Tabla 5. Depósitos de suelo y rocas. (Valverde, 2013)

Así mismo, la composición de un perfil estratigráfico puede variar en muchas maneras como la siguiente ilustración de un talud.

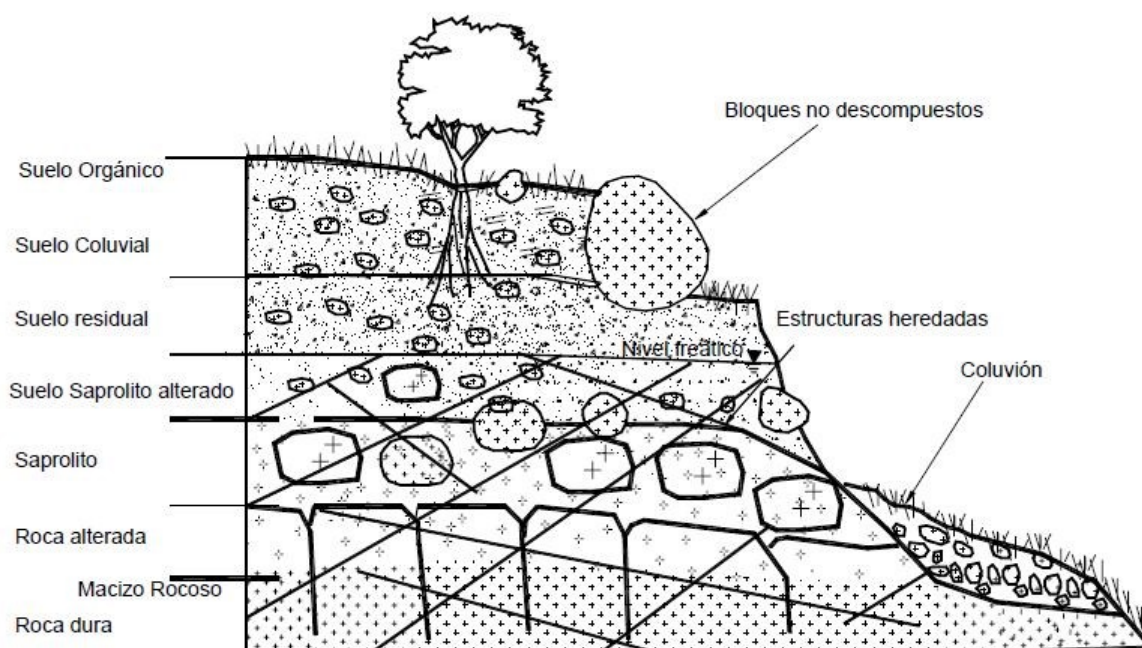


Ilustración 4. Esquema general de una ladera en un suelo residual de granito. (Suarez Díaz, 2009)

2.1.2.2. Propiedades físicas de un suelo

Diagrama de Fases.

Como se dijo previamente, un suelo se compone de material mineral (sólido), gas o aire y agua. Se define un suelo como:

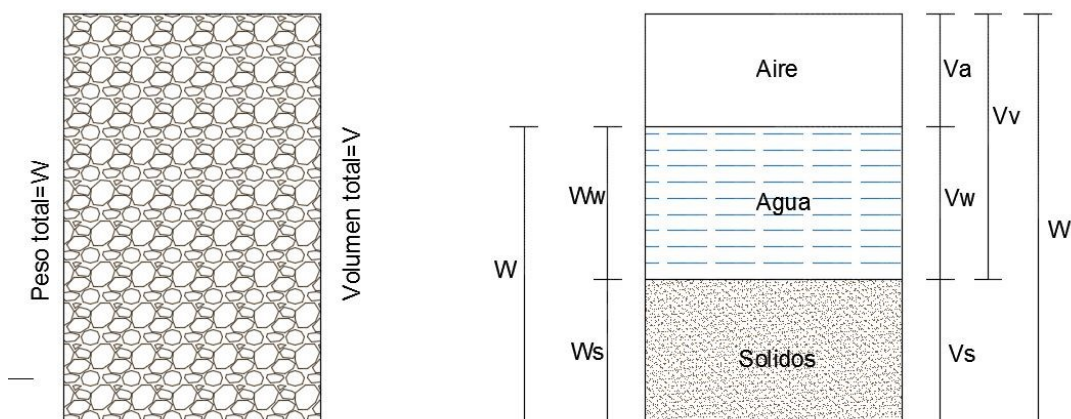


Ilustración 5.a) Suelo estado natural. b) Tres fases de un suelo. (Das & Cera, 2001)

$$W = W_s + W_w \quad (1)$$

$W = \text{peso total}$

$W_s = \text{Peso de sólidos}$

$W_w = \text{peso del agua}$

Así mismo tenemos:

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (2)$$

$V = \text{Volumen total}$

$V_s = \text{Volumen sólidos}$

$V_w = \text{Volumen agua}$

$V_a = \text{Volumen agua}$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, podemos obtener parámetros como la porosidad, grado de saturación de un suelo, contenidos de humedad, etc. A continuación, se exponen las relaciones más trascendentes para este estudio.

Concepto		Simbología	Relaciones	Información
Volumétricas	<i>Porosidad</i>	n	$n = \frac{V_v}{V_s}$	V _v = Volumen vacíos V _s = Volumen sólidos V _w = Volumen agua
	<i>Grado de saturación</i>	S	$S = \frac{V_w}{V_v}$	
	<i>Volumen vacíos</i>	e	$e = \frac{V_v}{V_s}$	
Gravimétricas	<i>Contenido de agua</i>	w%	$w\% = \frac{W_w}{W_s}$	W _w = peso agua W _s = peso solido W= peso total V= volumen total m= masa
	<i>Peso específico</i>	γ	$\gamma = \frac{W}{V}$	
	<i>Peso específico seco</i>	γ _d	$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$	
	<i>Densidad</i>	ρ	$\rho = \frac{m}{V}$	
	<i>Densidad seca</i>	ρ _d	$\rho_d = \frac{m}{V}$	

Tabla 6. Relaciones volumétricas y gravimétricas de un suelo (Das & Cera, 2001)

Consistencia de un suelo

En una columna de suelo, la mayoría de las veces encontramos material mineral arcilloso en suelos de grano fino. A la presencia de agua en esta composición, la consistencia del suelo a tal punto de que este se puede moldear sin desmoronarse. Esto se debe específicamente por la presencia de agua que rodea a la partícula de arcilla (Das & Cera, 2001).

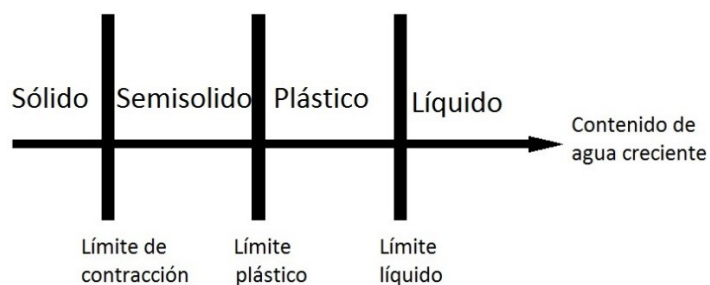


Ilustración 6. Límites de Atterberg (Das & Cera, 2001)

Albert Mauritz Atterberg propuso tres límites para definir un suelo ante la presencia de agua. El límite de contracción, que separa el estado sólido/seco del semisólido. El límite plástico que separa el semisólido del plástico y finalmente el límite líquido que separa el plástico del líquido. Los conceptos más usados para la determinación de consistencia de un suelo son: límite líquido y límite plástico, de esta manera se obtiene el índice de plasticidad.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Donde LL es el límite líquido, LP el límite plástico.

Carta de plasticidad

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores, Casagrande definió una carta para clasificar los suelos finos (arcillas & limos) en donde depende de su índice de plasticidad y del límite líquido.

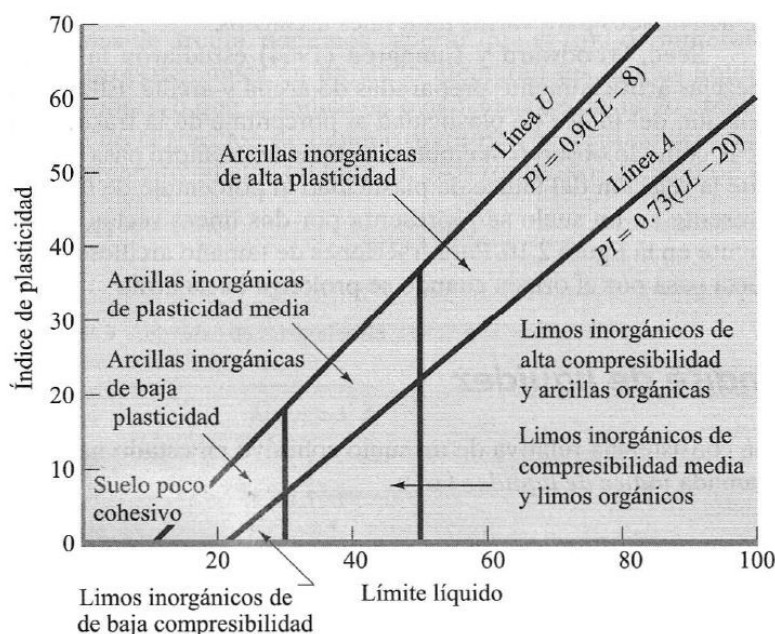


Ilustración 7. Carta de Plasticidad (Das & Cera, 2001)

Con la carta presentada, se realiza la clasificación de suelos finos.

Clasificación de los suelos

La composición de un suelo puede variar de tal modo que exista predominancia de un material en particular como gravas y arenas. Existen dos tipos de clasificación que son: AASHTO (Sistema de clasificación de la oficina de caminos públicos) y SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos). A continuación, se presenta un esquema en donde se explica de manera eficaz la clasificación de los suelos.

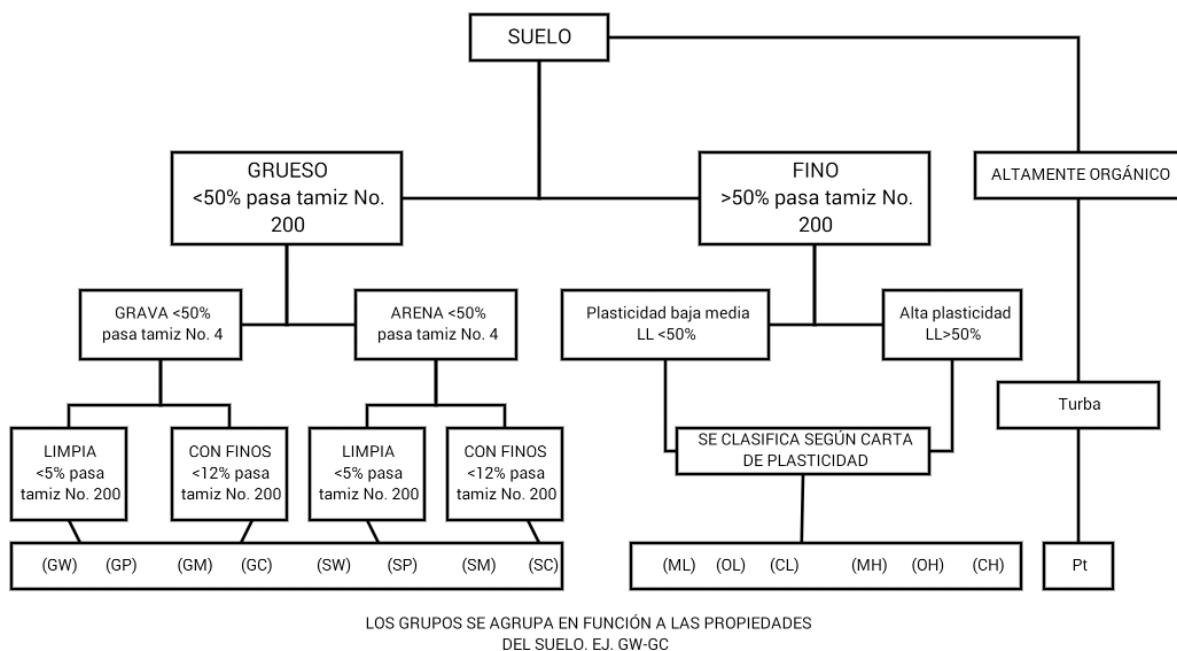


Ilustración 8. Esquema de clasificación de suelos. (Díaz Rodríguez, 2014)

Se observa que, en esta clasificación, un suelo se le considera un material granular (arena) si es que pasa menos del 50% del tamiz No. 200. Sin embargo, en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (2015) estipula lo siguiente:

“Arenas: todos los materiales clasificados como SW, SP, SM, SC, SC-SM, SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC, **en los cuales 30% o menos del peso pase por tamiz No. 200 (suelos finos menores o iguales al 30%) y que tengan límite líquido $w_L \leq 30\%$ e índice plástico $IP \leq 15\%$.**”

2.1.2.3. Propiedades Mecánicas del suelo

Esfuerzos normales, efectivos y presión de poro

Ya en la práctica, los suelos están y estarán sometidos a cargas ya sea puntuales o distribuidas en función (o no) del tiempo en un área determinada que van a variar sus características mecánicas.

“Para analizar problemas tales como la compresibilidad de suelo, la capacidad de carga de cimentaciones, la estabilidad de terraplenes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras, los ingenieros necesitan conocer la naturaleza de la distribución de esfuerzos a lo largo de una sección transversal dada del perfil del suelo...” (Das & Cera, 2001).

Existen esfuerzos totales los cuales son la suma de todas las fuerzas incluyendo aquellas creadas a partir del contacto entre partículas y también por la presión de agua en los poros. Dentro de este concepto, se encuentra el esfuerzo efectivo el cual representa solo las fuerzas transmitidas entre las partículas de suelo (Duncan, Wright, & Brandon, 2014). Se puede representar lo estipulado como dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros entre partículas llenos de agua. Los esfuerzos ejercidos por el esqueleto de suelo se denomina esfuerzo efectivo y los esfuerzos hidrostáticos se denominan presión de poros (Suárez, 2009) y se representa con la siguiente ecuación.

$$\sigma_T = \sigma' + u \quad (4)$$

σ_T = Esfuerzo total

σ' = Esfuerzo efectivo

u = Presión de poro

Esta ecuación se puede representar con la siguiente ilustración.

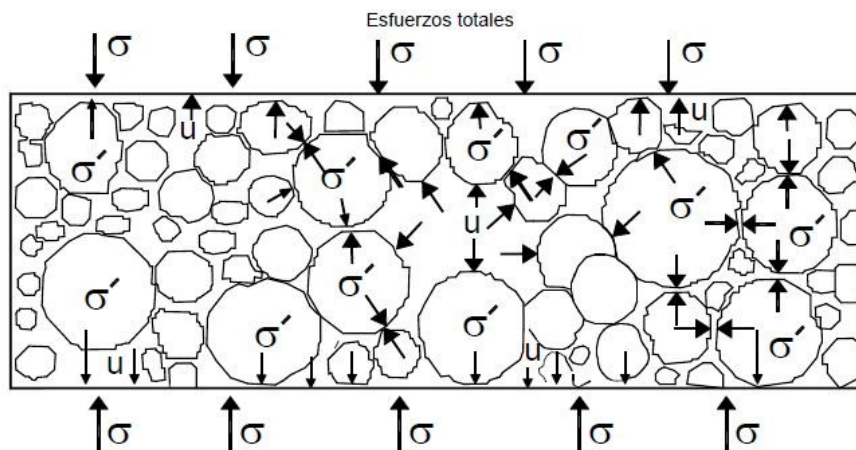


Ilustración 9. Representación de un suelo saturado sometido a esfuerzos normales. (Suarez, 2009)

“La presión de poros aumenta en los taludes en temporadas de lluvias y disminuye en temporadas de sequía. Es muy importante entender y cuantificar la variación temporal y espacial de la presión de poros en los taludes. La variabilidad es mayor en la cuesta que en el pie del talud.” (Suarez, 2009)

Resistencia al Corte: Teoría de Mohr-Coulomb

En pendientes de todo tipo, ya sea laderas, muros de contención, o taludes, se mantienen en equilibrio gracias a la capacidad de cortante que tienen ya sea rocas o suelo. Por el otro lado, tenemos al agua que no tiene ninguna oposición al esfuerzo cortante de tal modo que en la superficie de cualquier tipo esta permanece a nivel. En los análisis de mecánica de suelos, uno de los puntos fundamentales es conocer si el esfuerzo cortante es suficiente para mantener un evento fuera de peligro (Taylor, 1948).

La relación existente entre esfuerzos normales y esfuerzos cortantes se puede representar gráficamente en un plano que se conoce también como el diagrama de Mohr. Gracias a este diagrama, se pueden encontrar una combinación de esfuerzos máximos normales y cortantes los cuales representarán un estado de falla inminente (Das & Cera, 2001).

En un análisis bidimensional, los esfuerzos de un punto pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño el cual se somete a los esfuerzos estipulados anteriormente. Si

estos esfuerzos son dibujados, obtiene un círculo basado en la teoría de Mohr. En este círculo, encontramos valores de esfuerzos máximos y mínimos que son esfuerzos principales (Suarez, 2009). El resultado obtenido es la siguiente ilustración.

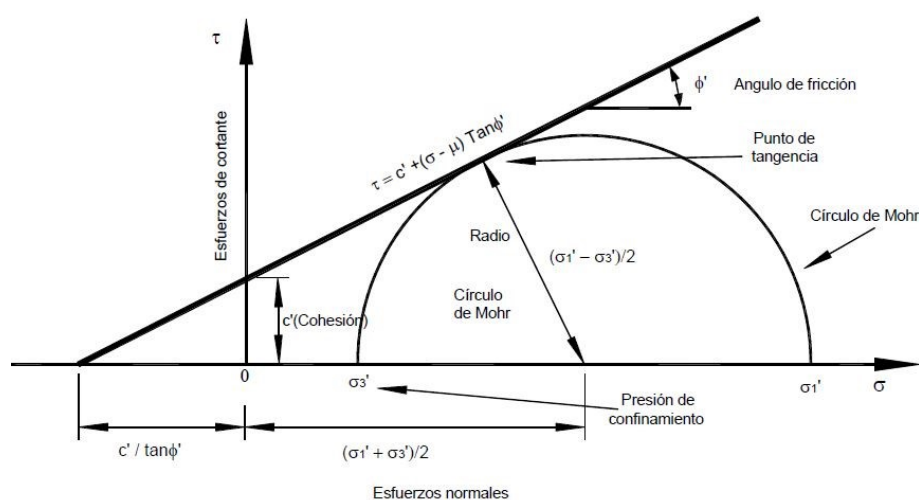


Ilustración 10. Envolvente de falla y círculo de Mohr. (Suarez, 2009)

$$\tau_f = f(\sigma) \quad (5)$$

σ = Esfuerzo normal sobre el plano de falla.

τ = Esfuerzo cortante sobre el plano de falla.

De este modo se define la envolvente de falla la cual se representa como una línea curva, sin embargo, es más fácil considerar esta línea como una función lineal; se le conoce también como *criterio de falla de Mohr-Coulomb* (Das & Cera, 2001). Se define de la siguiente manera:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

τ_f = Esfuerzo de corte (falla)

c = cohesión

σ = esfuerzo normal

φ = ángulo de fricción interna

Un parámetro muy importante es la resistencia bajo condiciones drenadas en donde está presente el esfuerzo efectivo; y no drenadas donde el esfuerzo es el total.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (2015) estipula que “se advierte que los esfuerzos normales empleados son valores relativos a la presión atmosférica PA y que cualquier otra definición de esfuerzo cortante a la falla debe ir en término de esfuerzos efectivos”. De este modo el esfuerzo cortante es:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (7)$$

En donde:

c' = cohesión efectiva

σ' = esfuerzo efectivo

φ' = ángulo de fricción interna efectivo

2.1.3. LOS TERRENOS INESTABLES Y LA APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA

2.1.3.1. Fenómenos de inestabilidad de terrenos

Uno de los fenómenos más desastrosos de la naturaleza son los deslizamientos de tierra ya que estos tienen un poder destructivo de tal modo que causan miles de muertes y un sin número de daños a las propiedades afectadas por estos eventos. Estos deslizamientos cambian totalmente la morfología del terreno, causando que se activen otro tipo de desastre como bloqueo de ríos, puentes, vías, etc. (Suarez, 2009). Usualmente estos eventos ocurren en taludes y laderas.

Una ladera principalmente se destaca por un desarrollo de una pendiente en una altura determinada. El término ladera se refiere específicamente cuando toda una masa tiene un origen de formación natural.

Por otro lado, tenemos a los taludes. El concepto es similar al de una ladera ya que se compone de una pendiente, sin embargo, la diferencia está en que estos tienen un origen artificial, es decir, hecho por la actividad humana.

Existen laderas y taludes que han permanecido estables por muchos años, pero puede llegar un momento en donde condiciones externas afectan la integridad de esta masa comprometiendo su estabilidad e inclusive llevando a un estado de falla. Condiciones externas como, por ejemplo, cambios topográficos, eventos sísmicos, deforestación, cambios de flujo en el agua subterránea, etc. (Suarez, 2009).



Ilustración 11. Deslizamiento en el sector Reina De La Paz parroquia Llaao (M. Rivera, abril 2017)

Cuando se presencia un estado de falla, el movimiento y ruptura de la pendiente puede ocurrir de cuatro maneras. Estas se pueden desarrollar independientemente o conjuntamente en un evento. La primera es por la separación de la roca como volcadura o desprendimiento. La segunda se debe a la ruptura del esfuerzo cortante sobre las superficies geológicas existentes. La tercera se debe a la ruptura también del esfuerzo cortante, pero entre materiales como roca y suelo que están en estado débil. Y finalmente por ajustes graduales a la escala microscópica como el arrastre (Blyth, De Freitas, & López Rubio, 1989).

Según Blynth, De Freitas & López (1989), estipulan que, gracias a registro documentado de un talud, se pudo concluir que la resistencia de los suelos a largo plazo es mucho menor que su resistencia instantánea en el caso de “arcillas vivas” y rocas.

Tipos de inestabilidad de terrenos

Existen varios tipos de inestabilidad de terrenos los cuales se definen básicamente según el mecanismo. En donde se producen como fenómenos lentos y más o menos continuos. (Rivera M., 2012)

Deslizamientos superficiales atípicos: Son deslizamientos se producen por procesos geodinámicos. Se caracterizan por ser deslizamientos traslacionales con espesores menores a dos metros. (Ríos Cabrera, Ruiz Dáger, Maduro Rojas, & García, 2010)

Reptación: Son movimientos superficiales, imperceptibles y lentos. Se produce especialmente en arcillas saturadas y se puede observar este fenómeno en la vegetación cuando su inclinación es perpendicular a la superficie en movimiento. (Ibáñez, 2008)

Soliflucción:

“Es un movimiento, relativamente rápido, donde toman identidad la presión del agua intersticial y la plasticidad de los materiales. La soliflucción suele desarrollarse: en depósitos de acumulación (coluviones, piedemontes, y otros), en depósitos de alteración, sobre todo en formaciones margosas, de esquistos o de pizarras, y en formaciones arcillosas y limosas susceptibles a deformarse”

Fluage: Esta expresión está en el idioma francés y hace referencia a una protuberancia de suelo que se produce por un depósito de suelo pesado sobre uno blando. (Rivera Z., nd)

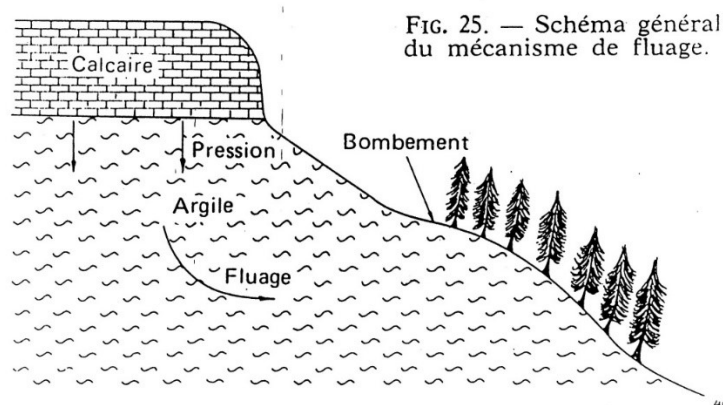


Ilustración 12. Fluage. (Parent J.,1988.)

Por otro lado, existen fenómenos rápidos e históricos como derrumbes, avalanchas de rocas, caída de escombros, lavas torrenciales, deslizamientos rápidos, flujo de lodos y hundimientos.

Propiedades de un deslizamiento

Dentro de todos los fenómenos de inestabilidad de terrenos, los deslizamientos son uno de los más estudiados por su capacidad destructiva. Es importante saber sus componentes básicos para la identificación en campo.

Como se expuso anteriormente, los taludes se componen de las siguientes definiciones resumidas en la siguiente tabla.

ELEMENTOS DE UN TALUD	
PIE, PATA O BASE	Sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma es usualmente cóncava
CABEZA, CRESTA, CIMA ESCARPE	Sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Si la pendiente es semi-vertical o una pendiente alta, se le conoce como escarpe
ALTURA	Distancia vertical entre el pie y la cabeza del talud. Complicada de cuantificar en laderas por los accidentes topográficos de la zona.
ALTURA DE NIVEL FREÁTICO	Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua. (Presión de agua = presión atmosférica). La altura se mide debajo de la cabeza del talud
PENDIENTE	Inclinación de la superficie del talud o ladera Se mide en grados o en relación m:1, siendo m distancia horizontal a una unidad vertical.

Tabla 7. Elementos de un talud/ladera. (Suarez, 2009)

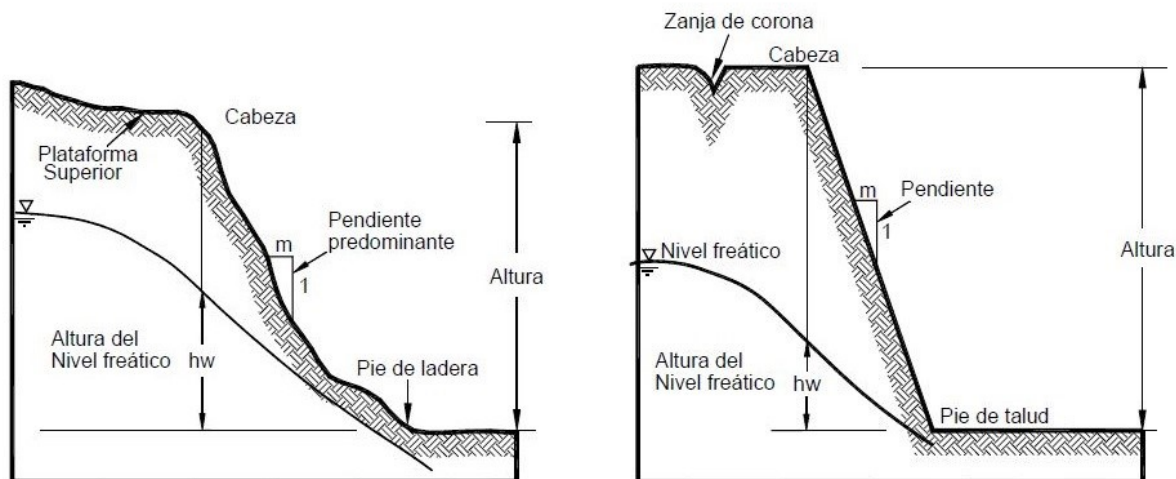


Ilustración 13. Ladera (Izq.) Talud (Der.) (Suarez, 2009)

Los conceptos presentados son de cuerpos que no han entrado en un estado de falla. Cuando el evento ocurre y entra en equilibrio de fuerzas, se observa un deslizamiento. A continuación, se presentan los componentes de un deslizamiento.

ELEMENTOS DE UN DESLIZAMIENTO	
CABEZA	Parte superior de la masa que se mueve. Cabeza del talud (estado previo)
CIMA	Punto más alto de la cabeza. Contacto existente entre material perturbado y escarpe principal
CORONA	Material inalterado adyacente a la parte más alta del escarpe principal
ESCARPE PRINCIPAL	Superficie con pendiente pronunciada. Parte de la superficie de falla. Inicio del deslizamiento delimitado con la corona del deslizamiento limitado con la cabeza del deslizamiento
ESCARPE SECUNDARIO	Superficie con pendiente pronunciadas creadas a partir del escarpe principal Se pueden formar varios escarpes
SUPERFICIE DE FALLA	Área por debajo del movimiento. Delimitador del volumen del material. El suelo por debajo de la superficie no se mueve con respecto al desplazado. Puede no existir superficie de falla
PIE DE LA SUPERFICIE DE FALLA	Línea de interceptación entre parte inferior de la superficie de ruptura con la superficie original del terreno

BASE	Área cubierta por material perturbado abajo del pie
PUNTA O UÑA	Punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima
CUERPO PRINCIPAL DEL DESLIZAMIENTO	Material desplazado encima de la superficie de falla. Pueden existir varios cuerpos en movimiento
SUPERFICIE ORIGINAL DEL TERRENO	Superficie donde existía la masa previamente desplazada
FLANCOS	Puntos de referencia para la ubicación del deslizamiento. Existe flanco izquierdo y derecho.

Tabla 8. Elementos de un deslizamiento. (Suarez, 2009)

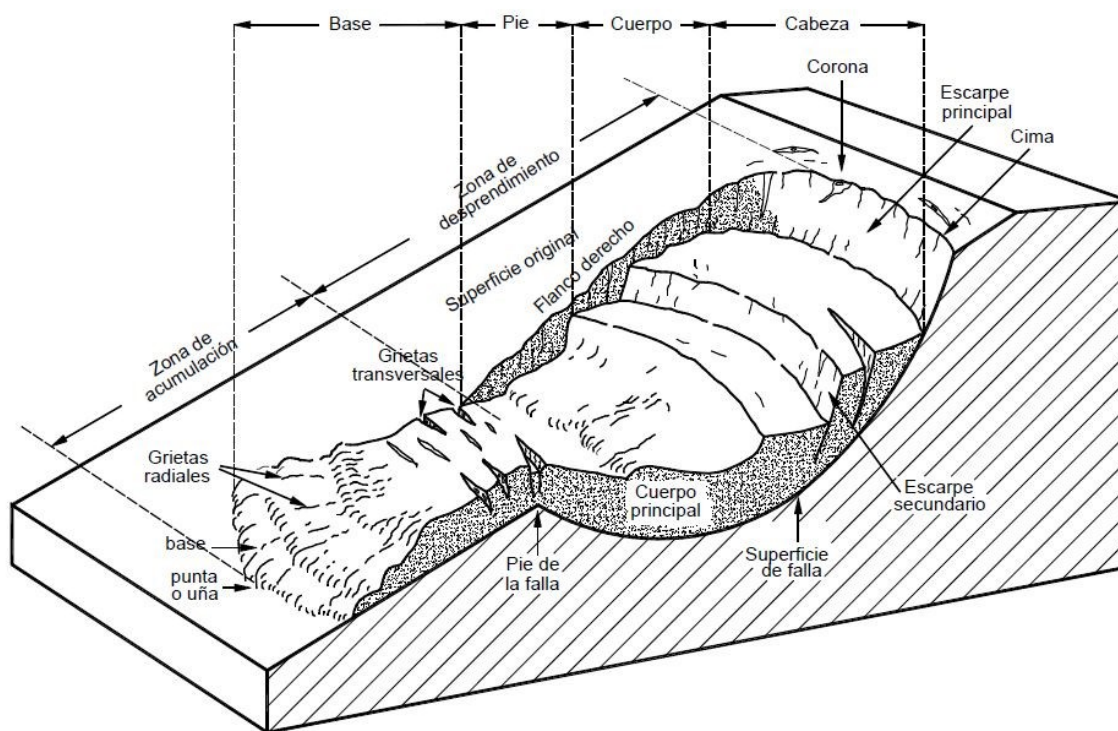


Ilustración 14. Deslizamiento esquemático, rotacional. (Suarez, 2009)

Los deslizamientos se clasifican según su actividad. Suarez (2009) las define de la siguiente manera:

Activo: El deslizamiento está en movimiento.

Latente o suspendido: El deslizamiento está en condiciones de riesgo. El estado del mismo está activo, pero no se presenta movimiento.

Reactivado: El deslizamiento se considera activo después de un tiempo de inactividad.

Inactivo: El deslizamiento no muestra signos de riesgo. No existe actividad.

Dormido: El deslizamiento no presenta actividad, aunque se recomienda tomar medidas cautelares.

Abandonado: Según Suarez (2009), es el caso de un río que cambió de curso y que estaba produciendo un deslizamiento

Estabilizado: El deslizamiento se ha controlado bajo criterios ingenieriles. Se le considera suspendido.

Relicto: Se considera un deslizamiento que ocurrió mucho tiempo atrás.

Los deslizamientos también presentan diferentes tipos de movimientos. Existen dos principales eventos que son los deslizamientos rotacionales, traslacionales y combinados.

El deslizamiento rotacional es el evento que más se ha estudiado por la academia, la cual define una superficie de deslizamiento de tipo cóncava y con movimiento de rotación. El centro de giro se ubica por encima de del centro de gravedad del cuerpo.

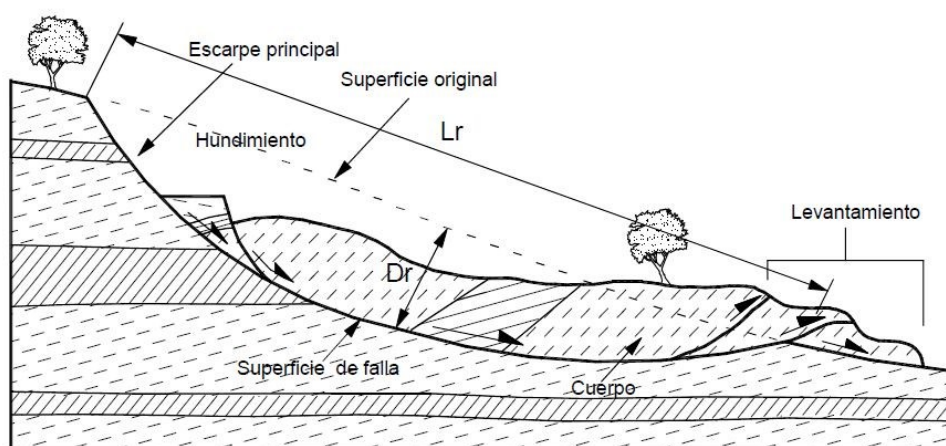


Ilustración 15. Deslizamiento de tipo rotacional. (Suarez, 2009)

Por el otro lado, tenemos los deslizamientos traslacionales. Como su nombre lo indica, se desarrolla principalmente con una superficie de falla relativamente plana. Se producen

especialmente en zonas de una pendiente fuerte con una superficie débil como fallas, fracturas, planos estratificados, felación en el suelo, etc.

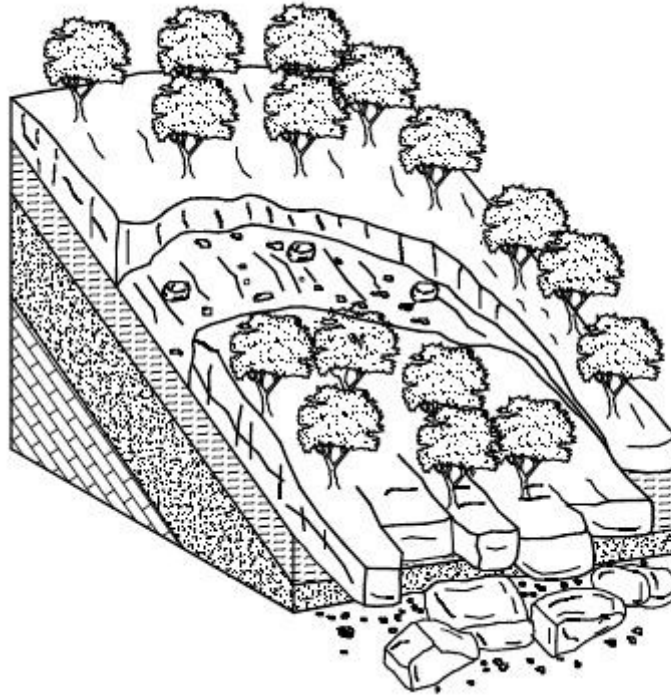


Ilustración 16. Deslizamiento traslacional. (Suarez, 2009)

Finalmente, se pueden desarrollar deslizamientos rotacionales juntamente con una traslación y se les conoce también como compuestos. En general, los deslizamientos pueden tener varios tipos de movimientos, sin embargo, solamente predomina uno solo y en función a este, se decidirá el tipo de cálculo que se realiza sobre este.

Factores detonantes y condicionantes

Habiendo revisado los tipos de deslizamientos y sus componentes más sus características, se definen todos los factores externos que serán los responsables de un evento de inestabilidad. Se dividen en detonantes y condicionantes

Factores detonantes consideramos aquellos fenómenos que inciden directamente en la integridad del deslizamiento y conforme a la activación de este. La ocurrencia varía de tal modo que pueden ser activados de forma instantánea o progresiva. Según Suarez (2009), el resultado

de estos fenómenos es el incremento en los esfuerzos cortantes los cuales aumentarán en la superficie de falla hasta la ocurrencia.

Desestabilización de un talud: Comprende básicamente por la alteración de un componente de un talud especialmente en el pie.

Eventos sísmicos: Creado bien sea por un sismo de una magnitud considerable, especialmente superficiales

Erupciones volcánicas: Producen también efectos sísmicos de baja intensidad.

Actividad humana: Especialmente en el desarrollo de construcciones que aportan con carga sobre el talud.

Lluvias/Agua: El agua es el factor más influyente en la inestabilidad de taludes debido al aumento de agua en los poros de suelo creando un nivel freático alto una presión de poros alta igualmente.

Así mismo, **los factores condicionantes** implican más en características que se observa dentro del deslizamiento espacialmente en un contexto geológico.

Tectonismo: En la región pueden existir un sin número de fallas geológicas que serán los responsables de crear eventos de una magnitud determinada. (Yépez, 2010).

Litología: Está en función de las características subterráneas del deslizamiento. Es decir, tipo de suelos y rocas.

Ubicación inalterada en el terreno: Depende también en la forma como se encuentra el material subterráneo.

Pendiente: Un factor muy importante es la pendiente desarrollada en el terreno ya que determinará el valor del ángulo de fricción interna.

De todos estos factores, el más importante sin duda es el agua. La mayoría de las fallas están directamente relacionadas con el agua ya que, en términos generales, tiende a disminuir

la resistencia del suelo y aumentar los esfuerzos de corte. En un suelo saturado podemos encontrar los siguientes efectos.

Aumento de peso del suelo: Si un suelo es poroso, la probabilidad de que esos poros se llenen después de un evento de precipitación es prácticamente 1. De este modo, se debe considerar el peso del suelo más el peso del agua aumentando considerablemente el peso unitario.

Resistencia disminuida: El agua más material fino tiene la característica de adherirse en toda superficie de la partícula evitando el contacto de fricción entre partículas.

Presión de poro: La presión aumenta en los poros de agua evitando, como se dijo anteriormente, la fricción entre partículas.

Disolución: Si existe una pendiente, el agua fluirá en dirección de la pendiente. Este flujo disolverá algunos minerales que unen las partículas y como resultado, menos resistencia.

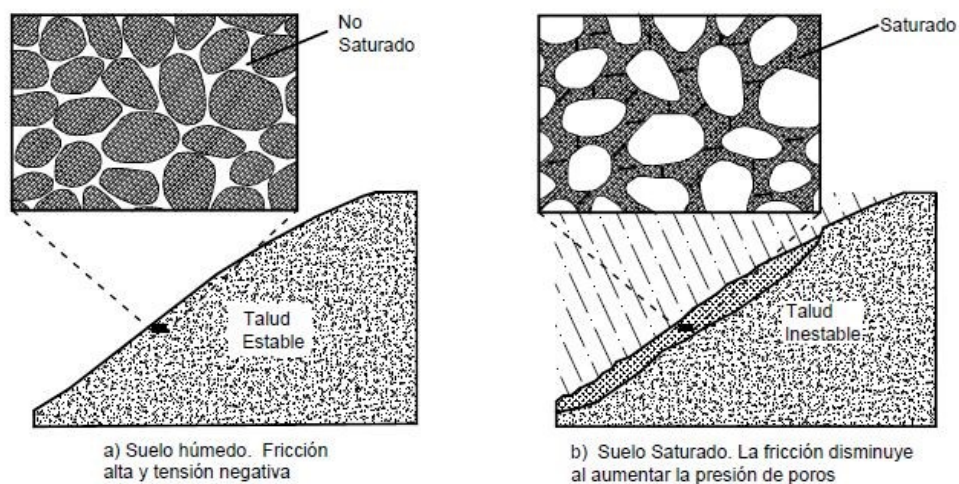


Ilustración 17. Efecto del agua en un suelo. (Suarez, 2009)

Cabe recalcar que el aumento de la presión de poros no solamente se produce por lluvias intensas, sino que también influye la altura del nivel freático del cuerpo.

Criterios para el descubrimiento de deslizamientos

Existe una serie de procesos los cuales son indicadores directos e indirectos que ayudan al reconocimiento de deslizamientos. A continuación, se exponen los más importantes:

Nidos de arranque: Comprende a grietas de tracción que darían lugar a un proceso de deslizamiento exponiendo el escarpe principal, la corona y la cabeza de este proceso

Vegetación: El proceso comprende al fenómeno de reptación en el cual, el movimiento de la tierra cambia la morfología de la vegetación. Lo más visible es que la vegetación tenga una perpendicularidad con el terreno.

Morfología general del versante: Comprende la topografía del supuesto deslizamiento.

Perturbaciones diversas: Obras que presentan fallas o rupturas en cualquier parte del elemento. Se produce cuando el deslizamiento está en proceso de movimiento. Ejemplos: Paredes de casas cuarteadas, vías con rupturas, postes de luz y cerramientos desfasados, cables de luz a tracción o sueltos, etc.

2.1.4. INFLUENCIA DE LA CARGA SÍSMICA EN INESTABILIDAD DE TALUDES.

Los eventos de inestabilidad, como se dijo anteriormente, son causados por factores externos que debilitan las propiedades mecánicas del área. Uno de los eventos con mayor incidencia en los deslizamientos son los sismos o terremotos.

A lo largo de los años, la necesidad de obtener datos de un evento sísmico se fue volviendo una necesidad urgente y mediante sismógrafos, se logró obtener resultados como la magnitud del evento que denota la energía liberada, aceleraciones, velocidades y desplazamientos. De este modo, uno de los parámetros más tomados en cuenta para el análisis de sismo resistencia son las aceleraciones desarrolladas en el terreno que se traducen en fuerzas cortantes (Yépez, 2016).

En lo que respecta la inestabilidad de terrenos, los efectos que, Suarez (2009), un sismo puede causar son los siguientes:

- Disminución de la resistencia debido a cargas vibratorias las cuales inducen deformaciones cíclicas constantes.
- Aumento de la presión de poro en suelos limosos y arenas finas siendo proclives a fenómenos de licuación.
- Amplificación de la onda sísmica debido a suelos blandos
- Posibilidad de resonancia entre las propiedades de la onda con las propiedades del suelo. Esto ocasionaría un incremento en la frecuencia natural de vibración del suelo.

Todos estos factores pueden ser aún más críticos cuando se combinan factores topográficos, geológicos, climáticos y sísmicos.

La composición litológica tiene características diferentes frente a las ondas sísmicas que pasan por el medio. Es decir, la velocidad de desplazamiento de una onda varía en función al

tipo de suelo en el que pase. La Norma Ecuatoriana de la Construcción, capítulo Peligro Sísmico (NEC_SE_DS, 2015) establece la siguiente información según los suelos existentes.

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500 \frac{m}{s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \frac{m}{s} > V_s \geq 760 \frac{m}{s}$
C	Suelos muy densos o roca blanda que cumpla con criterios de velocidad de onda cortante, o	$760 \frac{m}{s} > V_s \geq 360 \frac{m}{s}$
	Suelos muy densos o roca blanda que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50$ $S_u \geq 100 \text{ kPa}$
D	Suelos rígidos que cumplan con el criterio de la onda cortante, o	$760 \frac{m}{s} > V_s \geq 360 \frac{m}{s}$
	Suelos rígidos que cumplan con cualquiera de las dos condiciones	$50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$
E	Suelo que cumpla la velocidad de onda cortante, o	$V_s < 180 \frac{m}{s}$
	Suelo que contiene un espesor total H mayor a 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50 \text{ kPa}$
F	Los perfiles de suelo F requieren evaluación in situ realizada por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1- Suelos susceptibles a falla o colapso causado por excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o debilmente cementados	
	F2- Turbas y arcillas con alto contenido orgánico (H>3 m para turbas o arcillas con alto contenido orgánico)	
	F3- Arcillas con alta plasticidad (H>7.5 m con IP>75)	
	F4- Arcillas de rigidez mediana a blanda (H>30 m)	
	F5- Suelos con contrastes de impedancia ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil del subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca con variaciones bruscas de velocidades de corte	
F6- Rellenos colocados sin control ingenieril		

Tabla 9. Clasificación de los perfiles de suelo (NEC_SE_DS, 2015)

Dentro del estudio de inestabilidad de taludes frente a eventos sísmicos, el análisis pseudoestático es el más fácil de usar y además es aplicable usando esfuerzos totales y esfuerzos efectivos (Kumar, 2008).

El análisis pseudoestático “indica que la aceleración pico aumenta de abajo hacia arriba del talud, por lo tanto, la fuerza sísmica se aplica arriba del centro de gravedad.” (Suarez, 2009). El análisis usa cualquiera de los métodos de equilibrio límite con la diferencia que usa cargas estáticas horizontales y verticales. Según Kumar (2008), este análisis de estabilidad se basa principalmente que, durante un evento sísmico, el potencial deslizamiento tiene suficiente resistencia cortante.

En el análisis pseudoestático, la carga sísmica de un evento es equivalente a una fuerza horizontal actuando en el centro de masa del talud o ladera. Este análisis tiene coeficientes sísmicos k_h y k_y . El coeficiente más importante es k_h el cual se define como:

$$k_h = \frac{a_{max}}{g} \quad (8)$$

En donde a_{max} es la PGA del evento y g como la gravedad.

Kumar (2008), sin embargo, expone ciertas guías para considerar el coeficiente sísmico que son las siguientes:

1. Mayor valor del PGA, mayor el valor de k_h
2. K_h se determina en función a la magnitud del evento.
3. Para deslizamientos pequeños se usa la ecuación.
4. Para deslizamientos medianos se usa la misma ecuación con 0.65 más.
5. $K_h=0.1$ para terremotos severos, $k_h=0.2$ para terremotos violentos y destructivos y $k_h=0.5$ para terremotos catastróficos.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, capítulo de geotecnia y cimentaciones (NEC_SE_GC, 2015) establece la ecuación según e numeral cuatro, expuesto previamente.

$$k_h = 0.6 \frac{a_{max}}{g} \quad (9)$$

Para la obtención de a_{max} se define como:

$$a_{max} = Z * Fa \quad (10)$$

Donde Z es un factor en función a la zona de análisis y Fa como las fuerzas actuantes definidas a continuación:

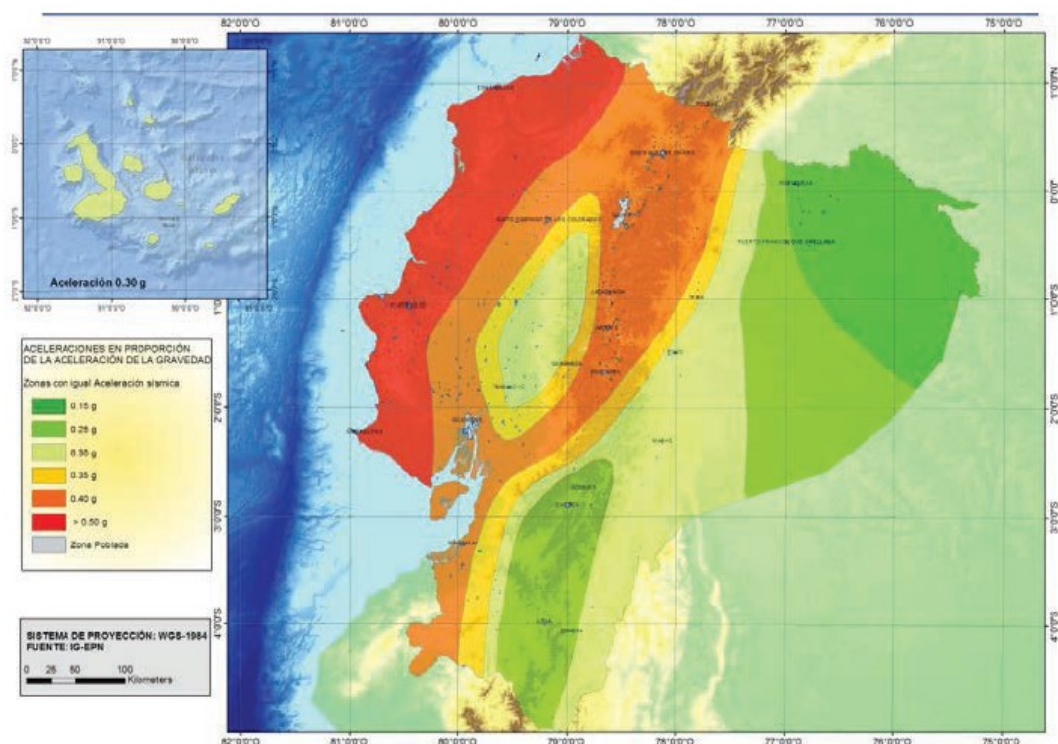


Ilustración 18. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (NEC-SE-DS, 2015)

TIPO DE PERFIL DE SUELO	ZONA SÍSMICA Y FACTOR Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥0.5
<i>A</i>	0.90	0.90	0.90	0.90	0.9	0.90
<i>B</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<i>C</i>	1.40	1.30	1.25	1.23	1.20	1.18
<i>D</i>	1.60	1.40	1.30	1.25	1.20	1.12
<i>E</i>	1.80	1.40	1.25	1.10	1.00	0.85
<i>F</i>	Ver Tabla 2: Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4					

Tabla 10. Coeficiente de amplificación F_a (NEC_SE_GC, 2015)

2.1.5. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS *IN SITU*

En un proyecto de inestabilidad de taludes, es importante desarrollar estudios que ayuden en identificación de los estratos subyacentes en la zona. Existen métodos directos e indirectos para la investigación de la zona y así poder obtener información como tipo de suelo, existencia de nivel freático, etc.

2.1.5.1. *Métodos indirectos*

Geosísmico: Este método se destaca por el viaje de ondas de compresión y de corte en el área de estudio. En función a la velocidad de las ondas, se obtienen resultados como la compacidad de material, profundidad de contacto, espesor de estrato, etc.

Dentro de estos estudios, existe la sísmica de refracción y de reflexión. La sísmica de refracción consiste en la propagación de la velocidad de onda a través de los suelos la cual es generada por un martillo que golpea a una unidad la cual transmitirá las ondas hasta llegar al geófono.

Por el otro lado, está la sísmica de reflexión la cual

“consiste en medir los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, generadas mediante una fuente de energía apropiada (martillo, pistola, caída de peso, dinamita, etc.), a los

sensores (geófonos) dispuestos alineados según un perfil, tras ser reflectadas en las superficies de contacto de las distintas unidades litológicas, fallas, superficies de discontinuidad, etc.” (González de Vallejo, L., 2002)

Geoeléctrico: Se basa en la resistividad eléctrica de los suelos a partir de una inducción de corriente. Los resultados obtenidos son tipo de material, profundidad de aguas freáticas, espesor de estratos, estructuras geológicas, estructuras blandas, etc.

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) consiste en la separación continua de electrodos a lo largo del área de estudio. Estos electrodos conducirán corriente eléctrica y la variación de resistividad eléctrica indicarán el estrado existente. A continuación, se presenta una tabla de Suarez (2009) que indica lo dicho:

MATERIAL	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA [ohm-cm]
<i>Arcilla o limo saturado</i>	0-10.000
<i>Arcilla arenosa</i>	10,000-25,000
<i>Arena arcillosa</i>	25,000-50,000
<i>Arena</i>	50,000-150,000
<i>Grava</i>	150,000-500,000
<i>Roca meteorizada</i>	100,000-200,000
<i>Roca sana</i>	150,000-4'000,000

Tabla 11. Resistividad eléctrica para distintos suelos (Suarez, 2009)

Materiales	Resistividad ρ [Ω-m]
<i>Margas</i>	50-5000
<i>Calizas</i>	300-10000
<i>Pizarras</i>	100-1000
<i>Granito</i>	300-10000
<i>Arcilla</i>	1-20
<i>Arenas</i>	50-500
<i>Conglomerados</i>	1000-10000
<i>Areniscas</i>	50-5000
<i>Aluviones</i>	50-800

Tabla 12. Resistividad eléctrica para distintos suelos (González de Vallejo, 2002)

RESISTIVIDAD ELECTRICA VERDADERA (Ohm.m)	CORRELACIÓN HIDROGEOLÓGICA
3-6	Limos, arenas finas a gruesa, limos arcillosos saturados
7-10	Arcilla pura saturadas
11-16	Limos, arenas grano fino a medio, limos arcillosos saturados
17-29	Arena de grano grueso

Tabla 13. Resistividad eléctrica para distintos suelos (Rivera M., 2009)

2.1.5.2. Métodos directos

Los métodos de investigación directa utilizados en geotecnia, sirven para conocer la litología del subsuelo de forma directa mediante la extracción de testigos de suelos o rocas en profundidad para su posterior análisis en laboratorio; así como, para comprobar y comparar los resultados obtenidos con los métodos de investigación indirecta los cuales necesariamente resultarán más económicos. Entre ellos tenemos los siguientes: Perforación a rotación con recuperación de testigos, perforación a percusión que más utilizado en América y Japón y Cono penetración que es más utilizado en Europa.

A continuación, se describen los métodos de investigación geotécnica utilizados en nuestro país y que sirven también para la toma de muestras de suelos o rocas para análisis de laboratorio y conocer las propiedades físico mecánicas de estos.

Prueba de penetración estándar (SPT): Consiste en la variación de N golpes a la resistencia de penetración en una columna de suelo. El golpe se puede relacionar con parámetros como la densidad relativa, ángulo de fricción interna, carga admisible, etc. Sin embargo, el proceso se debe detener cuando se lleguen a los 100 golpes con un avance de 15 cm por lo cual se considera rechazo (González de Vallejo, L., 2002)

Calicatas: Consiste en la excavación de un área determinada con una profundidad que permita al ingeniero poder obtener las características superficiales del terreno como variaciones litológicas, discontinuidades, etc. Además, con este tipo de investigación es que se pueden tomar muestras de suelos inalteradas para realizar ensayos de corte directo pero el limitante es que no se puede obtener muestras a profundidades mayores a 6 metros mientras que con el SPT se obtiene muestras a profundidades mayores y con métodos a rotación se obtienen muestras a cualquier profundidad

2.1.6. FACTOR DE SEGURIDAD Y MODELOS DE ANALISIS

2.1.6.1. Factor de seguridad

En la estabilidad de taludes se usan varios métodos para obtener un factor de seguridad los cuales están basados en la teoría del equilibrio límite. Dentro del factor de seguridad tenemos la siguiente definición:

$$F.S. = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + \sigma' \tan \varphi}{c_d + \sigma' \tan \varphi_d} \quad (11)$$

En donde:

τ_f = Esfuerzo cortante o resistente a la falla

τ_d = Esfuerzo cortante actuante o deslizante en la falla

c y c_d = cohesión normal y cohesión deslizante

σ' = Esfuerzo efectivo

φ y φ_d = Ángulo de fricción interna normal y deslizante

Como se estipuló anteriormente, los esfuerzos cortantes se rigen bajo la ley de Mohr-Coulomb donde se define cohesión y esfuerzos totales o efectivos.

De esta manera, la Norma Ecuatoriana (NEC_SE_GC, 2015) presenta la tabla de factores de seguridad mínimos durante diseño y construcción:

Condición **	Fscorete Mínimo	
	Diseño	Construcción
Carga Muerta+Carga Viva Nominal	1.5	1.25
Carga Muerta+ Carga Viva Máxima	1.25	1.1
Carga Muerta+ Carga Viva Nominal + Sismo de diseño Pseudo estático	1.1	1.00 *
Taludes - condición estática y Agua Subterránea Normal	1.5	1.25
Taludes - condición pseudo estática con agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de diseño	1.05	1.00 *

Tabla 14. Factores de Seguridad mínimos (NEC_SE_GC, 2015)

Así mismo, la norma determina que la carga viva nominal, presente en la tabla, considera un factor de reducción por la simultaneidad de la carga viva; la carga máxima por el otro lado, se considera ya un factor de reducción. El factor de seguridad según el caso **debe ser el mínimo**.

2.1.6.2. Modelos de análisis para la estabilización de taludes

Teniendo en cuenta el concepto de factor de seguridad, los académicos han desarrollado múltiples modelos para analizar el problema en los taludes.

Dentro de los métodos para el análisis se puede mencionar a los siguientes autores: Bishop Simplificado, Janbú, Lowe & Karafiath, Spencer, Sarma, Morgenstern & Price, etc.

Talud infinito

Este método inicialmente se considera si la longitud relativa del deslizamiento es mayor a la relación de grosor de este. La presencia de agua en el sistema proveerá la consideración de esfuerzos que se deba usar. En este método se establecen suposiciones como suelo isotrópico, homogéneo, superficie de falla paralela a la superficie del talud y un talud muy largo.

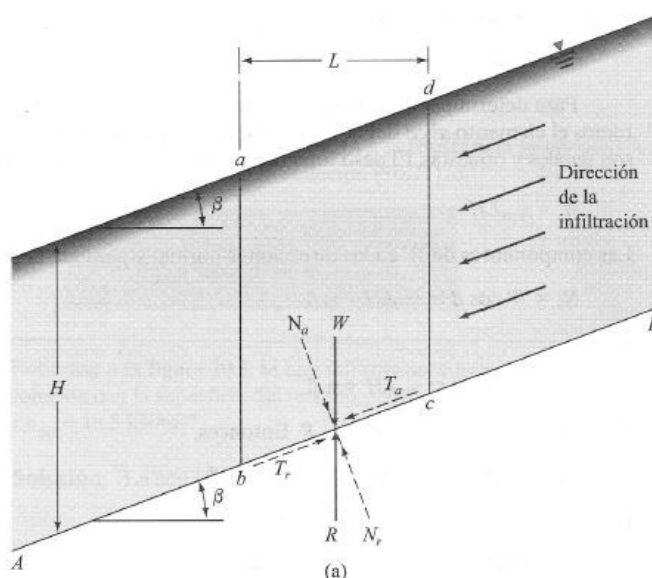


Ilustración 19. Talud infinito con infiltración (Das & Cera, 2001)

El factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (12)$$

γ' = *Peso efectivo del suelo*

γ_{sat} = *Peso específico saturado*

c = *cohesión*

Método de la espiral logarítmica

En este método, haciendo referencia a su nombre, la superficie de falla es en base a una espiral. Se define un punto central y un radio r_0 para la definición de la espiral la cual varía en función al ángulo de rotación θ .

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi_d} \quad (13)$$

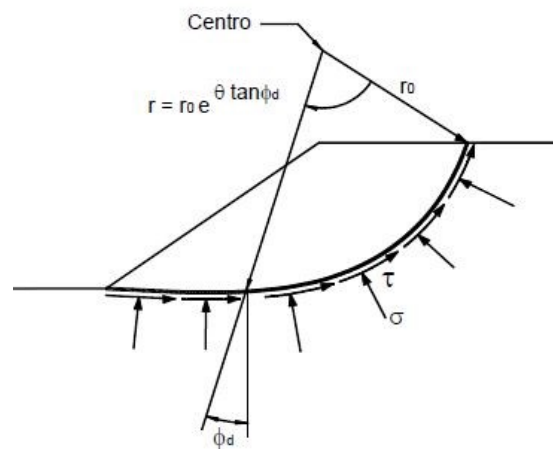


Ilustración 20. Espiral Logarítmica (Suarez, 2009)

Este método satisface equilibrios de fuerzas y momentos por lo cual es aceptable para el análisis de estabilidad.

Método Ordinario o Fellenius

Se basa en el análisis por dovelas las cuales son divididas a en todo el talud entre la superficie de falla y la superficie normal. En cada dovela se obtiene las fuerzas actuantes y

resultantes de tal modo que se realiza una sumatoria de momentos con respecto al centro del círculo.

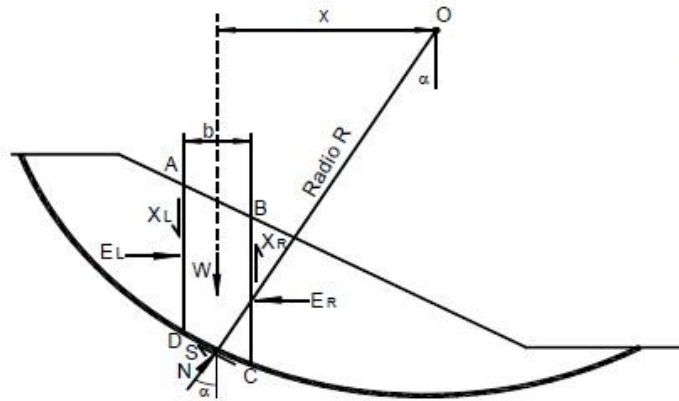


Ilustración 21. Talud por método de Fellenius (Suarez, 2009)

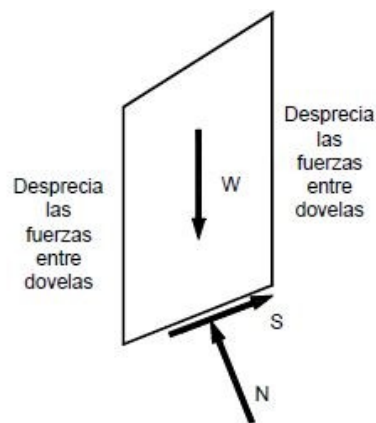


Ilustración 22. Fuerzas actuantes en dovelas por método Fellenius (Duncan y Wright, 2005)

Este método satisface equilibrio de momentos, pero no satisface equilibrio de fuerzas de tal modo que es un método no para diseño, pero si para corroborar información obtenida. El factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{\sum(c' \Delta L + (W \cos \alpha - u \Delta L \cos^2 \alpha) \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (14)$$

Donde:

α = Ángulo entre radio en función a la superficie de falla con la vertical del peso de cada tajada

W = peso de tajada

u = Presión de poro

ΔL = Longitud de la base de la tajada paralela a la superficie de falla

Método de Bishop Simplificado

Este método es parecido al de Fellenius con a diferencia de que, en el análisis de cada dovela, las fuerzas horizontales creadas entre dovelas si se toman en cuenta, pero las cortantes no.

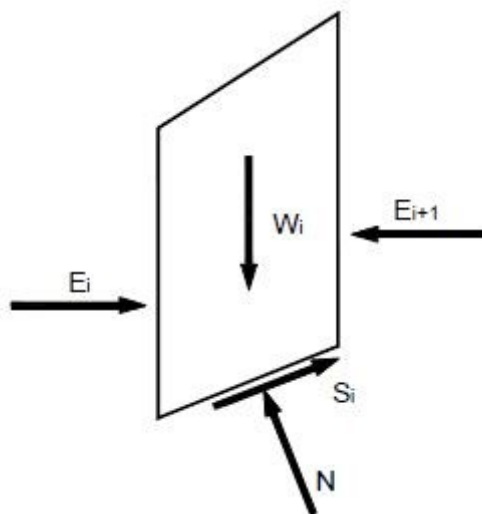


Ilustración 23. Interacción de fuerzas por método de Bishop (Duncan y Wright, 2005)

El factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta L \cos \alpha + (W' u \cos \alpha) \tan \varphi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')} \right]}{\sum W \sin \alpha} \quad (15)$$

En donde:

ΔL = Longitud de la base de la tajada paralela a la superficie de falla

W = Peso de cada dovela

c' , φ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros

α = Ángulo entre radio en función a la superficie de falla con la vertical del peso de cada tajada

Cabe denotar que el factor de seguridad FS está en los dos lados de la ecuación de tal modo que este proceso se obtiene mediante una serie de iteraciones para obtener en factor mínimo. Se considera un método aceptable pero no para diseño al igual que Fellenius.

Método de Janbú

Al igual que Bishop, este método desprecia los esfuerzos cortantes entre dovelas. Sin embargo, este método considera también fallas de tipo traslacionales y circulares a diferencia de Bishop que solo admite circulares.

Este método considera un factor de corrección el cual depende de la curvatura de la superficie de falla. A pesar de esto, Suarez (2009) estipula que este factor de corrección puede ser una fuente de inexactitud para los factores de seguridad.

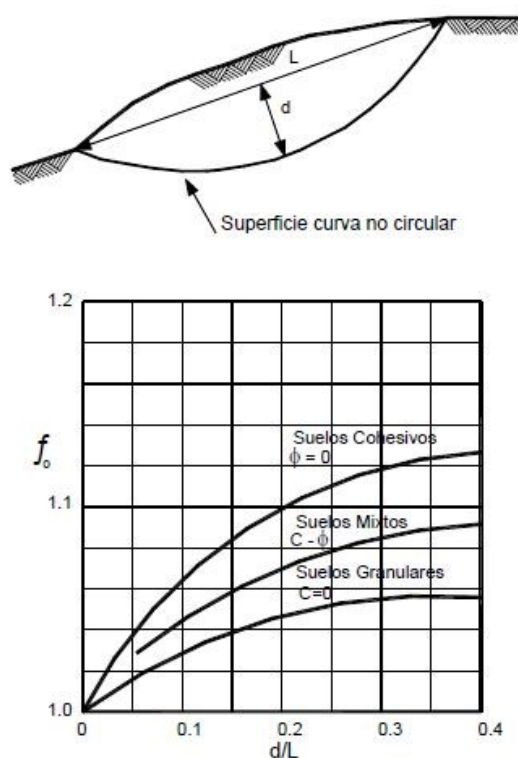


Ilustración 24. Figura de deslizamiento y diagrama para determinación de factor (Suarez, 2009)

El factor de seguridad se define como:

$$FS = \frac{f_0 \sum \left\{ [c' b + (W - ub) \tan \varphi] \frac{1}{\cos \alpha m a} \right\}}{\sum W \tan \alpha} \quad (16)$$

Método de Spencer

Este método se considera aceptable para el diseño de estabilización. En este caso, el sistema satisface el equilibrio de momentos y de esfuerzos considerando que las fuerzas entre dovelas son paralelas entre si teniendo el mismo ángulo de inclinación. Se plantea dos ecuaciones de equilibrio de momentos y fuerzas las cuales están en función al factor de seguridad y a los ángulos de inclinación entre dovelas.

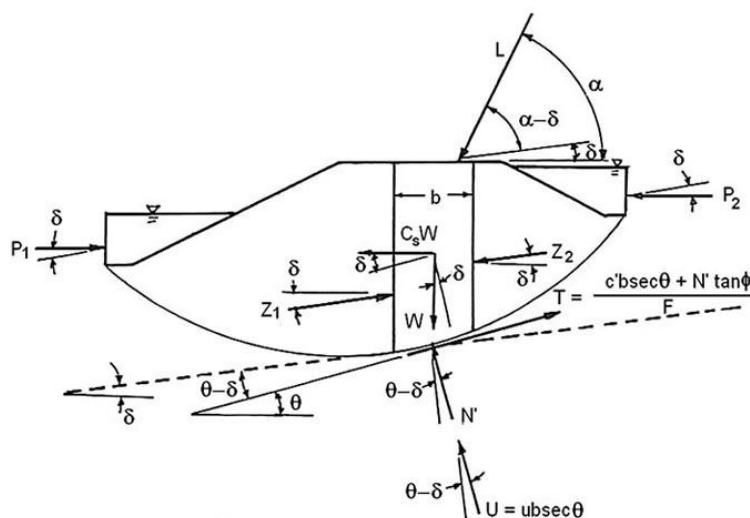


Ilustración 25. Interpretación del método de Spencer (Huang, 2014)

La complejidad de las ecuaciones hace que obligatoriamente se use un ordenador para poder determinar el factor de seguridad.

Método de Morgenstern & Price

Este método consiste en que las fuerzas cortantes entre dovelas están directamente relacionadas con las fuerzas normales (Duncan, J., Wright, S., & Brandon, T., 2014).

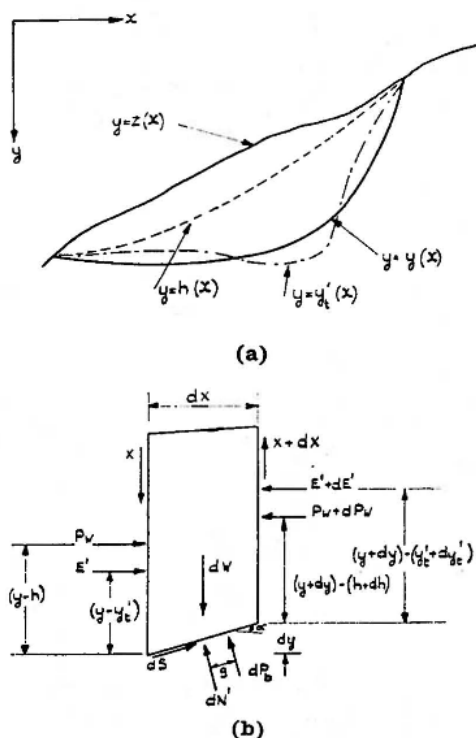


Ilustración 26. a) Potencial superficie de falla. b) Fuerzas actuantes en una dovela. (Morgenstern N.R. & Price V.E., 1956)

De tal modo que, desarrollando las ecuaciones, se define lo siguiente:

$$X = \lambda f(x)E \quad (17)$$

En donde:

X y E= fuerzas verticales y horizontales entre dovelas

λ = factor de escala desconocido

f(x)= Función que describe los valores en cada dovela

Según Suarez (2009), los métodos de Spencer y Morgenstern & Price satisfacen las condiciones de equilibrio de tal modo que son muy precisos en la aplicación en todo tipo de geometría y perfiles de suelo.

Existen otros métodos como el de elementos finitos, los cuales tienen una mayor precisión, sin embargo, demandan un alto conocimiento en la materia. El análisis basta con los métodos propuestos.

2.2. INVESTIGACIÓN DESARROLLADA EN EL DESLIZAMIENTO DE LLACAO

2.2.1. PROCESO DE INVESTIGACIÓN PARA DESLIZAMIENTOS

Para la investigación de procesos de deslizamientos, es importante recuperar o generar información del área de estudio. El estudio debe tener las siguientes investigaciones.

Topografía: Es importante desarrollar un estudio topográfico el cual pueda identificar la configuración del terreno del deslizamiento.

Geología: De la misma manera, es necesario conocer los antecedentes históricos geológicamente hablando, para conocer el tipo de material y sus características.

Hidrología: El agua, siendo factor detonante, toma una importancia relevante en deslizamientos. Conocer la pluviosidad máxima podrá determinar la afectación que esta tenga en la zona de estudio.

Investigaciones geotécnicas indirectas: Estas investigaciones son importantes ya que determinan la calidad de material que existe en los planos subyacentes a la superficie

Investigaciones geotécnicas directas: Ayudan para conocer las propiedades físico-mecánicas de los suelos. La importancia de estos estudios es conocer esfuerzos de compresión, corte, contenido de humedad, que son relevantes para la estabilidad del deslizamiento.

Factor de seguridad: Finalmente, conocer resultados que ayudan a determinar la estabilidad del deslizamiento. Se realiza mediante modelos matemáticos avanzados conjuntamente de las propiedades físico-mecánicas del suelo.

2.2.2. TOPOGRAFÍA DE LA ZONA E IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA

El deslizamiento se encuentra ubicado dentro del área y para este trabajo se ha tomado un área mayor que se encuentra de acuerdo con el siguiente cuadro.

COORDENADAS UTM		LATITUD/LONGITUD	
X (ESTE)	Y (NORTE)	LATITUD	LONGITUD
728000	9685000	-2.848045145	-78.948943512
730000	9687000	-2.829930521	-78.930991826

Tabla 15. Coordenadas del área de estudio.

Dentro de esta delimitación se encuentra la siguiente topografía.



Ilustración 27. Topografía de Llacao (Google Maps)

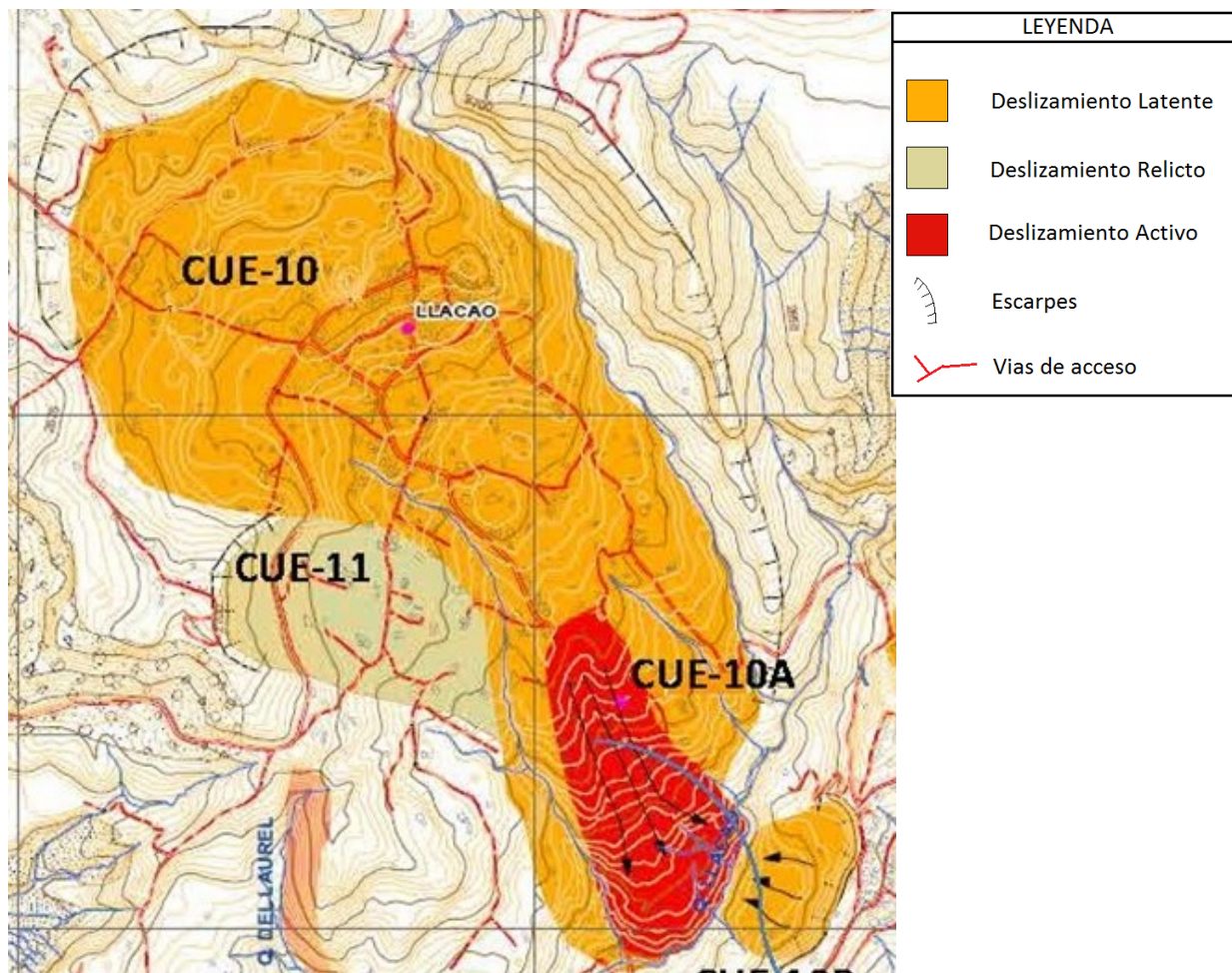


Ilustración 28. Deslizamiento de Llaqao (Rivera M, 2009)

El deslizamiento CUE-10 se le considera como el deslizamiento principal con una masa aproximada de 22 millones de m^3 con un escarpe principal de 30 metros de altura. Está clasificado como un deslizamiento rotacional en condición latente que involucra a materiales débiles en el pie del deslizamiento propensos a la falla.

Conjuntamente en el deslizamiento de Llaqao se encuentra CUE-10A el cual se considera un deslizamiento activo secundario formado por aproximadamente $900.000 m^3$ de material deslizante con un movimiento anual entre 14 y 31 cm.

Finalmente comprende el deslizamiento secundario CUE-11 el cual se encuentra en estado controlado estructural. Sin embargo, se ha encontrado un deslizamiento con las mismas características en estado activo por lo cual se debe estar alerta ante una futura activación.

2.2.3. ESTUDIOS GEOLÓGICOS DE LA ZONA

Primera unidad geológica: Material superficial

Depósitos Coluviales (Qc): Depósitos de material suelto con una relativa compacidad en función a su edad. Comprende aproximadamente entre un 60 y 80% de material arenoso limoso con cantos y sedimentos. Posiblemente su formación considera grandes espesores de material deslizado.

Segunda unidad geológica: Unidad Volcánica Miopliocénica

Miembro Llaeo (PLL): Comprende material volcanoclástico especialmente, es decir, flujos piroclásticos, flujos de cenizas y tobas asentadas en la zona. Su edad comprende en la edad del Plioceno el cual comprende una edad entre 3600 y 5333 millones de años. La topografía presenta relieves ondulados debido a la erosión hídrica y relieves colimados con una fuerte pendiente.

Tercera unidad geológica: Formaciones sedimentarias con arcillolitas

Formación Mangán (MM): Se constituye básicamente por material sedimentario fino denominado arcillolitas y lutitas limosas de color rojizo en la parte Oeste de la parroquia de Llaeo. El estudio indica que los relieves con fuerte pendiente son susceptibles a movimientos de tipo rotacional y traslacional mientras que los escarpes son susceptibles a derrumbes concluyendo que es material de alta erosión.

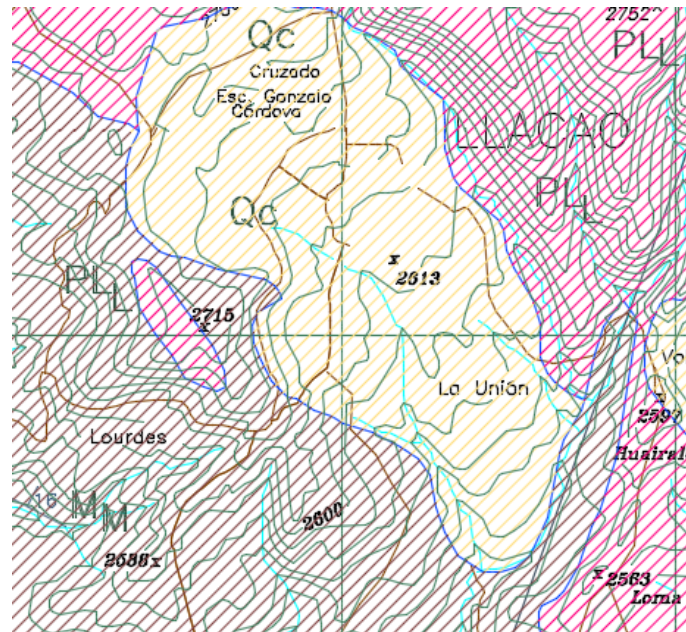


Ilustración 29. Formaciones y miembros geológicos parroquia de Llaqueo (PRECUPA, 1998)

Gracias al proyecto PRECUPA (1998) y a referencias literarias, se puede identificar dos unidades importantes en la parroquia. El miembro Llaqueo el cual tiene un espesor de no más de 35 metros y debajo la formación Mangán. Se cree que entre las dos formaciones está la supuesta superficie de falla

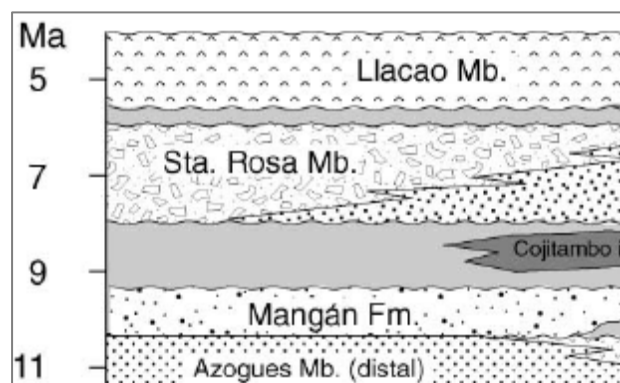


Ilustración 30. Formación existente en la parroquia de Llaqueo (Hugerbuhler, 2002)

2.2.4. ESTUDIOS HIDROLÓGICOS DE LA ZONA

La lucha contra el agua es una de las acciones más eficaces para prevenir, estabilizar o disminuir la velocidad de movimiento de un deslizamiento de terreno. (Chapeau, & Durville, 2005)

Los deslizamientos son activados por una serie de factores permanentes (estructura y naturaleza de la formación, pendiente, fallas geológicas, etc.) y de factores detonantes como la precipitación, fuga de canalizaciones, eventos telúricos, etc. Las napas freáticas juntamente con sus fluctuaciones vinculadas a condiciones meteorológicas; más la acción humana, son muy a menudo, el principio detonante para la inestabilidad de terrenos.

Así, una lluvia breve de muy fuerte intensidad arrastrará numerosos deslizamientos superficiales y flujos de lodo, mientras que lluvias de intensidad moderada pero que persisten varias semanas son susceptibles de provocar deslizamientos en gran escala. (Chapeau, & Durville, 2005)

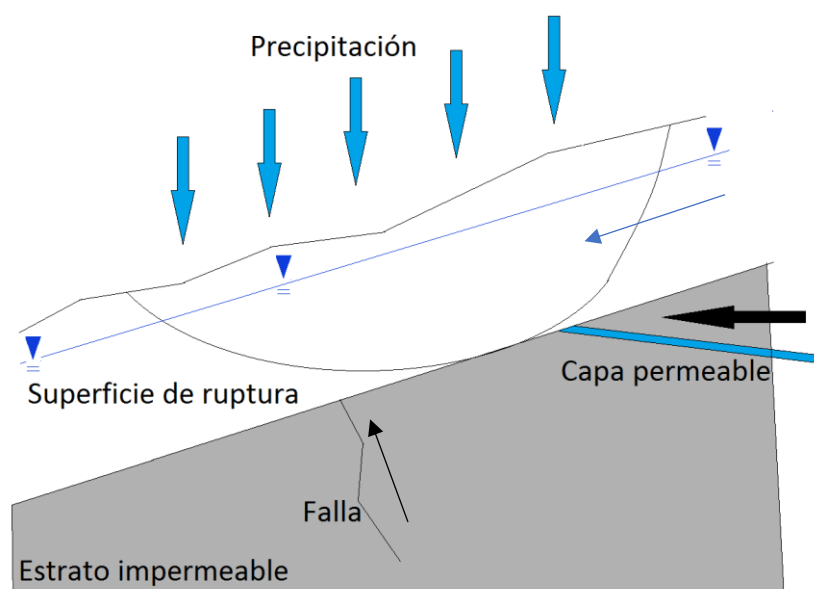


Ilustración 31. Diagrama esquemático de las principales entradas de agua en un deslizamiento (Chapeau & Durville, 2005)

Por este motivo, es necesario tener una base de datos hidrológicos de la zona, para entender la recurrencia, la cantidad de agua y el impacto que tiene el área de estudio. De esta manera, se presentan los datos de precipitación del aeropuerto “Mariscal Lamar” de la ciudad de Cuenca.

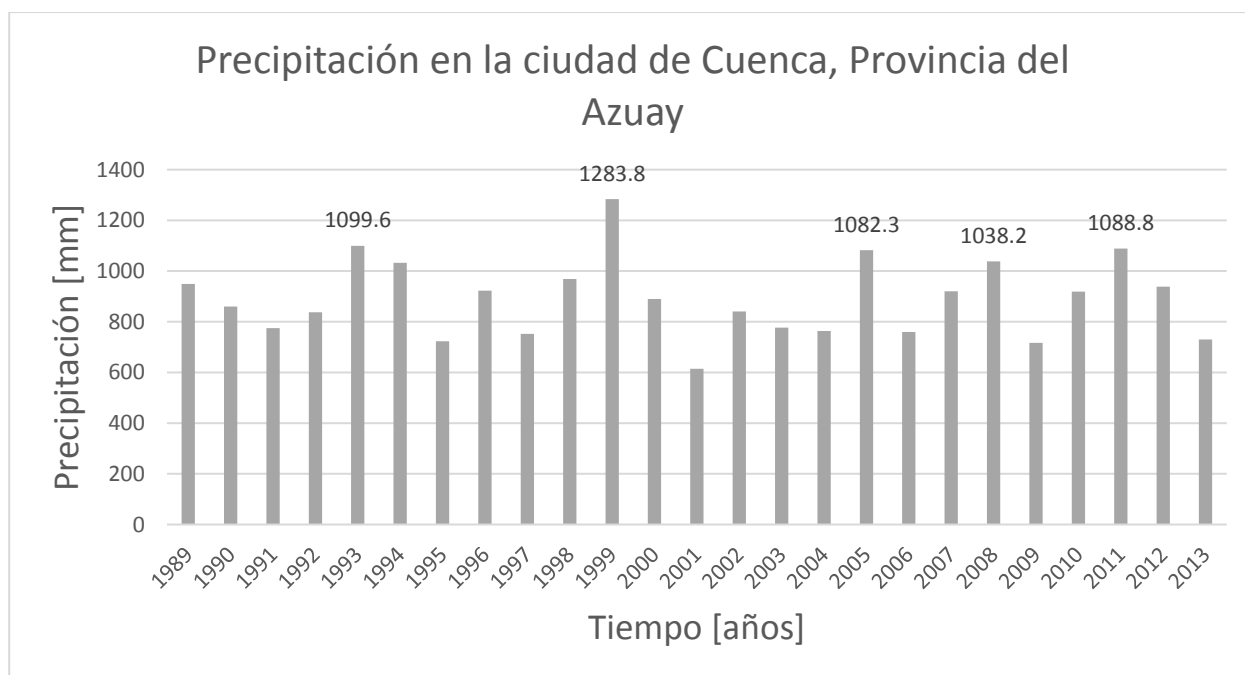


Ilustración 32. Precipitación anual desde 1989-2013 (Corpac, 2013)

En la gráfica, se puede observar que existen cinco periodos marcados en donde la precipitación excede los 1000 mm de agua siendo 1999 el año de máxima precipitación (fenómeno del niño) con un valor de 1283.8 mm/año.

Precipitación en periodos 1998-1999; 2004-2005; 2010-2011 en [mm]													
AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PT.
<i>1998</i>	52.8	146.7	136.1	89.0	178.1	25.3	37.4	24.7	13.7	142.7	74.9	47.3	968.7
<i>1999</i>	96.3	138.3	173.1	183.7	143.8	62.0	19.8	29.4	106.1	98.0	92.4	140.9	1283.8
<i>2005</i>	40.1	105.2	37.9	111.1	66.2	19.2	36.8	4.8	83.2	43.5	137.3	78.1	763.4
<i>2006</i>	60.4	115.8	224.1	122.8	56.6	70.2	11.8	7.4	5.2	149.7	33.1	225.2	1082.3
<i>2010</i>	13.5	102.4	71.4	144.4	89.5	96.9	88.6	18.4	44.4	27.6	88.6	133.4	919.1
<i>2011</i>	35.9	134.3	114.9	206.4	55.4	65.2	63.0	16.7	61.9	110.0	114.6	110.5	1088.8

Tabla 16. Precipitaciones críticas anuales (Corpac, 2013)

Conjuntamente, se incluyen los años posteriores a la máxima precipitación registrada y se puede crear la siguiente gráfica.

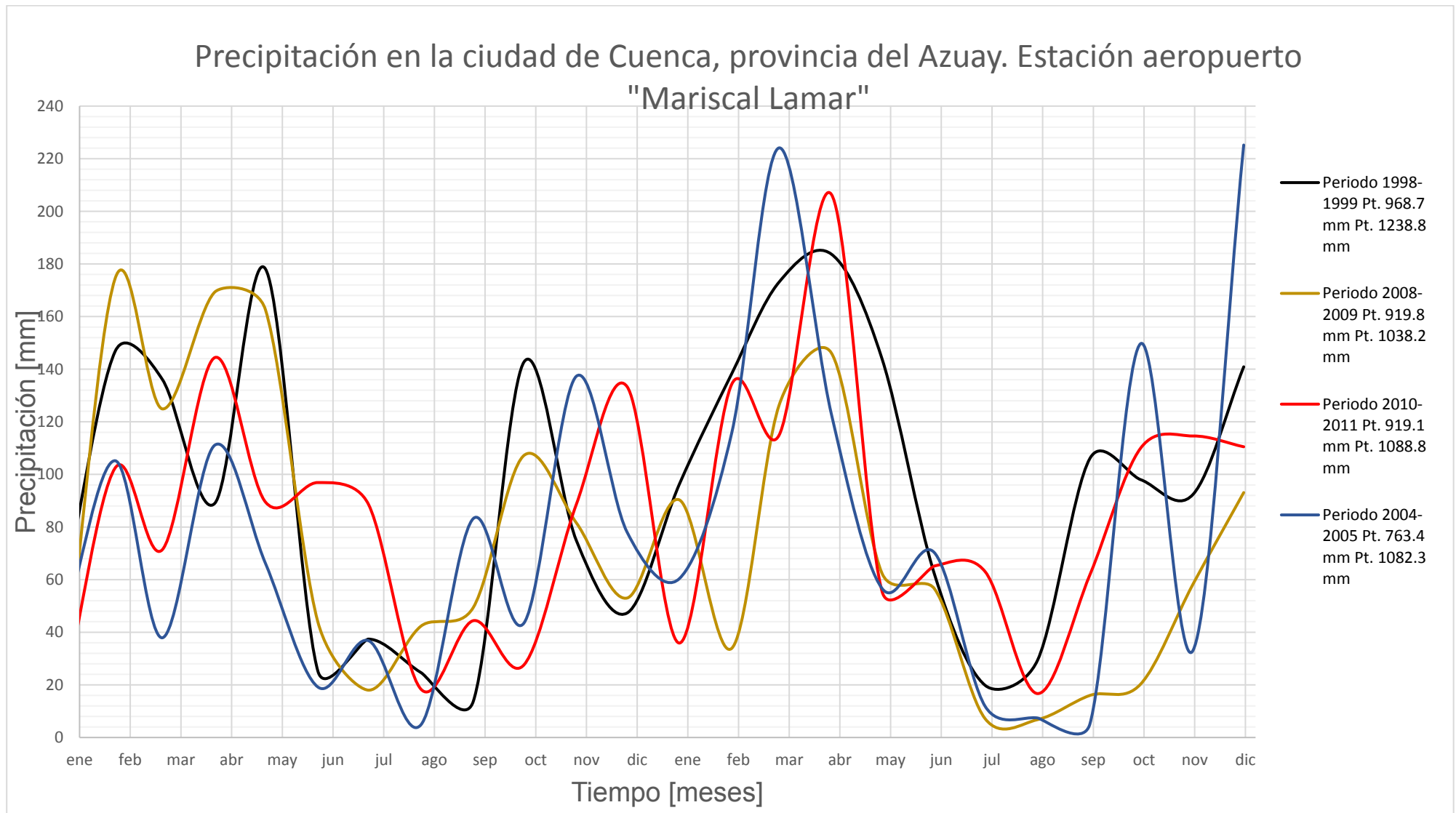


Ilustración 33. Precipitación periodos críticos (Corpac, 2013)

En la siguiente gráfica, se observan cuatro periodos los cuales son los de 1998-1999, 2004-2005, 2008-2009 y 2010-2011. En el periodo de 1998-1999 se puede observar un comportamiento *estratiforme*, el cual indica que existe un incremento gradual de la precipitación en un lapso más amplio y este afecta especialmente en suelos arcillosos. El tiempo comprende entre finales de noviembre hasta inicios de julio. De la misma manera podemos considerar con el mismo comportamiento el periodo de 2010-2011 que va desde inicios de febrero hasta inicios de agosto. Por otro lado, el periodo del 2004-2005 tiene un comportamiento *convectivo* el cual indica que existe una precipitación abrupta en un corto periodo de tiempo como se observa a finales de diciembre e inicios de mayo.

Los registros históricos indican que existió eventos de inestabilidad en los periodos de 1998-1999, 2008-2009 y 2010-2011 en la parroquia de Llaoca. Se podría deducir que se producirán deslizamientos con aquella precipitación de tipo estratiforme que superó los 1000 mm de agua tomando en cuenta que el área de impacto está el depósito coluvial (Qc) formado por arenas y debajo la formación Mangán formado por material arcilloso.

Se debe realizar un estudio de factor de seguridad para determinar la altura crítica de las napas freáticas y así poder desarrollar obras de mitigación como drenajes superficiales, subdrenes de zanja, subdrenes de penetración, etc.

2.2.5. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS REALIZADAS

Las investigaciones geotécnicas sirven especialmente para conocer la naturaleza y la distribución espacial de los subsuelos de manera indirecta y directa.

En los sondeos indirectos, las mediciones se realizan mediante la inducción de corriente en el terreno entre electrodos para obtener resistividades y profundidad. Las resistividades logradas, determinarán el tipo de mineral subyacente con su respectivo espesor y la presencia de agua si existiese.

Los sondeos directos, consiste en la recuperación de testigos para realizar pruebas de laboratorio como clasificación de suelos, resistencia a la compresión y corte, etc. En el informe se recomendó hacer pozos con recuperación de testigos para determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo.

A continuación, se presenta la ubicación de los sondeos eléctricos verticales en el deslizamiento.

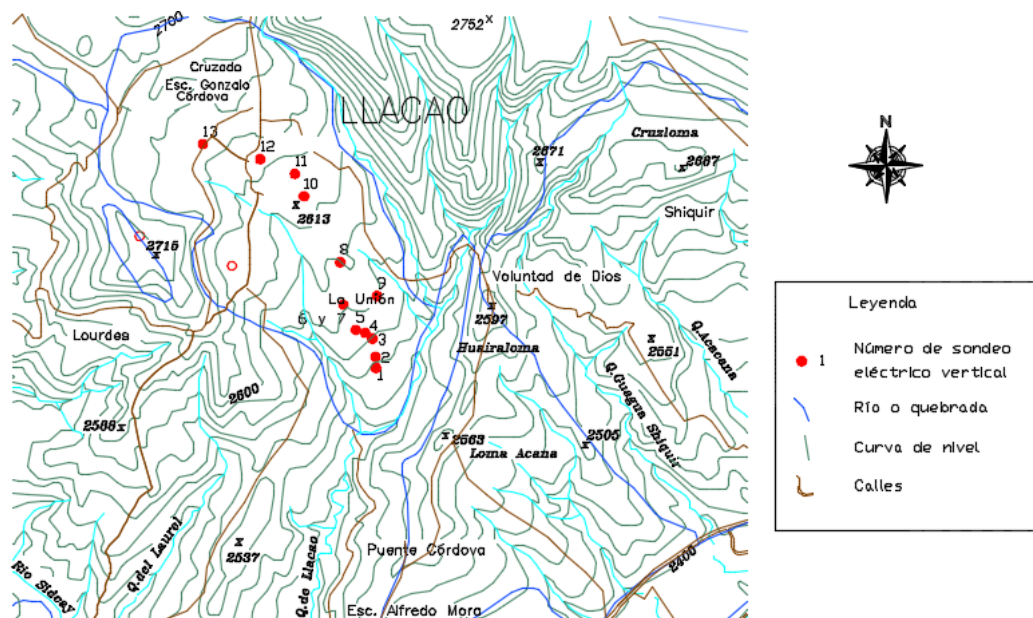


Ilustración 34. Ubicación sondeos eléctricos verticales (Rivera M., 2009)

De la misma manera, se presenta la ubicación de la perforación de los pozos en la zona.

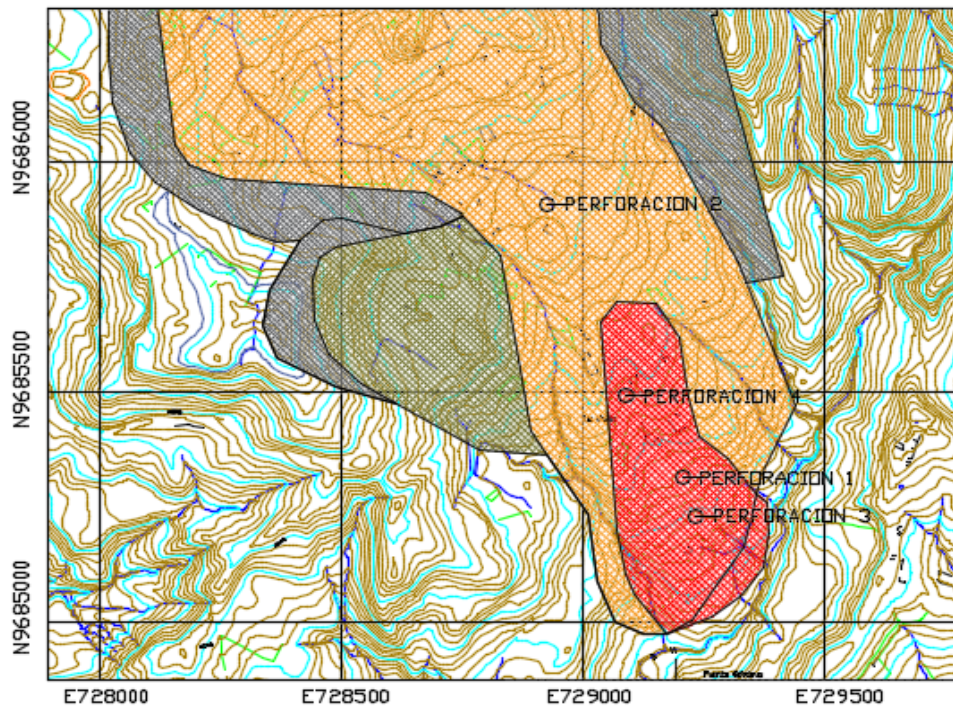


Ilustración 35. Sondeos directos (Rivera M., 2013)

De esta manera, se puede obtener los resultados los sondeos indirectos y directos e identificar dos unidades geotécnicas que se presentan a continuación:

SONDEO INDIRECTO					SONDEOS DIRECTOS						
SEV NO.	R.E.V. [Ohm.m]	ESPESOR [m]	ERROR %	CLASIF.	PERF. NO.	ESPESOR [m]	CLASF. SUCS	γ [KN/m ³]	γ_d [KN/m ³]	COHESIÓN [KPa]	ANG. FRICC [Φ]
1	9.93	2.84	4.1	Arcilla saturada sat.	3	3.00-11.45	CL	18.94	15.41	41.2	2.6
	5.93	3.04		M, S, C saturados		16.00-16.45	CH	18.63	14.45	68.67	10
	11.35	13.95		M, G, S, C sat.		18.30-18.62	CL	18.26	15.75	107.91	9.5
	5.06	-		Arcilla saturada sat.		28.00-28.50	GM	18.15	-	-	-
3	13.55	3.13	5.6	M, G, S, C sat.	1	1.00-1.45	CL	18.93	15.13	29.43	9.5
	16.54	9.96		SW, SP, G sat.		1.45-2.00	MH	15.89	8.52	4.91	3.2
	6.34	-		M, S, C saturados		5.00-5.45	SW/SP-SM	18.88	-	-	-
						11.00-20.45	SM	19.46	15.18	28.45	17
6	11.74	2.95	3.8	M, G, S, C sat.	4	1.00-1.45	SC	-	-	-	-
	20.45	10.66		SW, SP, G sat.		5.00-7.45	ML	-	-	-	-
	7.64	-		Arcilla saturada sat.		10.00-14.25	SM	-	-	-	-
7	10.65	2.05	11.2	Arcilla saturada sat.		15.00-15.45	GM	-	-	-	-
	23.52	13.87		SW, SP, G sat.	18.00-18.45	SM	-	-	-	-	
	5.88	-		M, S, C saturados			-	-	-	-	
10	6.29	5.04	4.4	M, S, C saturados	2	6.00-6.45	SM	-	-	-	-
	16.06	28.53		SW, SP, G sat.				-	-	-	-
	7.64	-		Arcilla saturada sat.				-	-	-	-
12	23.73	5.89	8.1	SW, SP, G sat.	15.00-15.45	SM	-	-	-	-	
	28.23	5.94		SW, SP, G sat.			-	-	-	-	
	8.42	46.21		Arcilla saturada sat.	25.50-26.00	SW/SP-SM	-	-	-	-	
							M, G, S, C sat.	-	-	-	-

Tabla 17. Resultados de sondeos directos e indirectos (Rivera, 2009)

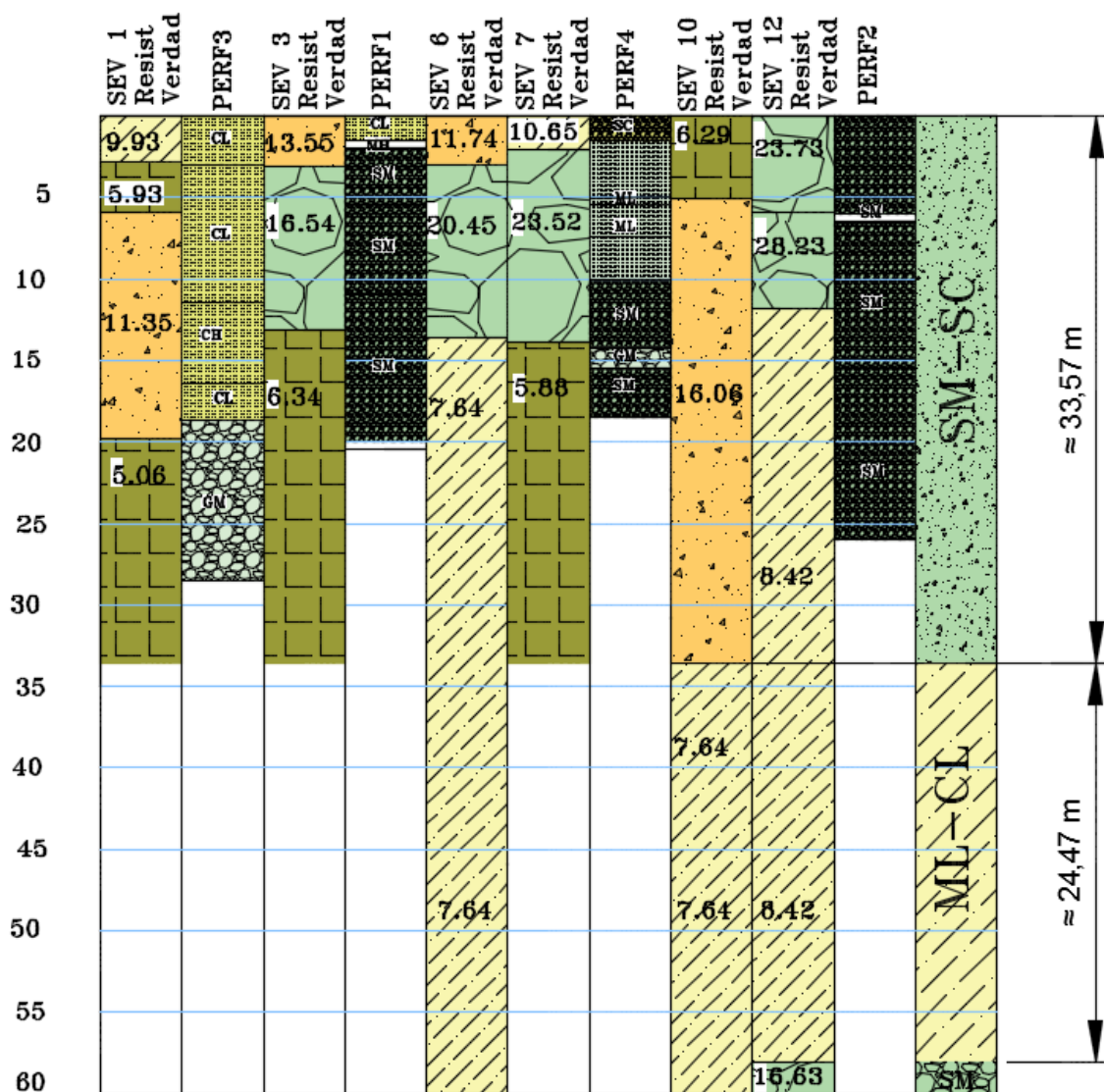


Ilustración 36. Estratigrafía de Llaqueo

RESISTIVIDAD ELECTRICA VERDADERA (Ohm.m)	CORRELACIÓN HIDROGEOLÓGICA
3-6	Limos, arenas finas a gruesa, limos arcillosos saturados
7-10	Arcilla pura saturadas
11-16	Limos, arenas grano fino a medio, limos arcillosos saturados
17-29	Arena de grano grueso

RESUMEN DE PARAMETROS GEOMECÁNICOS DEL SUELO					
UNIDAD	TIPO DE SUELO	PESO UNIT [KN/m ³]	PESO UNIT. SECO [KN/m ³]	COHESIÓN [kPa]	FRICCIÓN [Φ]
1	SM-SC	18.93	15.12	29.43	9.5
	SM-SC	18.88	15.19	28.45	27
	SM-SC	19.46	15.64	49.05	17
2	ML-CL	18.9333	15.12702	29.43	9.5
	ML-CL	18.94311	15.41151	53.955	2.6
	ML-CL	18.25641	15.48018	41.202	7.2
	ML-CL	18.1485	15.75486	107.91	9.5

Tabla 18. Resumen de parámetros geo mecánicos del estudio de suelos (Rivera, Estudio para la estabilización del deslizamiento de Llaaco, Consultoria, 2013)

Este resumen puede ser ratificado por los resultados obtenidos del Proyecto

PRECUPA (1998) que se presentan a continuación:

	CLASIFIC.	PARAMETROS FISICO-MECÁNICOS						CLASIFIC.
	SUCS	K	γ	C'	Φ'	C _u	Φ _u	Bieniaski
		(m/s)	(KN/m ³)	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	
DEPÓSITO COLUVIAL	SC- CL	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸	17 - 21	0 - 10	15 – 28	30-50.	0 –20.	
FORMACIÓN MANGAN	ML - CL	10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁸	* 18 - 21	*10 - 30	* 18- 26	30	7-15.	V

Tabla 19. Parámetros Físico-Mecánicos (PRECUPA, 1998)

Conjuntamente en los resultados de laboratorio se pudo concluir que es un suelo de tipo

E por lo cual, los factores sísmicos del capítulo de la norma ecuatoriana de peligro sísmico son

de Z= 0.25g y Fa= 1.4. Por lo tanto, el coeficiente sísmico horizontal se define como:

$$K_h = 0.6 \frac{0.25g * 1.4}{g} = 0.21$$

2.3. APLICACIÓN DE LA GEOTECNIA EN EL CASO DE ESTUDIO

Para conocer la estabilidad de un talud o laderas, es necesario implementar un método de análisis previamente mencionados para obtener los factores de seguridad que cumplan con la norma.

Se deben usar métodos que cumplan el equilibrio ya sea de momentos como de fuerzas. Por esta razón, los métodos de análisis a usarse para los cálculos serán Spencer, Morgenstern Price y Bishop en el programa computacional SLOPE/W.

De acuerdo con la norma ecuatoriana de la construcción (NEC_SE_GC,2015), se debe cumplir las siguientes condiciones para factores de seguridad.

- Taludes - condición estática y agua subterránea normal: Diseño: **1.5**; Construcción: 1.25.
- Taludes – condición pseudo estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño. Diseño: **1.05**; Construcción: 1.00*.

De la misma manera, se variará la profundidad del nivel freático para así obtener la altura crítica cuando el factor de seguridad cumpla con la norma.

Los datos que se usarán en la modelación serán los valores presentados del proyecto PRECUPA (1998) ya que presentan parámetros efectivos y totales de las muestras que hayan tomado

2.3.1. DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE ANÁLISIS.

A continuación, se presenta la ubicación de los perfiles seleccionados en planta.

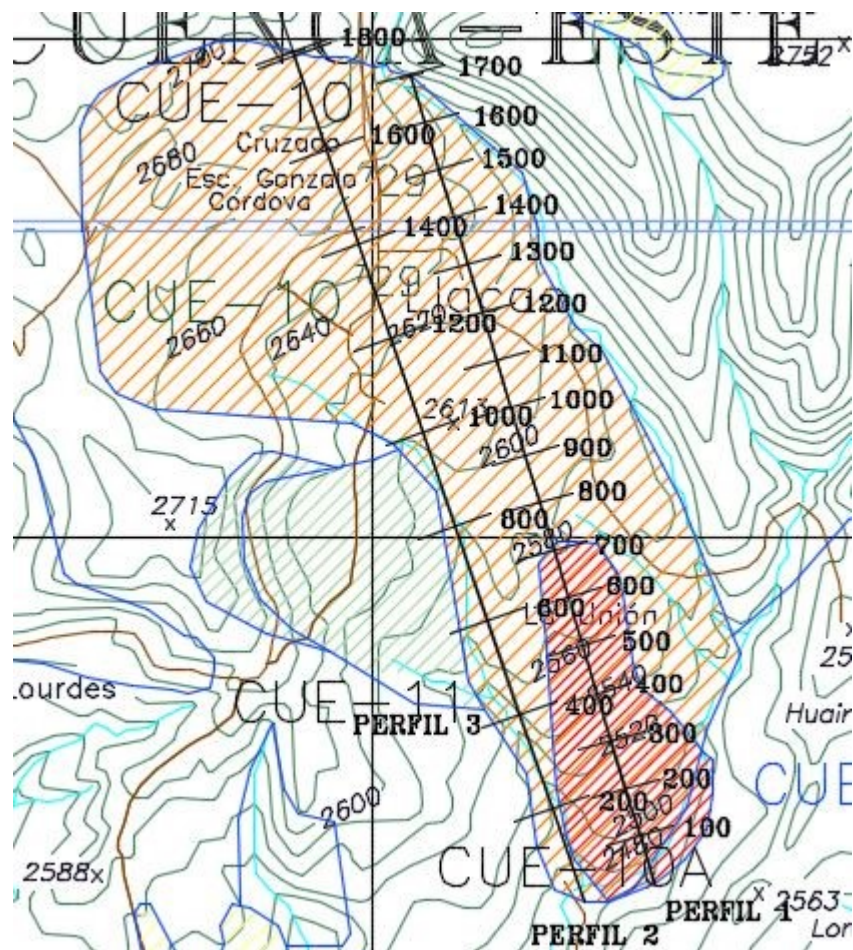


Ilustración 37. Perfiles: Perfil 1: Latente+Activa, Perfil 2: Latente, Perfil 3: Activo

El primer perfil, incluye el área latente más el área activa de la zona con una distancia aproximada de 1700 m con una pendiente aproximada del 12%.

El segundo perfil, incluye el área latente con una distancia de 1800 m con una pendiente del 12%.

Finalmente, el tercer perfil incluye solamente el área activa la cual comprende una distancia de aproximadamente 700 m con una pendiente del 12%.

2.3.2. MODELACIÓN EN SOFTWARE

El programa para modelar como se dijo anteriormente es SLOPE/W desarrollado por GeoStudio 2016. Como primera acción, se incluyeron los puntos para crear la geometría de los perfiles y delimitar las unidades geotécnicas para cada tipo de material

Segundo, se incluye las propiedades de material con el criterio de falla de Mohr-Coulomb en donde se incluye el peso específico húmedo del material, la cohesión y el ángulo de fricción interna. En este caso, se usaron los valores altos y bajos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico del documento PRECUPA (1998)

Como tercera parte, se define el inicio y fin del deslizamiento conjuntamente de la altura del nivel freático para el perfil. Es importante también incluir un análisis seudoestático para un análisis dinámico. Finalmente, con todos los parámetros incluidos, se corre el programa y se obtienen los factores de seguridad.

2.3.3. FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS

Como se dijo anteriormente, el análisis será desarrollado bajo condiciones estáticas y dinámicas con una variación del nivel freático desde los 5 metros hasta los 30 metros de profundidad. Para el análisis estático se toma en cuenta las siguientes citas. *“NOTA: se advierte que los esfuerzos normales empleados son valores relativos a la presión atmosférica PA y que cualquier otra definición de esfuerzo cortante a la falla debe ir en término de esfuerzos efectivos.”* (NEC-SE.GC, 2015). *“Inestabilidad en pendientes naturales es relacionado a menudo con altas presiones internas de agua asociados con periodos húmedos. Es apropiado analizar tales condiciones a largo plazo, con una infiltración estable, usando esfuerzos drenados y la posición las probable y crítica de la línea piezométrica dentro de la pendiente”* (U.S. Army Corps of Engineers, 2003).

En cuanto al análisis dinámico dice lo siguiente: “El análisis de estabilidad es entonces desarrollado parecido a un análisis de estabilidad a corto plazo, usando parámetros de **esfuerzos cortantes expresados en términos de esfuerzos totales.**” (J Duncan, 2014).

A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Perfil 1: Deslizamiento activo más latente modelado con nivel freático a diferentes profundidades

FACTORES DE SEGURIDAD: PERFIL 1.					
ANÁLISIS ESTÁTICO					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.5)
5	1.69	1.69	1.69	Cumple	Cumple
10	1.85	1.849	1.849	Cumple	Cumple
20	2.160	2.160	2.160	Cumple	Cumple
30	2.595	2.594	2.595	Cumple	Cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. DEBIL					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
5	0.486	0.486	0.486	No cumple	No cumple
10	0.512	0.511	0.511	No cumple	No cumple
20	0.559	0.559	0.559	No cumple	No cumple
30	0.627	0.627	0.627	No cumple	No cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. FUERTE					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
5	0.886	0.886	0.886	No cumple	No cumple
10	0.946	0.946	0.946	No cumple	No cumple
20	1.056	1.057	1.057	Cumple	Cumple
30	1.191	1.191	1.191	Cumple	Cumple

Tabla 20. Factores de seguridad Perfil 1

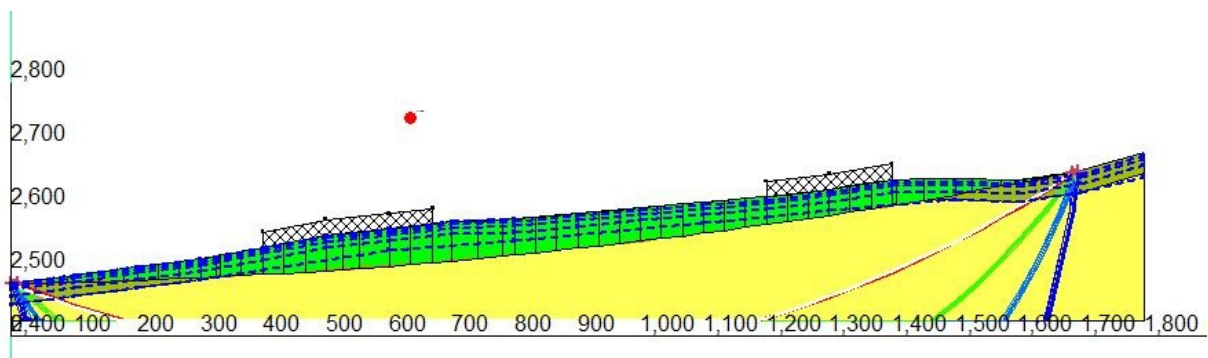


Ilustración 38. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.

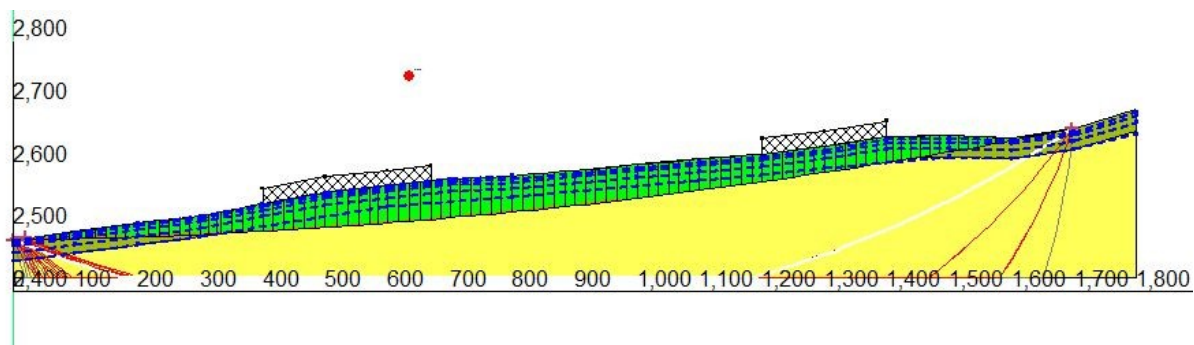


Ilustración 39. Análisis dinámico material débil, nivel freático 5 m de prof.

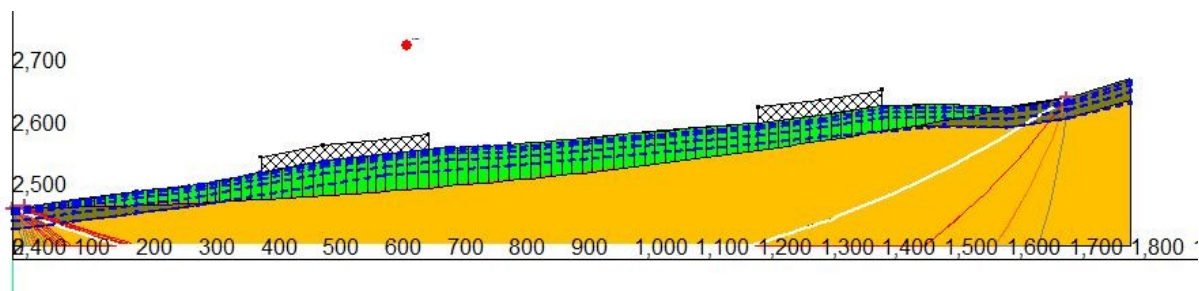


Ilustración 40. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 5 m de prof.

Perfil 2: Deslizamiento latente considerando un nivel freático a diferentes profundidades

FACTORES DE SEGURIDAD: PERFIL 2.					
ANÁLISIS ESTÁTICO					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.5)
5	1.473	1.473	1.458	Cumple	No cumple
10	1.652	1.652	1.641	Cumple	Cumple
20	1.976	1.976	1.970	Cumple	Cumple
30	2.315	2.316	2.313	Cumple	Cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. DEBIL					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
5	0.486	0.485	0.483	No cumple	No cumple
10	0.508	0.508	0.507	No cumple	No cumple
20	0.547	0.547	0.546	No cumple	No cumple
30	0.591	0.592	0.591	No cumple	No cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. FUERTE					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
5	1.062	1.062	1.062	Cumple	Cumple
10	1.148	1.148	1.148	Cumple	Cumple
20	1.297	1.297	1.297	Cumple	Cumple
30	1.438	1.437	1.438	Cumple	Cumple

Tabla 21. Factores de seguridad Perfil 2

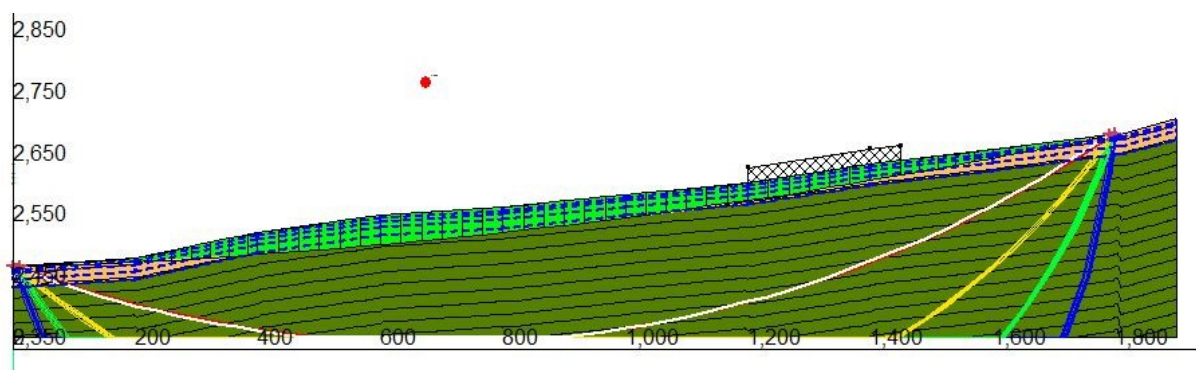


Ilustración 41. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.

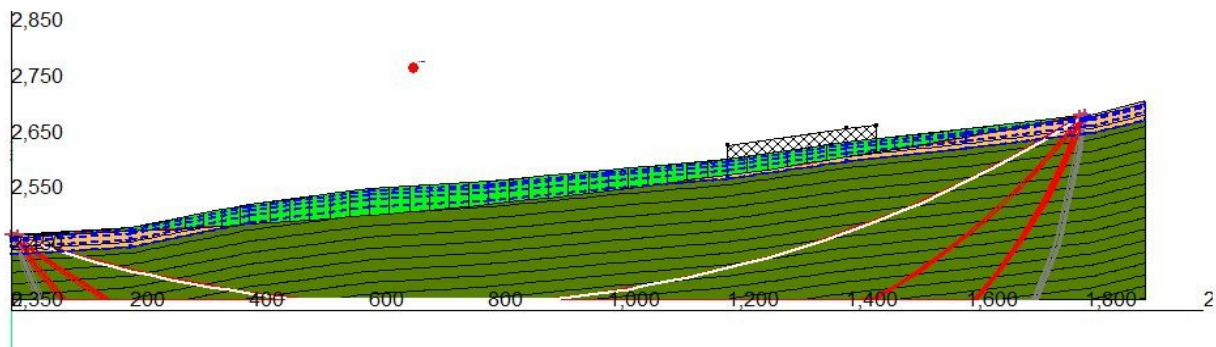


Ilustración 42. Análisis dinámico material débil, nivel freático 5 m. de prof.

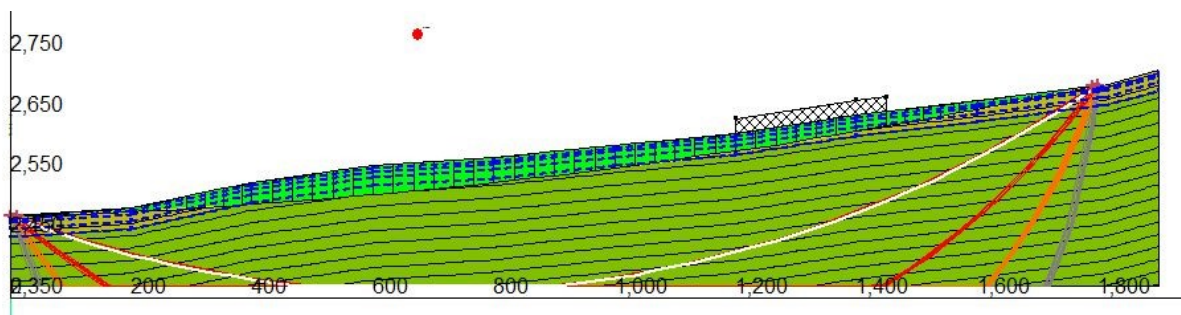


Ilustración 43. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 5 m. de prof.

Perfil 3: Deslizamiento activo considerando un nivel freático a diferentes profundidades

FACTORES DE SEGURIDAD: DESLIZAMIENTO ACTIVO.					
ANÁLISIS ESTÁTICO					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.5)
1	0.828	0.827	0.827	No cumple	No cumple
5	1.126	1.126	1.126	Cumple	No cumple
10	1.297	1.299	1.299	Cumple	No cumple
20	1.500	1.501	1.501	Cumple	Cumple
30	1.775	1.775	1.775	Cumple	Cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. DEBIL					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
1	0.546	0.546	0.546	No cumple	No cumple
5	0.556	0.556	0.556	No cumple	No cumple
10	0.568	0.567	0.568	No cumple	No cumple
20	0.590	0.587	0.590	No cumple	No cumple
30	0.622	0.618	0.623	No cumple	No cumple
ANÁLISIS DINÁMICO: MAT. FUERTE					
	MÉTODOS DE ANÁLISIS			CUMPLIMIENTO	
NIVEL FREÁTICO	BISHOP	MORG.PR	SPENCER	EQ. LÍMITE (>1)	NEC (>1.05)
1	0.807	0.807	0.808	No cumple	No cumple
5	0.833	0.834	0.834	No cumple	No cumple
10	0.862	0.864	0.864	No cumple	No cumple
20	0.918	0.919	0.919	No cumple	No cumple
30	0.992	0.993	0.993	No cumple	No cumple

Tabla 22. Factores de seguridad Perfil Activo

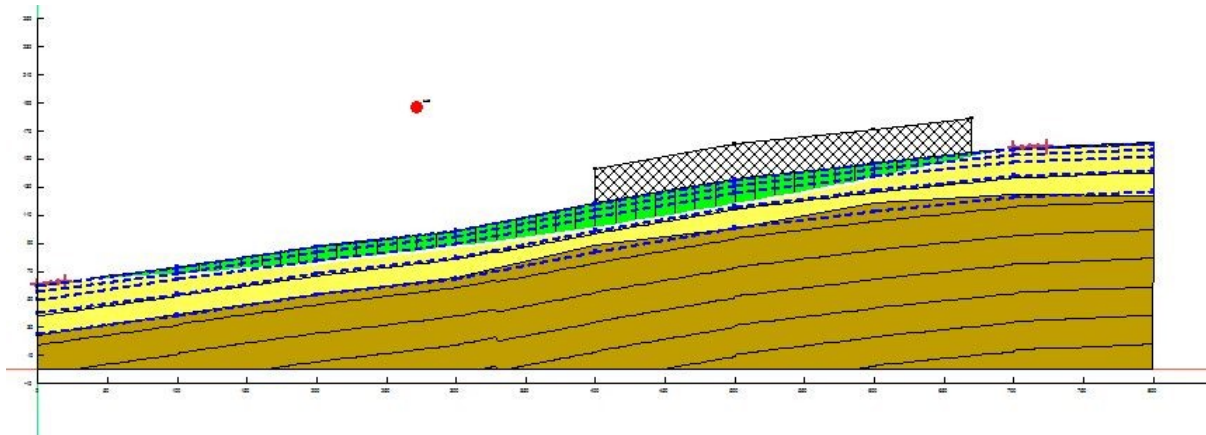


Ilustración 44. Análisis estático, nivel freático 1 m de prof.

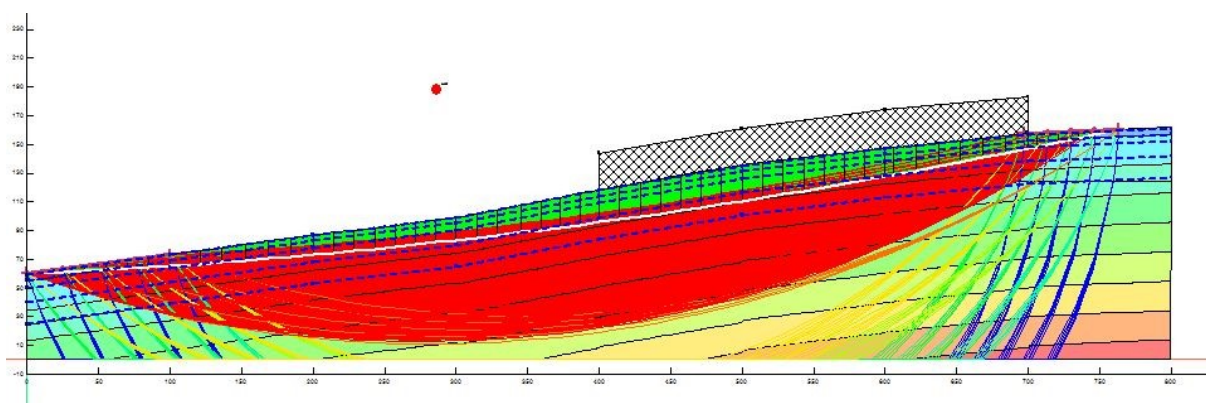


Ilustración 45. Análisis estático, nivel freático 5 m de prof.

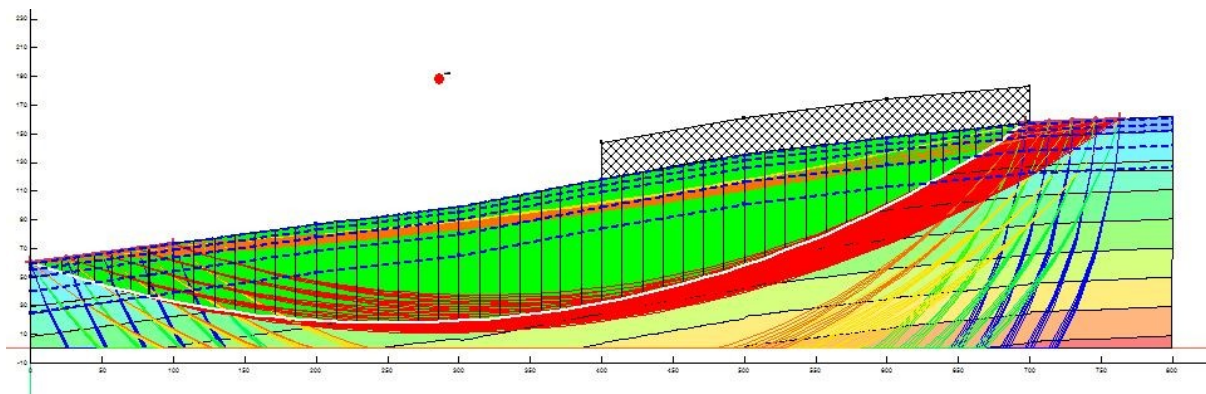


Ilustración 46. Análisis estático, nivel freático 10 m de prof.

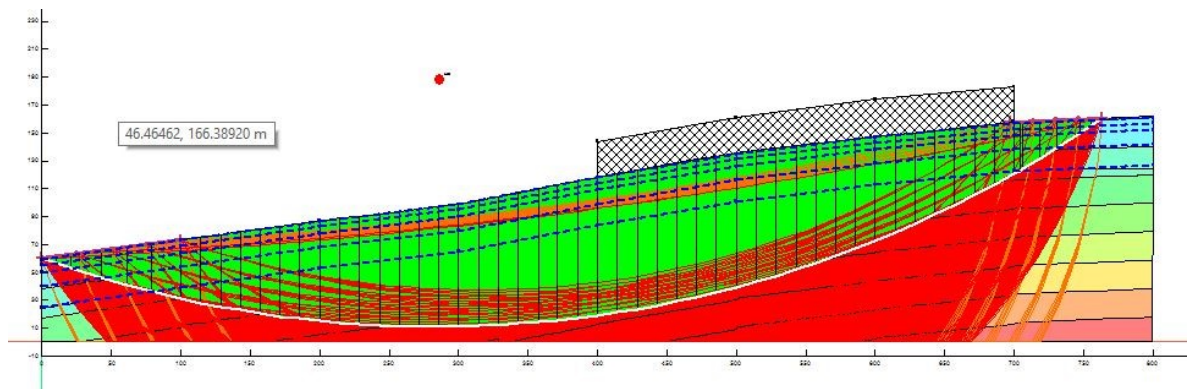


Ilustración 47. Análisis dinámico material débil, nivel freático 1 m de prof.

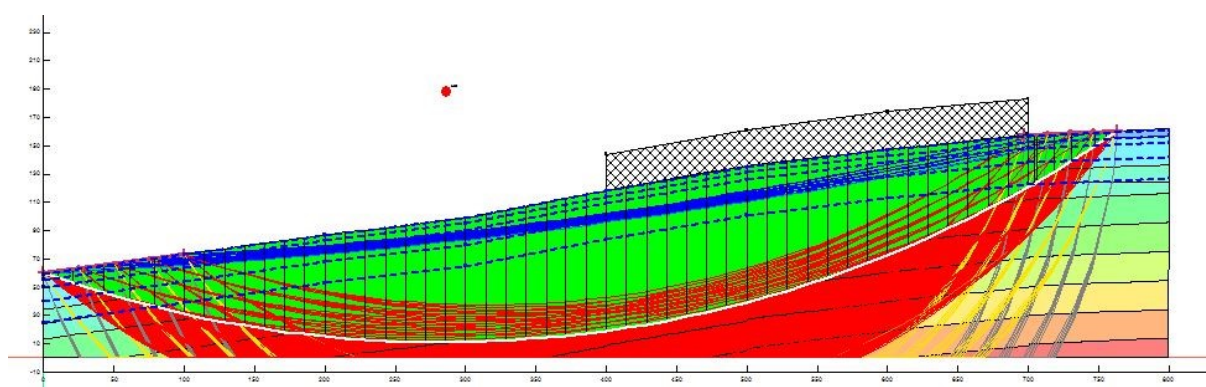


Ilustración 48. Análisis dinámico material fuerte, nivel freático 10 m de prof.

En el caso de estudio, se usaron los valores más bajos de los parámetros físico mecánicos para un análisis estático y valores bajos/altos para un análisis dinámico del proyecto PRECUPA (1998).

El perfil 1 obtuvo valores aceptables en un análisis estático, sin embargo, en un análisis dinámico, los valores de material débil no cumplen según la norma; los valores de material fuerte por otro lado, cumplieron cuando el nivel freático tenga una profundidad de 20 m.

El perfil 2, obtuvo de la misma manera valores aceptables con un nivel freático a partir de los 10 m. de profundidad. En el análisis dinámico, para valores de material débil no cumplió mientras que para valores de material fuerte cumplieron todos.

Finalmente, para el perfil activo, el análisis estático cumple a partir de los 20 m. de profundidad con una superficie de ruptura aproximada de 14 m. de profundidad; mientras que, para un análisis dinámico para material débil y fuerte, no cumplieron teniendo una superficie de ruptura crítica de 90 m. de profundidad aproximadamente. Cabe recalcar que este análisis está basado en una falla de tipo rotacional. Se deberá realizar un análisis de tipo traslacional para ratificar o modificar los resultados. Se debe considerar también un análisis de deformaciones ante carga sísmica como propone Bray & Travararou (2007).

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de inestabilidad de terrenos, específicamente taludes, se debe tomar en cuenta diversos factores para determinar el factor de seguridad de una ladera natural o un talud construido.

La necesidad de un estudio topográfico, ayudará a la obtención de las características del terreno a la vez con la pendiente del mismo. Como se revisó anteriormente, la pendiente es un factor condicionante muy importante que se debe tomar en cuenta.

Tener un estudio geológico detallado el cual incluya todas las formaciones regionales y locales. En este caso, se tienen tres geologías bien marcadas como la formación Mangán, el miembro Llaeo y el depósito coluvial que desde ya indican que ha existido previamente un evento de inestabilidad en el pasado.

La hidrología cumple un papel muy importante siendo el agua un factor detonante para evento de inestabilidad. En este caso, se esperaría que existan eventos de inestabilidad en la parroquia cuando la precipitación tenga un comportamiento estratiforme que superen los 1000 mm de agua anuales.

Las investigaciones directas e indirectas son muy importantes para obtener los parámetros físicos y mecánicos del suelo que ayudan para la modelación y obtención de los factores de seguridad. Tomando en cuenta que este evento es de categoría especial según la NEC, **se deben realizar al menos cinco sondeos a lo largo del deslizamiento a una profundidad mínima de 30 m.** (se sugiera superar los 30) para poder obtener testigos, realizar los ensayos pertinentes y obtener una estratigrafía mejor definida.

Teniendo en cuenta estos resultados, se concluye que con los parámetros físico mecánicos desarrollados por el proyecto PRECUPA (1998) y para una posterior construcción habitacional en el deslizamiento latente se debe mantener el nivel freático a 20 m. de profundidad para que cumpla la demanda dinámica según la norma. Para el deslizamiento activo, se deberá hacer una investigación exhaustiva y proponer planes de mitigación debido a que no cumple el factor de seguridad que propone la norma ante una demanda sísmica, por lo tanto, se sugiere no realizar construcciones dentro del deslizamiento activo.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F. M. (1993). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México : Limsa.
- B Das, J. C. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson.
- Blyth, F. (1989). *Geología para ingenieros* . México: CECSA.
- C Chapeau, J. D. (2015). *L'eau souterraine. Géosciences*, (2), 72-78. Obtenido de http://www.brgm.fr/sites/default/brgm/publications/revue_geosciences2/files/assets/downloads/revue_geosciences2.pdf
- Definición ABC*. (17 de Enero de 2017). Obtenido de <http://www.definicionabc.com/geografia/acuifero.php>
- Deslizamientos afectan a viviendas en Llacao. (2012). *El Tiempo*, págs. <http://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/293051/deslizamientos-afectan-a-viviendas-en-llacao>.
- Díaz, J. S. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.
- Díaz, J. S. (2009). *Deslizamientos*. Bucaramanga, Colombia : División de Publicaciones UIS.
- E Juárez Badillo, A. R. (1974). *Mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Gispert, C. (1999). *Mentor interactivo*. Barcelona: Océano.
- Huang, Y. (2014). *LEAME Software and User's Manual*. Reston: American Society of Civil Engineers.
- Ibáñez, J. (enero de 2008). *Movimientos de Tierra en Flujo: Solifluxión y Reptación (Desastres Naturales)*. Obtenido de Un Universo invisible bajo nuestros pies: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2008/06/20/95172>
- J Duncan, S. W. (2014). *Soil strength and slope stability*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Kumar, K. (2008). *Basic geotechnical earthquake engineering* . New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers.
- M Ríos Cabrera, M. R. (2010). Estudio exploratorio de las propiedades físicas de suelos y su relación con los deslizamientos superficiales: Cuenca del río Maracay, estado Aragua-Venezuela. *Revista geográfica Venezolana* , 51(2) <http://dx.doi.org/n.d>.
- Mendieta, C. S. (2014). En Llacao urge control de deslizamientos. *El Mercurio*, págs. <http://www.elmercurio.com.ec/418633-en-llacao-urge-control-de-deslizamientos/>.

- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. Londres: William Cloves & Sons.
- Municipalidad de Cuenca PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PARROQUIA LLACAO. (s.f.). Cuenca, Llacao, Ecuador .
- NEC-SE-DS. (2014). *Peligro sísmico. Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito: Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.
- NEC-SE-GC. (2014). *Geotecnia y Cimentaciones. Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito: Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.
- PRECUPA. (1998). *Prevención de Desastres Naturales en la Cuenca del Paute*. Cuenca.
- Riesgos), (. d. (2016). *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.guia práctica para la ejecucion de estudios geotécnicos y trabajos de cimentación. de conformidad con la norma ecuatoriana de la construccion NEC* . Quito : imprenta activa.
- Rivera, M. (2009). *Estudio Geofísico de Resistividad Eléctrica Aplicado a la Investigación Geotécnica del Subsuelo y Agua Subterránea en el Deslizamiento de LLacoo*. Cuenca.
- Rivera, M. (2012). *Curso de terrenos inestables 2, Presentación, Universidad San Francisco de Quito*. Quito.
- Rodríguez, J. D. (2014). *Mecánica de Suelos: Naturaleza y Propiedades*. México: Trillas.
- Taylor, D. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. New York: Jhon Wiley & Sons. Inc.
- Vallejo, L. G. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Valverde, J. (2013). *Introducción clase mecánica de suelos (Presentación)* . Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Yépez, F. (2010). *Clase de ingeniería sismo resistente (Presentación)*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.