

RETRO ANÁLISIS DE FALLAMIENTO TIPO ROTACIONAL EN CALLE LOS PLACERES DE CALETA TUMBES

D. Villarroel Cea¹, R. King St-Onge², J. Montenegro Cooper³

RESUMEN:

Los procesos de inestabilidad en taludes es uno de los mayores problemas que se presentan en la zona centro sur de Chile, provocando grandes pérdidas materiales y de vidas, bajo este contexto es que se realiza este estudio para obtener los parámetros resistentes del suelo y las causas que provocaron un deslizamiento en Caleta Tumbes que a su paso dejó una casa completamente destruida y una vivienda vecina con serios daños estructurales. La obtención de estos parámetros se realiza mediante retro análisis utilizando los métodos de Morgestern – Price y Spencer, se realizan también ensayos de laboratorio y ensayos geofísicos utilizando los métodos MASW y ReMi. El trabajo en terreno permite establecer el contexto en el cual se encuentra el talud, teniendo de esta forma una visión más global de la zona.

Los resultados indican que debido a un aumento en la napa freática producto de las lluvias que presenta la zona sur durante los meses de invierno sumado además a estratos inferiores de mala calidad fueron los motivos por el cual se produjo el deslizamiento. Es por ello que se proponen recomendaciones de monitoreo evitando así que se lamenten futuras pérdidas materiales o de vidas.

PALABRAS CLAVES: Retro-análisis; Estabilidad de Taludes; Caleta Tumbes.

ABSTRACT:

Slope instability is one of the biggest problems in the central-southern zone of Chile, which causes major material losses including human lives. In this context, this research is conducted in order to obtain resilient soil strength parameters and to understand the causes of landslides in Caleta Tumbes, where a house was completely destroyed and caused serious structural damage to a neighbouring property. In order to obtain these parameters, a back analysis study is conducted using methods Morgestern- Price and Spencer, laboratory soil analysis and geophysical surveys using MASW and ReMi methods also conducted. The field work allows us to establish the context in which the slope is in, thus having a fuller overview of the area.

The obtained results indicate that due to an increase in the water table, a consequence of rain in the southern region during the winter months in addition to poor quality of the underlying soils layers, are the reasons for which the landslide occurred. Therefore, the monitoring recommendations are proposed in order to avoid future loss of materials or human lives.

KEYWORDS: Back-Analysis; Slope Stability; Caleta Tumbes.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dvillarroel@ing.ucsc.cl

² Docente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl.

³ Docente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jmontenegro@ucsc.cl.



1.- INTRODUCCIÓN

Los procesos geológicos y climáticos que afectan a la superficie terrestre crean el relieve y definen la morfología de las laderas, uno de estos procesos son los deslizamientos, que son movimientos ladera abajo de rocas, suelos o una combinación de ambos. Los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa superficiales pueden dividirse en dos categorías (Wu & Sidle, 1995): variables condicionantes (cuasi-estáticas) y variables detonantes (dinámicas). Las variables cuasi-estáticas corresponden a las propiedades del suelo, elevación, topografía, roca madre, entre otras; Estas determinan la distribución espacial del deslizamiento y la susceptibilidad. En cambio, las variables dinámicas o transitorias serían la saturación del suelo, el cambio de la cohesión debido a raíces de árboles, sismos o vibraciones de maquinarias, procesos climáticos o hidrogeológicos, entre otros (Crosta & Fratiini, 2003).

Procesos de remoción en masa causan graves daños en las infraestructuras, bienes materiales y vidas humanas. Filun (2015) estima que estos efectos se van incrementando debido a la expansión urbana y la localización de las actividades económicas en áreas susceptibles a deslizamientos. Según el informe de Desastres de Origen Geológico elaborado por el Sernageomin (2015), entre los años 1980 y 2015 han ocurrido cerca 133 eventos importantes de procesos de remoción en masa y de ellos 5 han generado pérdida de vidas humanas y/o daños materiales, llegando a un costo total por esos eventos de US\$ 1.600.000.000.

Un talud se puede definir como una superficie inclinada de intervención u origen antrópico que ha sido creada debido a una necesidad y puede estar compuesto por suelos, rocas o una combinación de ambos. En cambio, se le llama ladera a una superficie inclinada de igual composición pero que se ha generado de manera natural.

Uno de los problemas más importantes que tiene la geotecnia en el centro-sur de Chile son los deslizamientos de taludes, con un incremento importante durante los meses de invierno debido al aumento en las precipitaciones (Naranjo *et al.*, 2014). Durante el año 2014, fue un año de precipitaciones anormales en la región del Biobío, muchos sectores se vieron afectados por deslizamientos, provocando principalmente daños materiales en las viviendas y reafirmando de esta forma la importancia de estudios e investigaciones en este campo.

En el siguiente informe se estudia un deslizamiento ocurrido en la localidad de Caleta Tumbes, ubicado en las coordenadas $36^{\circ}38'19.45''$ S y $73^{\circ}5'45.87''$ O, al noreste de la plataforma de abrasión marina de la Península de Tumbes, a 12 km hacia el N de la ciudad de Talcahuano y a 26 km hacia el NW de la ciudad de Concepción (Figura 1).

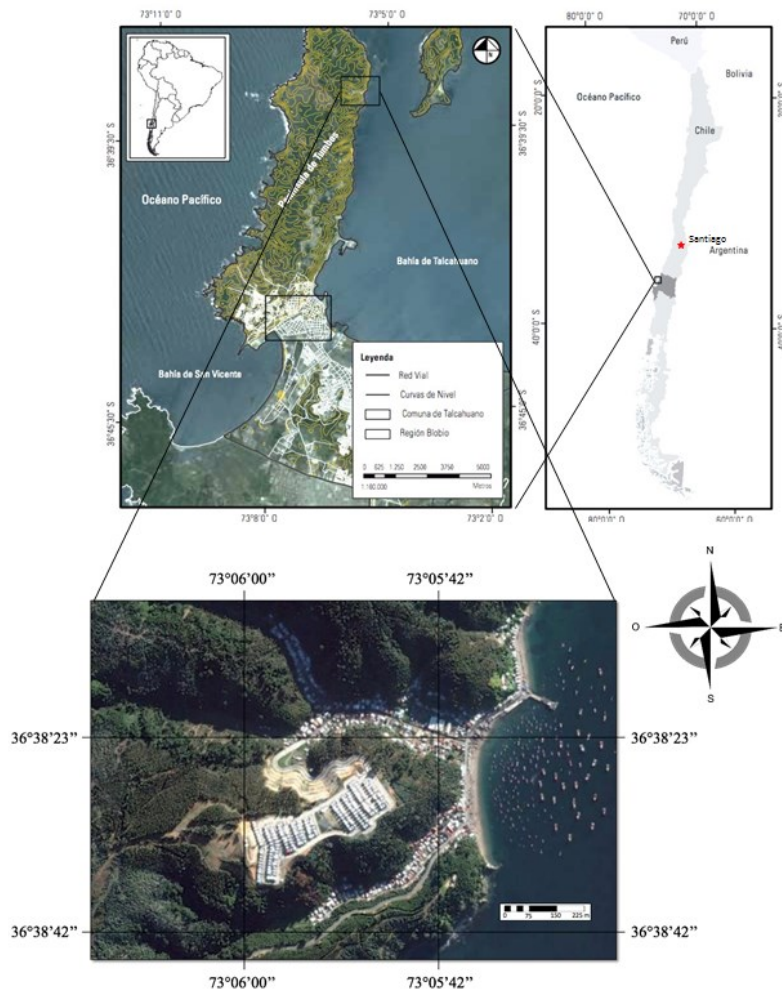


Figura 1: Mapa de ubicación de Caleta Tumbes (Fuente: Modificado de Filun, 2015).

En la Figura 2, se presenta la zona de estudio en detalle que corresponde a un talud de 22 metros de largo por 16 metros de ancho, ubicado en la calle “Los Placeres #21, Caleta Tumbes”.

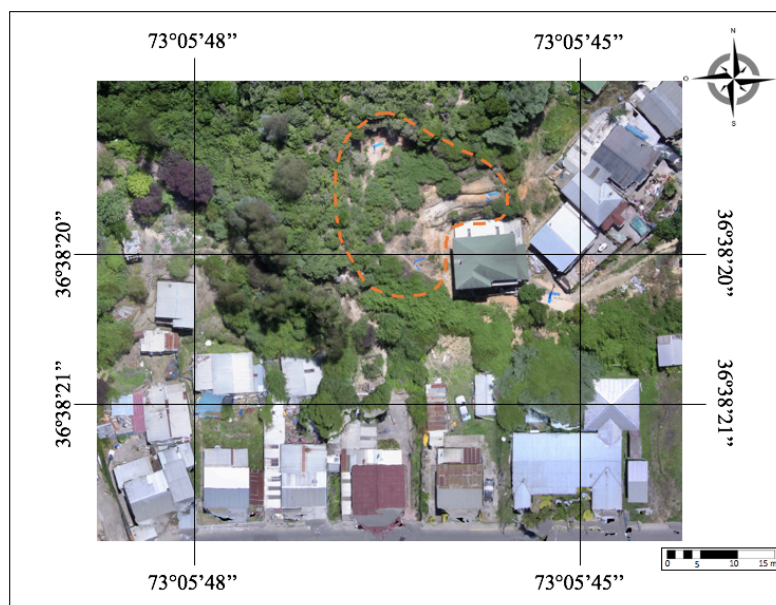


Figura 2: Zona de estudio, simbolizado con líneas punteadas naranjas (Fuente: Elaboración Propia).

El deslizamiento ocurrió el día 29 de julio del 2014 cerca de las 7:30 a.m. Esto produjo que a su paso se llevara una casa que se encontraba bajo el deslizamiento (Figura 3, A) dejándola convertida en escombros (Figura 3, B) y a su vez también generó daño en la vivienda vecina llenándola de material en la zona trasera y afectándola estructuralmente en los costados (Figura 4, A y B).



Figura 3: A) Casa en su estado original antes del derrumbe, Enero 2014 (Fuente: Street View, Google Earth) B) Casa derrumbada debido al deslizamiento, 29 de Julio de 2014 (Fuente: Pedro Cid, Radio Biobío).



Figura 4: A) y B) Daños estructurales en la casa vecina por deslizamiento, Mayo 2016 (Fuente: Registro fotográfico personal).

La familia durante los 22 años que vivió en ese lugar siempre tuvo problemas con los deslizamientos en los meses de invierno, pero estos nunca generaron problemas estructurales en la casa ya que las caídas de material eran muy pequeños. De acuerdo a una entrevista realizada a los propietarios de la casa afectada, los deslizamientos que ocurrían anteriormente fueron principalmente provocados por la lluvia en los meses de invierno.

Actualmente la zona se encuentra meta-estable luego del derrumbe y posee crecimiento de vegetación de baja altura.

A través de este estudio se pretende determinar los parámetros resistentes del suelo mediante el método de retro análisis y los motivos por los cuales se generó el deslizamiento, el estudio se realiza mediante modelaciones computacionales para establecer los parámetros resistentes, trabajo en campo tanto para los muestreos como para los ensayos geofísicos y finalmente ensayos de laboratorio. Estableciendo si actualmente el material deslizado podría generar otro deslizamiento en un futuro próximo afectando a las viviendas vecinas.

2.- MARCO TEÓRICO

El análisis de taludes es uno de los temas más estudiados por la geotecnia debido al costo social y monetario que implica un deslizamiento. Es por ello, que es importante realizar todo un análisis previo (Modelo Conceptual) tanto al suelo, geometría adyacente, clima, vegetación, entre otros, para evitar que esto ocurra.

Para poder realizar este análisis se debe entender las causas que provocan los deslizamientos, los tipos de deslizamientos y los métodos que existen para poder estudiarlos.

2.1.- Factores condicionantes y detonantes

Para que se produzca una inestabilidad u ocurran movimientos dinámicos de las laderas o taludes deben intervenir o modificarse en forma conjunta diferentes factores. Estos se pueden definir como: **factores condicionantes o pasivos y desencadenantes o activos**. Los primeros son constantes en el tiempo, en cambio los desencadenantes poseen una alta variabilidad en un periodo de tiempo acotado. En la Figura 5 se muestran el conjunto de los principales factores que comprenden la relación anteriormente definida.

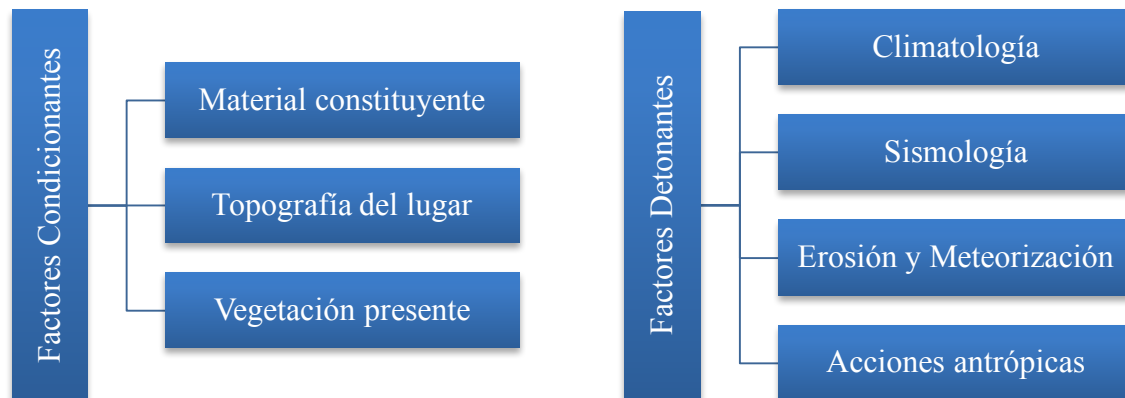


Figura 5: Factores condicionantes y Factores detonantes de deslizamientos (Fuente: Elaboración Propia).

2.1.1.- Factores Condicionantes

- **Material Constituyente:** El material constituyente de la ladera o talud es uno de los parámetros más importantes debido a la influencia que éste tiene. La litología de los materiales y su grado de alteración condicionará sus características físico-mecánicas y por lo tanto, su estabilidad potencial. Los parámetros resistentes dependerán de la composición mineralógica, tamaño de los granos, forma y cementación entre ellos, siendo los materiales poco cementados más propensos al deslizamiento. La influencia de la composición mineralógica también es en ocasiones determinante para las inestabilidades, los materiales con alto contenido de arcillas expansivas, por ejemplo, al existir la presencia de agua puede producir un hinchamiento generando cambios volumétricos incluso de un 50% (Martínez & Balaguerh, 1998). También, la potencia que tengan estos estratos determinará si el movimiento sea superficial o profundo definiendo la cantidad de material desplazado.
- **Topografía del lugar:** La pendiente topográfica y la altura de una ladera o talud condicionan los procesos de deslizamiento, una topografía abrupta con valles profundos y grandes diferencias de altura es más propenso a tener deslizamientos que un lugar con una topografía suave sin muchas variaciones de altura.
- **Vegetación:** La existencia de vegetación es un factor bastante importante ya que ayuda, entre otras cosas, al aumento de la cohesión entre las partículas de suelo debido a las raíces, disminución de la infiltración del agua debido a las lluvias y protección contra erosión.

2.1.2.- Factores Detonantes

- **Climatología:** Las posibilidades de que existan deslizamientos están muy influenciadas por la climatología de la zona de estudio, y estos efectos derivan principalmente de la pluviometría y la temperatura. El efecto físico de las gotas al chocar con la superficie de terreno provoca la digregación y transporte de las partículas de suelo, y a su vez, la infiltración del agua genera un aumento en las presiones de poros y si a eso le sumamos la temperatura con ciclos de humedad-sequedad las posibilidades de que un talud falle aumentan. En general, la frecuencia entre deslizamientos y la estación del año están muy relacionadas por lo que es un factor importante al analizar en un talud.
- **Sismología:** Los sismos pueden provocar grandes deslizamientos al generar aceleraciones horizontales y verticales, provocando la sacudida del suelo y desplazando de su vertical a la componente del peso de una ladera y aumentando en el plano de falla el esfuerzo de corte (Martínez & Balaguerh, 1998).
- **Erosión y Meteorización:** La meteorización provoca una alteración química, mineralógica y textural de la roca, cambiando entre otras cosas su permeabilidad y resistencia. La erosión debido a las lluvias o viento, provoca un cambio en la geometría del talud haciendo que éste se encuentre en una condición menos favorable.
- **Acciones Antrópicas:** Las actividades humanas pueden modificar en parte los factores anteriormente mencionados, la intervención de laderas naturales variará las condiciones de equilibrio iniciales y podría generar procesos de inestabilidad, y a la vez también la modificación de la geometría de un talud sin un estudio previo, puede generar que el talud pierda su condición meta-estable. Otro aspecto a considerar importante son las vibraciones producidas por trenes, camiones y autos.

2.2.- Tipos de deslizamientos:

Se entiende como movimiento en masa (o remoción en masa) cualquier deslizamiento de un volumen determinado de suelo. En general, en la bibliografía especializada se habla de los movimientos en masa como procesos asociados con problemas de inestabilidad de laderas. Existen diversas propuestas de sistemas de clasificación, tales como las de Varnes (1958; 1978); Hutchinson (1968), Guidicini y Nieble (1983), siendo la de Varnes la más utilizada internacionalmente (Figura 6).

Tipo de movimiento		Tipo de material			
		Roca	Suelo ingenieril		
			Grueso	Fino	
Caídas		De roca	De detritos	De tierra	
Volcamiento (volteo)		De roca	De detritos	De tierra	
Deslizamiento	Rotacional	Pocas unidades	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de tierra
	Traslacional	Muchas unidades	De bloques rocosos	De bloques de detritos	De bloques de tierra
Propagación lateral			De roca	De detritos	De tierra
Flujos			De roca (superficial profundo)	De detritos	De tierra
			(Superficial de suelo)		
Complejos: combinación de dos o más de los tipos principales de movimientos.					

Figura 6: Clasificación de movimientos de falla de taludes (Fuente: Modificado de Varnes, 1978).

2.2.1.- Caídas:

Tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de la superficie del talud o ladera, sin que a lo largo de ella ocurra un desplazamiento cortante, o en caso de que ocurriera este es pequeño. Una vez desprendido, el material cae desplazándose por el aire en caída libre con algunos golpes, rebotes y rodamientos.

2.2.2.- Volcamiento:

Tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad de unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas.

2.2.3.- Deslizamiento rotacional:

Deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. La cabeza del movimiento puede moverse hacia abajo dejando un escarpe casi vertical, mientras que la superficie superior inclinarse hacia atrás en dirección al escarpe. Estos movimientos ocurren frecuentemente en materiales homogéneos, pero ya que los materiales naturales rara vez son uniformes el desplazamiento suele ocurrir a lo largo de discontinuidades pre-existentes (Cruden & Varnes, 1996). Se pueden distinguir varias partes (Figura 7) aunque en no todos los deslizamientos se presentan o desarrollan completamente.

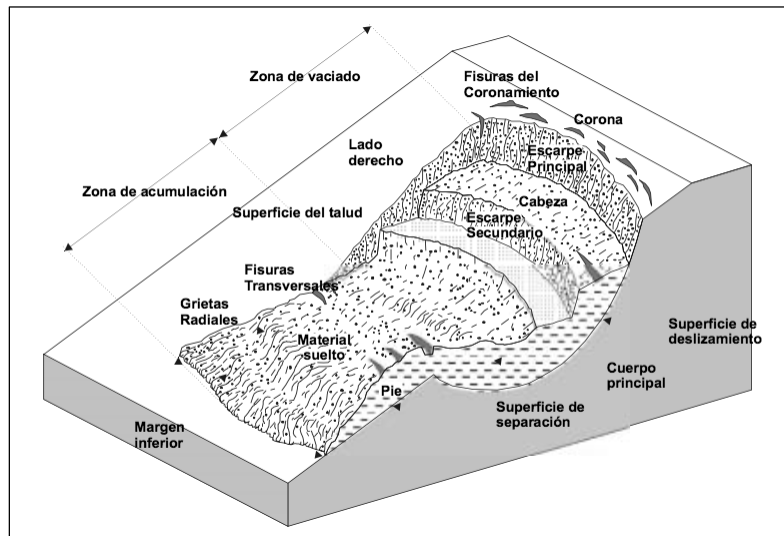


Figura 7: Esquema de un deslizamiento rotacional y su nomenclatura usual (Fuente: Modificado de Varnes, 1978).

La salida de la superficie de falla puede ocurrir en una de 3 zonas del talud y esto dependerá de las características resistentes del material constituyente, altura e inclinación. Si la superficie de rotura corta al talud por encima de su pie, se denomina *superficie de rotura de talud* (Figura 8, A). Si la salida se produce por el pie del talud y queda por encima de la base de dicho talud, recibe el nombre de *superficie de rotura de pie de talud* (Figura 8, B). Finalmente, si la salida pasa bajo el pie del talud con salida en la base del mismo y alejada del pie, se denomina *superficie de rotura de base de talud* (Figura 8, C) (Carcedo F. & Posse F., 2006).

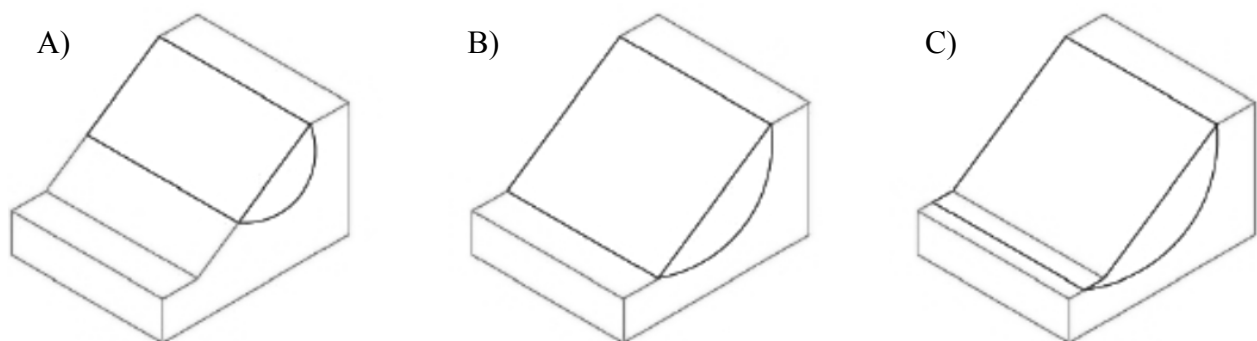


Figura 8: Diferentes superficies de falla rotacional (Modificado de Carcedo F. & Posse F., 2006).

2.2.4.- Deslizamiento traslacional:

Deslizamiento en donde la masa se desplaza a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o plano de contacto entre la roca subyacente y el suelo residual o transportado (Cruden & Varnes, 1996).

2.2.5.- Propagación lateral:

La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material e involucra materiales sensibles a la licuación (Aragua, 2007).

2.2.6.- Flujos:

Es un tipo de movimiento continuo, con superficie de deslizamiento definida o sin ella, que puede o no estar asociado a una velocidad específica. Cuando el movimiento es muy lento recibe el nombre de reptación, con un movimiento continuo sin superficie de rotura definida y que puede abarcar grandes áreas. En cambio, cuando el movimiento posee una alta velocidad corresponde a un flujo de lodos o detritos, donde las características resistentes son muy bajas o nulas, abarcando a su vez grandes áreas por lo que son muy peligrosos para los asentamientos urbanos.

2.4.- Parámetros resistentes en los suelos

La resistencia en suelos, se puede definir como el esfuerzo límite que el suelo puede resistir con seguridad, bajo un esfuerzo normal y contenido de agua. Esto depende de si el suelo se encuentra en un estado drenado o no drenado, también en la tensión y la deformación a la que se encuentra sometida (Atkinson, 2014).

La curva típica de esfuerzo de corte versus deformación (Figura 9) representa los distintos estados que va adquiriendo el suelo a medida que se va desplazando la caja en un ensayo de corte directo.

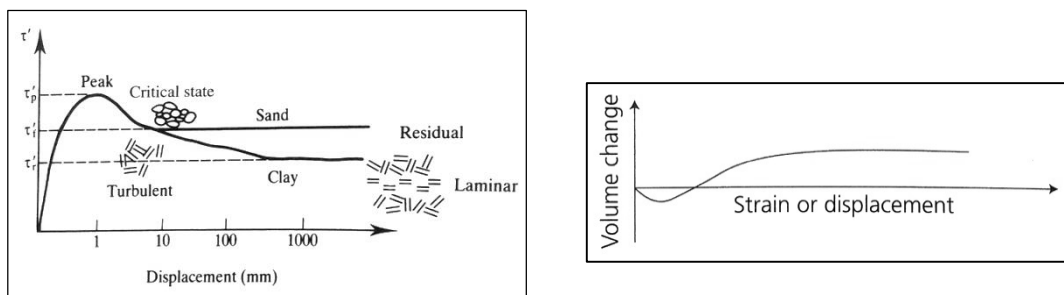


Figura 9: Curva de Esfuerzo de Corte versus Deformación y Cambio Volumétrico versus Desplazamiento (Fuente: Tomado de Atkinson, 2014).

La resistencia máxima, resistencia crítica y resistencia residual se definen a continuación:

- **Resistencia máxima:** Es la tensión de corte máxima de un suelo bajo una determinada deformación. El suelo cuando se encuentra en la resistencia máxima produce un aumento en el volumen debido a la dilatación (Atkinson, 2014).
- **Estado de resistencia crítica:** La resistencia crítica se alcanza cuando a una deformación constante, la tensión efectiva y el volumen se mantienen constante sin un plano de deslizamiento bien definido. Cuando se alcanza este estado, los granos de suelo se encuentran rotando y reacomodándose (Atkinson, 2014).
- **Resistencia residual:** Corresponde al último estado de resistencia que se alcanza luego de grandes deformaciones. Esta asociado a un flujo laminar y ocurre exclusivamente en arcillas. Este estado se produce debido a que los granos de arcilla se acomodan de una forma laminar y paralelos entre sí, existiendo solamente la fuerza de roce entre ellos. En arenas, este estado es igual al estado de resistencia crítica ya que al no poseer finos, los granos no logran acomodarse paralelamente (Atkinson, 2007 & 2014).

2.4.1.- Obtención de parámetros resistentes

La obtención de los parámetros se puede realizar a través de 3 métodos: ensayos de laboratorio, ensayos in situ y retro análisis. En el primer caso, los parámetros se obtienen principalmente a través del ensayo corte directo, triaxial y ensayo de compresión no confinada los que se encuentran normados para la estandarización de resultados, también hay ensayos que se pueden realizar en terreno o in situ, los más utilizados son el ensayo de penetración estándar (SPT) y ensayo de penetración del cono (CPT) (Whitlow, 1994).

El retro análisis asume un factor de seguridad igual a 1.0 y considera la geometría original del talud o ladera y luego mediante un modelo 2D seleccionado (Morgenstern-Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc.) estima los parámetros resistentes iniciales. En muchos casos se dispone de poca información de las condiciones bajo las cuales ocurrió un deslizamiento, lo que reduce la confiabilidad de los valores de c y ϕ obtenidos mediante retro análisis (Arellano *et al.*, 2013).

2.4.2.- Métodos de cálculo

Duncan (1992) indica que si se satisfacen todas las condiciones de equilibrio (Equilibrio de fuerzas en la horizontal y vertical, además el equilibrio de momento) se puede obtener un factor de seguridad con una precisión de $\pm 5\%$. Por lo tanto, los métodos que cumplen todas las condiciones anteriormente mencionadas son Morgenstern and Price (1965), Spencer (1967), Sarma (1973), Espiral Logarítmica de Frohlich (1953), entre otros; los dos primeros son los más utilizados, si bien existen otros métodos como Fellenius, solución simple de Greenwood, Bishop, etc. Éstos solo cumplieron con el equilibrio de fuerzas entre las dovelas o rebanadas y no con el equilibrio de momentos, obteniéndose valores no tan precisos, pero a veces cercanos a la realidad.

- *Método Morgenstern-Price*

El método Morgenstern-Price tiene su base en el equilibrio límite por lo que se debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos entre las dovelas (Figura 10). En éste se plantean dos ecuaciones diferenciales parciales de equilibrio de fuerzas y momentos, las cuales deben resolverse con métodos numéricos. La inclinación de las fuerzas laterales en cada dovela pueden ser diferentes y se definen por medio de la función $f(x)$, la que es adaptada para mantener el equilibrio (Villalobos, 2014).

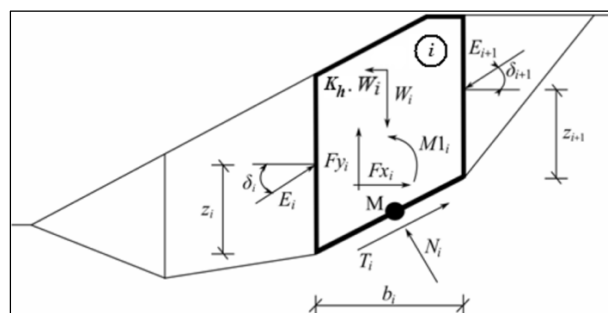


Figura 10: Fuerzas que interactúan en las dovelas Método Morgenstern-Price (Fuente: Modificado de Morgenstern & Price, 1965).

En este método se asume que el peso del bloque (W_i) pasa por el centro del segmento de la superficie deslizante (Representado por el punto "M"), las fuerzas de cada bloque se les denomina E_i y la inclinación (δ_i) es diferente para cada bloque. Finalmente, con la ecuación de equilibrio de momento se calculan los brazos z_i que corresponden a las fuerzas actuantes entre bloques para una inclinación δ_i , conociendo que en el lado izquierdo de la superficie de deslizamiento $z_1=0$ (Morgenstern & Price, 1965).

- *Método de Spencer*

Spencer (1967) desarrolló un método de equilibrio límite que satisface completamente el equilibrio en la superficie de falla circular, asumiendo que la inclinación de las fuerzas laterales poseen un ángulo constante (θ) en ambos lados, siendo esta inclinación una incógnita más dentro de las ecuaciones de equilibrio. Como con otros métodos de equilibrio límite, el F.S. en cada dovela será asumido igual en todas

las dovelas de la masa deslizante y éstas fallaran simultáneamente, la carga de las dovelas se transmitirá entre ellas a través de las fuerzas laterales Z_1 y Z_r (Carpenter, 1985) (Figura 11).

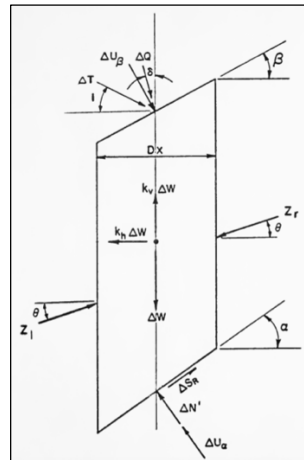


Figura 11: Fuerzas presentes en las dovelas utilizando el método de Spencer (Fuente: Tomado de Carpenter, 1985).

2.5.- Ensayos Geofísicos

La tierra, como varios materiales, se comporta como un medio elástico por el cual pueden viajar ondas vibracionales producidas por una fuente, como puede ser un sismo. Las ondas vibracionales pueden tener un origen natural o artificial, estas últimas se pueden lograr mediante la liberación de energía a través de explosivos, golpe de un martillo de masa considerable, vehículos, etc. Las metodologías geofísicas son útiles para estudiar estratos en un talud y estimar de manera más precisa la superficie de fallamiento o su composición.

2.5.1.- Ensayo MASW

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método no destructivo que se usa para evaluar la velocidad de onda de corte (V_s). El método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park *et al.*, 1999).

Este método mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas (Figura 12), transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. Para esto se disponen en superficie una serie de sensores (geófonos) en línea recta a distancias conocidas. En el extremo del tendido se generan ondas sísmicas con la ayuda de un martillo o por la detonación de explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que se propagan por el subsuelo y que son detectadas por cada uno de los geófonos.

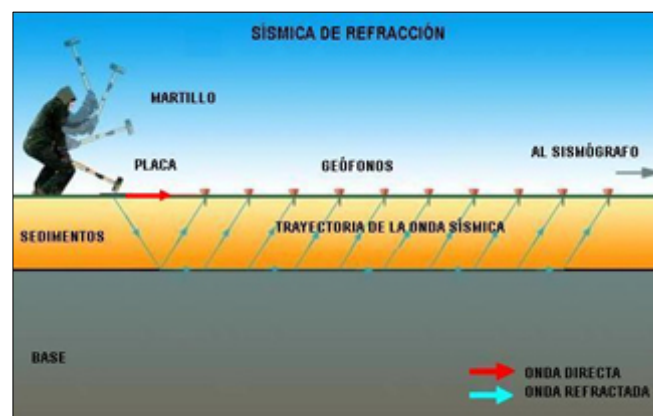


Figura 12: Sísmica de refracción (Fuente: www.geodatos.cl).

2.5.2.- Ensayo ReMi:

La metodología adoptada para la medición de la velocidad de ondas sísmicas superficiales; específicamente las ondas de corte del tipo Rayleigh, está referida al ensayo ReMi (Refraction Microtremor). Básicamente este ensayo consiste en medir el tiempo de viaje de las ondas de corte generadas por el ruido ambiental, el cual es captado y transformado en señal eléctrica por los geófonos receptores ubicados en un arreglo horizontal de multicanales. En efecto, el ensayo registra los tiempos de viaje de las ondas que se propagan horizontalmente, a través, de los geófonos receptores, lo que nos permite identificar la estratigrafía presente en el lugar donde se realiza el tendido y ver las diferentes variaciones que presenta en profundidad, pudiendo identificar en algunos casos la superficie de falla.

3.- METODOLOGÍA

El proceso metodológico se llevó a cabo mediante diferentes etapas para poder alcanzar los objetivos propuestos y se detalla a continuación:

3.1.- Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete consistió principalmente en la recopilación de antecedentes e información relevante del área en estudio.

En primera instancia se realiza una entrevista personal con los dueños de las casas que fueron afectadas por el deslizamiento, en la entrevista se realizaron una serie de preguntas que tienen como fin poder esclarecer lo que sucedió días anteriores al evento, modificaciones al terreno que hayan realizado ellos, grietas o sonidos que ellos pudiesen haber observado o escuchado, tiempo en el cual se mantuvo meta-estable el terreno, entre otras preguntas de interés.

También, se realiza una recopilación de notas de prensa donde se haya cubierto la situación del deslizamiento, la que ayudaría a explicar cómo se desplazó la masa de tierra y escombros ladera abajo con los registros fotográficos, permitiendo observar la ruta que tomaron los escombros dado que la ladera se encuentra modificada con arreglos de reconstrucción de la casa vecina.

3.2.- Trabajo en Terreno

En la Figura 13 se muestra la ubicación de los distintos ensayos y muestreos realizados en terreno.

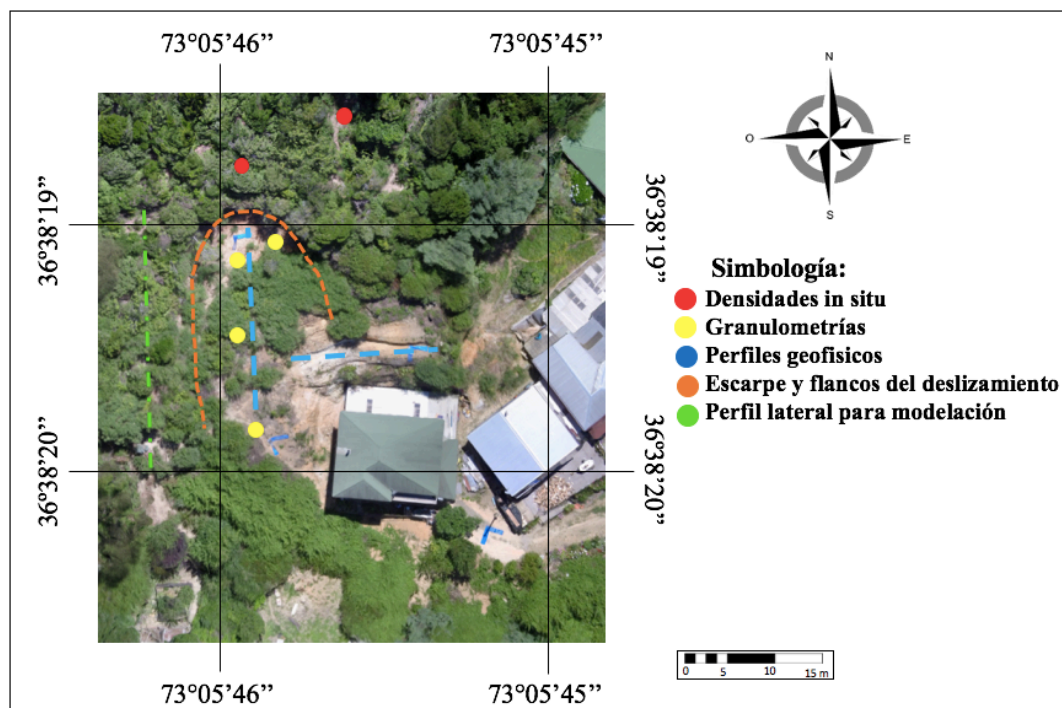


Figura 13: Ubicación de los muestreos y ensayos geofísicos realizados en terreno (Fuente: Elaboración propia).

3.2.1.- Obtención de Topografía:

Se realiza mediante una estación total y ubicando los prismas en la ladera que se encuentra al costado del flanco derecho (Figura 13) que corresponde a la zona menos intervenida y que más se aproxima a la topografía original del terreno (Figura 14).



Figura 14: Perfil longitudinal obtenido en la ladera (Fuente: Elaboración propia).

3.2.2.- Ensayo Densidad in Situ

Se realizan dos ensayos de densidad in situ por el método del Cono de Arena que permite obtener la densidad del terreno. El ensayo se encuentra normado y descrito por la NCh 1516 de 1979 y consiste básicamente en hacer una pequeña excavación de 15 cm aproximadamente en profundidad y con un diámetro establecido por el equipo. Luego se coloca un equipo con forma de cono invertido y se introduce arena normalizada de Ottawa. Al tener una cantidad de arena definida, la diferencia de masa con respecto a lo que se tenía inicialmente permite calcular el volumen que entro en la perforación, y teniendo la masa del suelo extraído para hacer la perforación se obtiene la densidad del suelo por cociente de masa y volumen. En la Figura 13 se indica el lugar donde se realizaron los ensayos de densidad in situ (Puntos Rojos).

3.2.3.- Ensayos Geofísicos

Se realizan dos ensayos geofísicos tipo MASW y ReMi, tanto para el perfil longitudinal como el perfil transversal, considerando que estos son los más representativos de la zona en estudio. Las ubicaciones de los perfiles se especifican en la Figura 13 (Líneas punteadas azules).

3.3.- Ensayos en Laboratorio

3.3.1.- Clasificación de suelo

La clasificación de suelo se determinó mediante el Sistema Unificado de Suelos (USCS) y el sistema de clasificación de suelos AASHTO. El primero se encuentra normado por la ASTM D 2487 del 2011, la que cubre los suelos gruesos y finos, separando ambos por el tamizado a través de la malla 200 y la utilización de su Limite Líquido (LL) e Índice de Plasticidad (IP). El sistema de clasificación AASHTO en cambio clasifica los suelos en ocho grupos principales A-1 al A-8 en base a su distribución granulométrica, limite líquido e índice de plasticidad (Villalobos, 2014).

- **Granulometría:** Se encuentra normado por NCh 165 de 1977. Consiste básicamente en vibrar el suelo a través de una serie de tamices los que poseen diferentes diámetros de apertura. En cada tamiz van quedando diferentes masas de partículas retenidas las que finalmente se grafican y tabulan para su análisis.
- **Límites de Atterberg:** Se encuentra normado por NCh 1517 de 1979. Se subdividen en dos: límite líquido y límite plástico. El primero hacer referencia al contenido de agua en porcentaje con



que el suelo cambia de un estado plástico a líquido, del mismo modo, el contenido en porcentaje con que el suelo cambia de un estado plástico a uno semi-sólido se denomina límite plástico. A través de estos límites de consistencia se establece el Índice de Plasticidad (IP) que corresponde a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, éste índice permite clasificar al suelo en un material no plástico ($IP=0$), de baja plasticidad ($IP < 7$), medianamente plástico ($7 < IP < 17$) y altamente plástico ($IP > 17$) (Villalobos F., 2014).

Los procedimientos para la realización de cada ensayo se detallan en cada una de las normas anteriormente mencionadas.

3.3.2.- Corte Directo

El ensayo de corte directo está normado por la ASTM D 3080, se utiliza el equipo perteneciente al laboratorio de geomateriales de la UCSC y corresponde al modelo H2700A marca Humbolt, se utilizan para el ensayo muestras remoldeadas.

3.4.- Retro análisis

Luego de realizar la recopilación de información y estudios pertinentes en terreno, se da paso al retro análisis para determinar los valores resistentes residuales del suelo mediante el análisis de sensibilidad del software SLOPE/W de GeoStudio 2018. Se utilizan los métodos de Spencer y Morgenster-Price, ya que dentro de los métodos de equilibrio límite éstos son los más exactos. Finalmente, se realiza una comparación de los parámetros de resistencia entre ambos métodos para las condiciones establecidas.

4.- RESULTADOS

A continuación se expresan y discuten los resultados obtenidos a través de los distintos procedimientos descritos anteriormente:

4.1.- Ensayos de Laboratorio

4.1.1.- Clasificación de Suelos

La clasificación de suelos se realiza analizando las muestras alteradas extraídas en el talud en la zona de la corona y en el material deslizado (Figura 13, círculos amarillos). La extracción de muestras alteradas se debe principalmente a la inestabilidad que posee el talud ya que cualquier intervención o extracción de gran cantidad de material podría generar nuevamente un deslizamiento. A continuación, se subdivide de acuerdo a la parte del deslizamiento donde fue extraída.

Material deslizado:

- Granulometría:

En la zona del material deslizado se extrajeron las muestras CT-01, CT-02, CT-03 y CT-04. Las curvas granulométricas de estos materiales se muestran en la Figura 15:

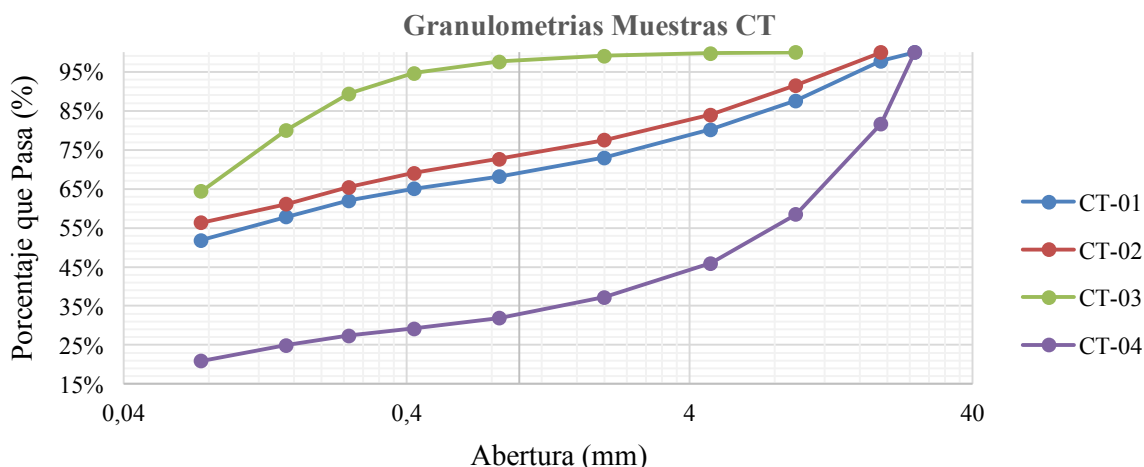


Figura 15: Curva granulométrica para muestras CT-01, CT-02, CT-03 y CT-04.

Se observa que las muestras CT-01 (Azul) y CT-02 (Rojo), más del 52% del material es de diámetro pequeño, si bien la curva granulométrica posee una buena graduación se ve claramente la ausencia de materiales más gruesos.

En la muestra CT-03 (Verde), se puede observar que más del 64% del material es suelo fino siendo en general un material mal graduado ya que la mayoría del material analizado corresponde a partículas de diámetro pequeño con una curva granulométrica con tendencia muy marcada.

La muestra CT-04 (Violeta), se puede notar que solamente el 21% corresponde a materiales de menor tamaño (0,075 mm). A diferencia de las otras muestras que poseen una gran cantidad de finos y una disminución bastante marcada de materiales más gruesos. Además, se observa una curva granulométrica con una buena tendencia en general, siendo en este caso la cantidad de material grueso mucho mayor.

La falta de materiales gruesos en las muestras CT-01, CT-02 y CT-03, tienen que ver directamente con la posición en donde fueron extraídas las muestras para su análisis. Esto es debido a que se encuentran cercanas al escarpe principal y todo el material erosionado en la corona por las lluvias, baja y se deposita en esta zona de la cabeza.

En la muestra CT-04 a diferencia de las muestras anteriores se encuentra ubicada en la zona cercana al pie del talud, con gran cantidad de material grueso lo que demuestra nuevamente que si bien en la zona de la

cabeza se observa gran cantidad de material fino ya cercano al pie del talud la depositación desde la corona es mucho menor debido a la erosión, siendo este material correspondiente al regolito presente en la zona.

También, es necesario recordar que el deslizamiento ocurrió hace más de 2 años por lo que el material se encuentra altamente alterado tanto por los efectos antrópicos como erosivos.

- Límites de Atterberg:

A continuación se presentan en la Tabla 2 los valores de los Límites Líquidos, Plásticos, Índice de Plasticidad y en donde No Presenta (NP):

Tabla 2: Resultados de Límites de Atterberg para muestras CT-01, CT-02, CT-03 y CT-04.

Tabla Resumen			
Muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
CT-01	37%	24%	12%
CT-02	27%	NP	NP
CT-03	54%	43%	12%
CT-04	43%	19%	24%

Se observa la heterogeneidad que presentan los suelos a pesar de estar extraídos relativamente cerca. Esto tiene que ver directamente con la mezcla que se produce durante el deslizamiento y también producto de la erosión que se encuentra sometido el lugar debido a las condiciones ambientales.

Luego de analizar los datos anteriores, la clasificación de suelos de acuerdo a la USCS y la AASHTO, se presenta en la Tabla 3:

Tabla 3: Clasificación de los suelos CT-01, CT-02, CT-03 y CT-04 según AASHTO y USCS.

Muestra	USCS	AASHTO
CT-01	CL	A-6
CT-02	ML	A-6
CT-03	MH	A-7-5
CT-04	SC	A-2-7

Definición general de clasificación de suelos USCS:

- CL : Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas (Villalobos, 2014).
- ML : Limos inorgánicos y arenas muy finas, arenas finas limosas o arcillas con ligera plasticidad (Villalobos, 2014).
- MH : Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos (Villalobos, 2014).
- SC : Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas de arenas o arcillas (Villalobos, 2014).

Material en la corona:

- Granulometría:

Debido a la heterogeneidad y alteración que posee la zona deslizada, se realiza la extracción de material en la corona del deslizamiento (Figura 13, puntos rojos) para realizar la posterior modelación, los resultados de la curva granulométrica están mostrados en la Figura 16:

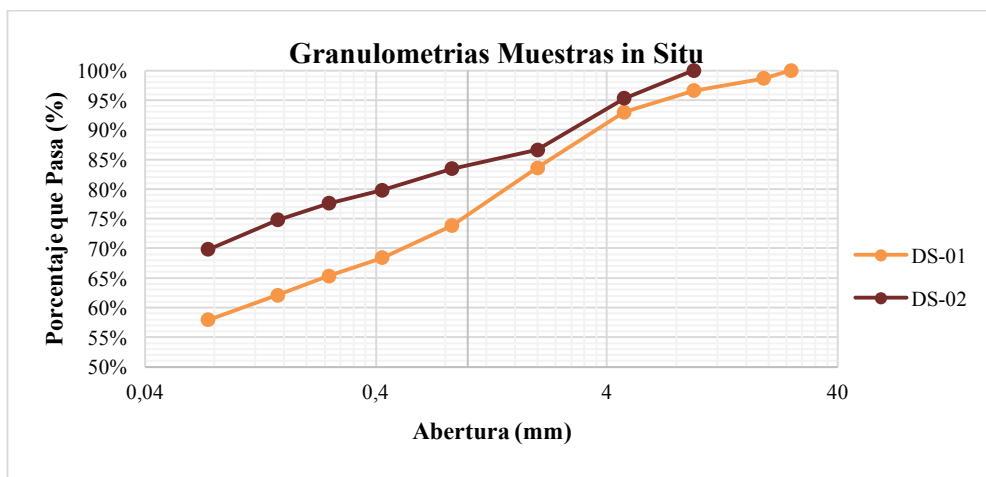


Figura 16: Curva granulométrica para muestras DS-01 y DS-02.

Las muestras extraídas en la zona de la corona poseen principalmente material fino, correspondiendo a mas del 50%. Interpretando la forma de la curva se puede concluir que posee una buena graduación sin embargo la muestra DS-01 posee partículas de suelo un poco mas gruesas.

- Límites de Atterberg:

En la Tabla 4 se presentan los valores de los Límites Líquidos, Plásticos e Índice de Plasticidad para las muestras DS – 01 y DS – 02:

Tabla 4: Resultados de Límites de Atterberg para muestras DS-01 y DS-02.

Tabla Resumen			
Muestra	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
DS-01	39 %	26%	13%
DS-02	50%	33%	17%

Luego de analizar los datos anteriores, la clasificación de suelos de acuerdo a la USCS y la AASHTO se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5: Clasificación de los suelos DS-01 y DS-02, según AASHTO y USCS.

Muestra	USCS	AASHTO
DS-01	ML	A-6
DS-02	MH	A-7-5

Definición general de clasificación de suelos USCS:

- ML : Limos inorganicos y arenas muy finas, arenas finas limosas o arcillas con ligera plasticidad (Villalobos, 2014).
- MH : Limos inorganicos, suelos limosos o arenosos finos (Villalobos, 2014).

4.1.2.- Densidad in Situ (Método Cono de Arena)

Se realiza la determinación de la densidad in situ utilizando el Método del Cono de Arena, la descripción del proceso aparece en el apartado 3.2.2 de la Metodología. A continuación se presentan los datos obtenidos de los ensayos realizados (Tabla 6):

Tabla 6: Densidades in situ realizadas en la corona del talud en estudio.

Densidad in Situ			
Descripción	DS-01	DS-02	Unidades
Humedad suelo extraído	6,1	14,4	%
Peso unitario in situ seco	1,285	1,275	ton/m ³
Peso unitario in situ húmedo	1,363	1,458	ton/m ³
Peso unitario in situ promedio seco	1,28		ton/m³
Peso unitario in situ promedio húmedo	1,41		ton/m³

Se calculan las densidades promedio para la realización de las modelaciones en Software.

4.1.3.- Corte Directo

Se realizó 1 ensayos de corte directo con probetas remoldeadas y presiones de confinamiento de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa para obtener los parámetros de resistencia del suelo estudiado, estas se realizaron a una misma humedad y peso específico. En la Figura 17 se presentan los datos obtenidos.

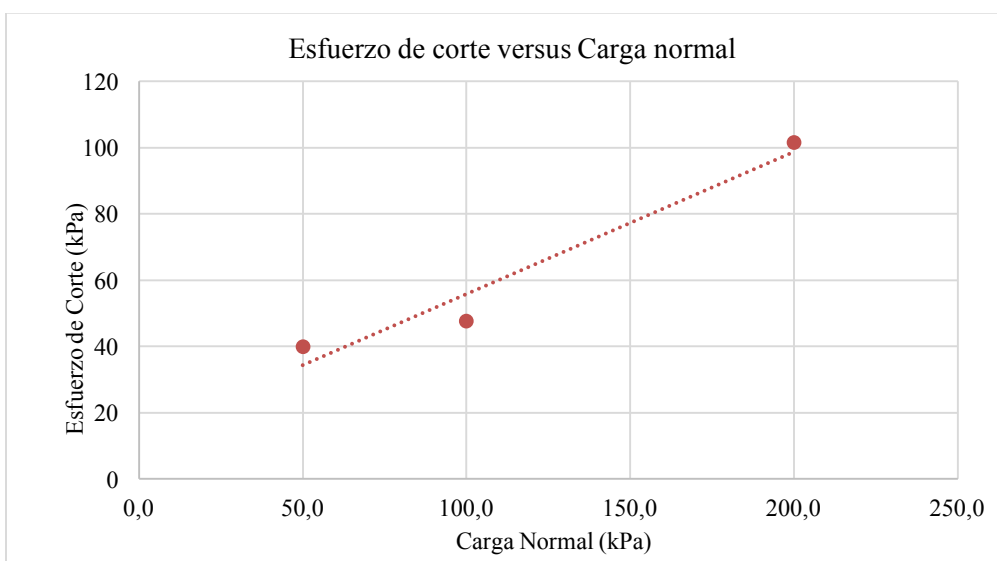


Figura 17: Gráfica de obtención de los parámetros resistentes (valores peak) de los ensayos realizados.

Finalmente los parámetros de C y ϕ de los ensayos se especifican en la Tabla 7:

Tabla 7: Parámetros resistentes del material presente en el talud de estudio.

Material	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (ϕ)
Suelo obtenido del talud	17	24

Los datos del suelo con probetas remoldeadas se comparan con los valores obtenidos por medio de retro análisis. Se puede establecer a que profundidad de napa freática el talud podría fallar, por lo que se especifica mayormente en el apartado 4.3.

4.2.- Ensayos Geofísicos MASW y ReMi

A continuación, se presentan los resultados de los perfiles geofísicos longitudinal (Figura 18) y transversal (Figura 19) realizados en terreno, estos se distribuyen dentro del área como indica la Figura 13.

4.2.1.- Perfil Longitudinal:

Se puede interpretar de la Figura 18 que en la zona superficial existe material con un V_s de mayor velocidad que los perfiles inferiores, esto se debe a el efecto que genera la meteorización y erosión compactando el material y generando un leve aumento de la velocidad de onda de corte. Luego, a mayor profundidad, se observa un estrato de suelo blando simbolizado con color rojo por cerca de 10 metros y finalmente luego de ese estrato blando existe un aumento de la velocidad de onda de corte alcanzando ya material rocoso.

Al analizar el estrato blando se observa que cercano a las 4 - 6 metros sobre el nivel 0, existe una delgada lámina de material con una velocidad de onda de corte de 88,69 m/s, esta coincidiría con la superficie de falla que generó el deslizamiento del talud, ya que se encuentra ubicada a la altura estimada de acuerdo a las observaciones hechas en terreno y las obtenidas en el retro análisis de la sección siguiente, de acuerdo a las velocidades obtenidas se interpreta que el material es de baja calidad.

Si bien bajo el estrato de suelo con velocidad de 88,69 m/s existe un material de baja velocidad de onda de corte (109,07 m/s), éste de acuerdo a la topografía no correspondería a la superficie de falla debido a que se encuentra cercano a los 10 m de profundidad tomado en el centro del deslizamiento.

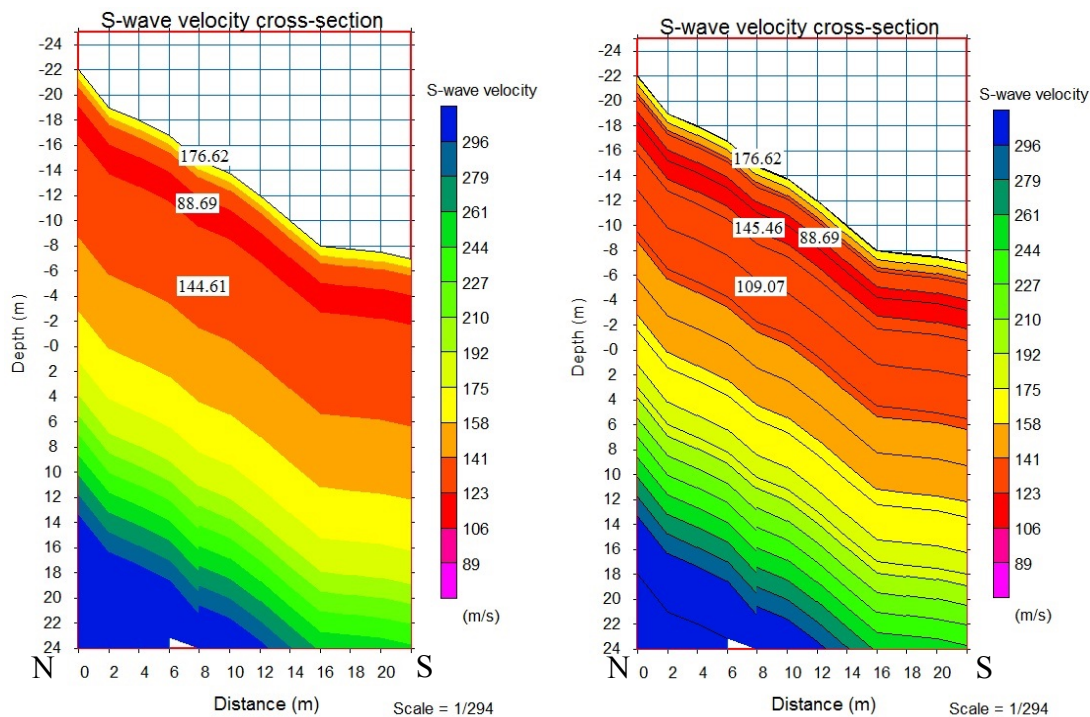


Figura 18: Perfil de velocidades de onda de corte en perfil geofísico longitudinal.

4.2.2.- Perfil Transversal

Se puede interpretar de la figura que los primeros 7 metros aproximadamente corresponden a suelo medianamente denso, o firme y luego un lente de 6 metros de espesor con velocidades cercanas a 500 m/s que correspondería a una roca blanda o suelo muy denso para finalmente disminuir nuevamente a un suelo blando y con la profundidad ir aumentando hasta llegar a la roca firme.

Según las observaciones realizadas en terreno y los resultados anteriores, el lente rocoso corresponde al material que constituye el talud ubicado atrás de la casa que se mantiene actualmente, siendo éste relativamente estable en el tiempo. Sobre este estrato, es que existe el material blando, que bajo un aumento de algunos de los factores detonantes podría generar un nuevo deslizamiento afectando a los moradores de la casa que fue reconstruida.

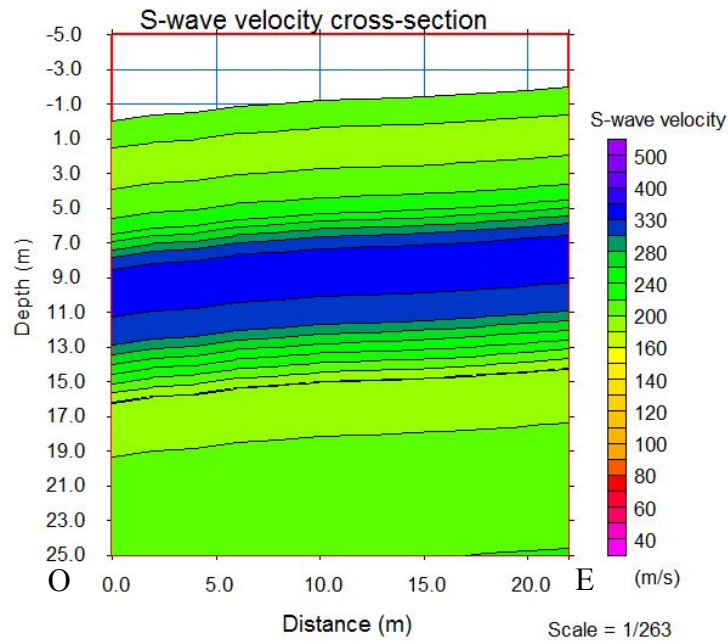


Figura 19: Perfil de velocidades de onda de corte en perfil geofísico transversal.

4.3.- Retro Análisis

Para efectos de modelamiento utilizando la metodología y el software que se especifica en el apartado 3.4, se asumieron las siguientes condiciones:

- Se utilizó el valor del peso específico obtenido en la corona debido a que el material en la zona deslizada posee una alta intervención antrópica y un proceso erosivo bastante fuerte. La intervención antrópica es debido principalmente a los intentos de estabilizar el talud y limpiar el suelo deslizado por parte de la familia que vive en la casa vecina.
- Se considera que el talud es homogéneo y conformado por el material obtenido en la corona. Se debe asumir esta condición debido a la complejidad y heterogeneidad estratigráfica de la zona en estudio.
- El valor del peso específico para la modelación corresponde al promedio de los valores obtenidos de las muestras DS-01 y DS-02, debido a la diferencia que existen en los valores.
- Se utiliza para la modelación el perfil de la ladera antes de que ocurriera el deslizamiento. Este perfil se obtuvo mediante topografía tradicional y se encuentra ubicado sobre el flanco derecho en dirección Oeste.
- En la zona inferior se realiza un corte vertical de casi 90° que simularía el lugar donde se encontraba ubicada la casa que fue afectada por el deslizamiento. Las dimensiones del corte realizado se obtienen mediante la entrevista que se le realizó con la dueña de la casa y observaciones en terreno.
- También, en el modelo se colocan los lugares en donde fue la entrada y salida de la superficie del deslizamiento, la que fue definida de acuerdo a las observaciones realizadas en campo, al igual que la grieta de tracción superior.
- Se consideran 3 escenarios posibles: 1) napa freática nula, 2) napa freática intermedia y 3) napa freática alta.

Para la obtención de resultados de los valores C y ϕ se realiza un análisis de sensibilidad en donde se fija el valor de ϕ y se establece un rango de C . Por lo tanto, el software determina los distintos F.S. para el rango de C . Luego de tener los valores del F.S., mediante interpolación se determina el F.S.=1, obteniendo el par de valores requeridos.

En la Figura 20 se presenta el perfil del talud en estudio con los 3 niveles de napa freática. El nivel intermedio se consideró a los 5 m de profundidad en la mitad del talud (10 m en la horizontal) y el nivel de napa freática alta casi llegando a la superficie.



Figura 20: Perfil del talud junto con los 3 niveles de napa freática utilizados para la modelación.

Se establece un rango para el Ángulo de fricción y así generar las distintas curvas de Cohesión (C) versus el Ángulo de fricción (ϕ) que resulten de los niveles freáticos establecidos. En la Figura 21 se presentan los resultados del retro análisis para los 3 casos en estudio.

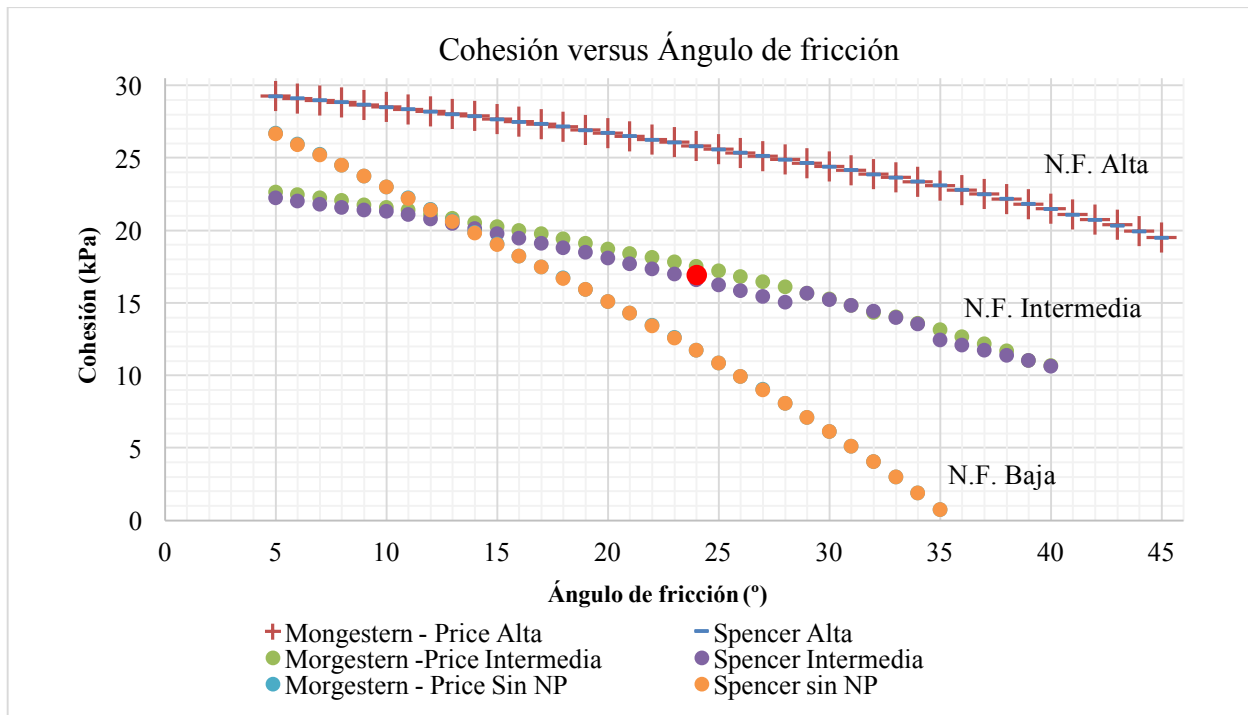


Figura 21: Gráfica de C versus ϕ para los casos de napa freática no presente, napa freática intermedia y napa freática alta.

De la Figura 21 se puede observar las distintas tendencias que poseen las curvas dependiendo del nivel de la altura de la napa freática, siendo más altos los valores dependiendo de su nivel de agua que se encuentre. En la curva de la napa freática intermedia existe una pequeña variación la que tiene que ver con la superficie de deslizamiento crítica ya que ésta varía utilizando el método de Spencer.

También la diferencia de los valores de C y ϕ con respecto al método utilizado son muy similares, generando una variación en algunos casos solamente de decimales, y esto tiene que ver en la similitud que poseen ambos métodos para el cálculo del F.S.

Otro aspecto interesante es la intersección de la curva de la napa freática intermedia y la curva de la modelación sin napa freática en el intervalo de valores de C igual a [19-21] kPa y ϕ [12-14] °, lo que quiere decir que bajo un suelo con esos parámetros independiente del nivel de la napa freática podría generar un eventual deslizamiento.

Al colocar los valores de C y ϕ (Círculo rojo) en la Figura 21 que fueron obtenidos mediante el ensayo de laboratorio, se puede observar que los parámetros pasan muy cercanos a la curva de la napa freática intermedia por lo que se puede establecer que si el talud alcanza o supera una napa freática intermedia (5 m de profundidad en el centro del talud) podría generar un deslizamiento.



5.- CONCLUSIONES

Cada año deslizamientos causan daños estructurales, económicos y hasta pérdida de vidas por lo que esta investigación busca establecer mediante un retro análisis los parámetros resistentes del suelo y los motivos por el cual se generó el deslizamiento en Caleta Tumbes durante el año 2014. Al analizar los resultados se refleja la importancia que existe en realizar estudios previos antes de cualquier intervención tanto en laderas como taludes. Si bien se puede caracterizar el suelo mediante estudios, también es necesario conocer el contexto (Modelo Conceptual) en donde se desarrollará cualquier obra y que a veces este contexto es pasado por alto.

Los resultados del retro análisis permiten obtener 3 curvas que relacionan los parámetros resistentes del suelo con distintos niveles de napa freática, observándose la diferencia que existe entre ellas al variar el nivel freático y la relación que existe entre el ángulo de fricción y la cohesión. Al colocar los parámetros obtenidos del ensayo del corte directo dentro de las curvas obtenidas del retro análisis, estos quedan cercanos a la napa freática intermedia, estableciendo entonces que con una napa freática cercana a los 5 m de profundidad el suelo podría fallar. Al analizar los resultados de los ensayos geofísicos realizados al talud, cercano a los 4 – 6 metros de profundidad se observa un estrato de suelo de pequeño espesor y de mala calidad. Si se analiza la topografía original con el corte realizado para la construcción de la casa, este plano correspondería a la superficie de falla.

De esta forma, al relacionar los datos del ensayo geofísico y sumado a los parámetros obtenidos del retro análisis y ensayo de corte directo. El motivo del deslizamiento fue el aumento de la napa freática debido a las precipitaciones que coincidió con la superficie de debilidad, provocando la posterior falla del suelo.

Otro aspecto importante que se establece en esta investigación, es que a través del ensayo geofísico que fue realizado atrás de la casa vecina y observaciones en terreno, los primeros 7 metros son de material de mala calidad y que con un aumento de algún factor detonante podría provocar un nuevo deslizamiento dejando como consecuencia daños sobre la vivienda cercana.

Finalmente, el aumento de la napa freática tiene directa relación con la estabilidad del talud ya que al sobrepasar cierto umbral el material fallaría.

6.- RECOMENDACIONES

Si bien se pueden generar mejoras en el terreno para la estabilidad, los costos son muy altos, por lo tanto es mejor un sistema de monitoreo constante para evitar posibles fallamientos, aunque la solución definitiva sería el traslado de la familia a un lugar más seguro.

Es por ello que se recomienda un sistema de monitoreo de la napa freática mediante pozos, de esta forma cuando exista un aumento cercano a los 5 metros solicitar a los moradores de la casa vecina que se retiren de la zona por un posible fallamiento del talud.

Realizar mediciones mediante extensómetros o prismas topográficos periódicamente para ir viendo los movimientos que pudiera tener el talud.

También, otra alternativa para minimizar las probabilidades de un fallamiento es el drenaje o canalización de las aguas lluvias que caen sobre el talud actual, sin embargo, solamente disminuiría la posibilidad de un deslizamiento, no garantizando la estabilidad de este.

7.- AGRADECIMIENTOS

Quiero partir agradeciendo a Dios y mi familia, especialmente a mis padres Abelina y Eduardo por todo el esfuerzo, confianza y apoyo que me han brindado durante toda mi vida y que sin ellos nada de esto hubiese sido posible, este artículo está dedicado a ustedes.

Agradecer a mi profesor guía Dr. Robert W. King y Dr. José Miguel Montenegro durante todo este proceso de tesis y época académica, gracias por su guía, apoyo y paciencia.

Agradecer a mis amigos, compañeros de universidad, mi compañera de batallas Patricia Silva, a toda la gente que me rodeó y todos ellos que me dieron su apoyo desde el cielo.

6.- REFERENCIAS

- Aragua, V.** (2007). "Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas 2007". Colombia.
- Arellano R., Bielefeldt J. & Correa D.** (2009) "Análisis de taludes mediante ensayos y back análisis de fallas".
- ASTM D 2487.** (2011). "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)". West Conshohocken, PA, USA, ASTM International.
- ASTM D 3080 – 90 (1994).** "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions". Annual Book of ASTM Standards, 4, 290-5.
- Atkinson, J.** (2007). "The mechanics of soils and foundations". CRC Press.
- Atkinson, J.** (2014). "Fundamentals of Ground Engineering". CRC Press.
- Carcedo, F.J.A., & Posse, F.J.A.** (2006). "Manual de ingeniería de taludes (No. 3)". IGME.
- Carpenter, J.R.** (1985). "The Spencer method of slices: Final report". School of engineering, Purdue University, Indiana, U.S.A.
- Cepeda, M.J.Á., Leal, L.L., & García C.P.** (2009). "Conservacion y explotación de carreteras". Fundación Laboral de Construcción, España.
- Crosta, G.B., & Frattini, P.** (2003). "Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall". Natural Hazards and Earth System Science, 3(1/2), 81-93. Italia.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J.** (1996). "Landslides investigation and mitigation, transportation research board". Landslide types and process, National Research Council, National Academy Press, Special Report, 247, 36-75.
- D. S. N° 61.** (2011). "Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga Decreto N° 117 de 2010". Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Diario Oficial, 13.
- Duncan, J.M.** (1992), "Stability performance of slopes and embankments-II Proceedings" Berkeley, CA, June 29-July1, 1992, pp.890- 904.
- Filun, P.A.L.** (2015). "Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur". Cuadernos de Geografía, 24(2), 93.
- Guidicini, G., & Nieble. C.** (1983). "Estabilidad de Taludes Naturais e de Escavaofio". Editora Edgard Bliicher Ltda., Sao Paulo, 194p.
- Hutchinson, J. N.** (1968). "Mass movement". In Geomorphology (pp. 688-696). Springer Berlin Heidelberg.
- Morgenstern, N.R., & Price, V.E.** (1965). "The analysis of the stability of general slip surfaces". Géotechnique, 15(1): 79–93.
- Naranjo, J.; Arenas, M.; Ramírez, P.** (2006). "Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de Julio de 2006, en algunos sectores de la provincia de Concepción". Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 18 p.

- NCh 1517/1.** (1979). “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido”. INN Chile.
- NCh, N.C. 1517/2.** (1979). “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico”. INN Chile.
- NCh, N.C. 1532.** (1980). “Determinación de la densidad de las partículas sólidas”. INN Chile.
- NCh, N.C. 165.** (1977). “Áridos para morteros y hormigones-Tamizado y determinación de la granulometría”. INN Chile.
- NCh, N.C.1516.** (1979). “Determinación de la densidad en el terreno – Método del cono de arena”. INN Chile.
- Organización de las Naciones Unidas.** (2001). “El terremoto del 13 de enero de 2001 El Salvador. Impacto socioeconómico y ambiental”. Comisión económica para América Latina y El Caribe, ONU.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J.** (1999). “Multichannel analysis of surface waves”. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Spencer, E.** (1967). “A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces”. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- Van Sint Jan, M., & Talloni, P.** (1993). “Flujo de sedimentos del 18 de Juniode 1991 en Antofagosta: La Serena, Chile”. Tercer Congreso Chileno de Ingeniería Geotecnia (Vol. 1, pp. 247-265).
- Varnes, D. J.** (1958). “Landslide types and processes”. *Landslides and engineering practice*, 29(3), 20-45.
- Varnes, D.J.** (1978). “Slope movement types and processes”. Special report, 176, 11-33.
- Villalobos, F.** (2014). “Mecánica de suelos”. Laboratorio de Geomateriales, Universidad Católica de la Santísima Concepción. Chile.
- Whitlow, R.** (1994). “Fundamentos de mecánica de suelos”. (No. 624.151 W4Y 1990).
- Wu, W., & Sidle, R.** (1995). “A distributed slope stability model for steep forested basins”. *Water Resources Research*, 31, 2097– 2110.