

APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL PARA PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA A UN TALUD DE LA RUTA CH-160, LOTA, REGIÓN DEL BIOBÍO

D. Inostroza Hernández¹, R. W. King St-Onge¹, J. Montenegro Cooper¹

RESUMEN

La estabilidad de taludes es una de las aplicaciones más relevantes dentro de la ingeniería geotécnica. Es por esa razón que se hace necesaria la caracterización geológica y geotécnica de los taludes que pueden estar sometidos a potenciales procesos de remoción en masa, intentando de la forma más óptima que este permanezca estable en el tiempo y así no generar daños estructurales ni constituir un riesgo para la vida humana. Sin embargo, en muchas ocasiones se realizan mejoramientos de terrenos para la estabilización de taludes, pero no se tiene conocimiento de todos los factores que condicionan y detonan los movimientos y el problema de estabilidad permanece en el tiempo. Es aquí la motivación de este estudio, el cual se enfoca en encontrar dichos factores a través del Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa, lo que significa el primer paso para llevar a cabo soluciones ingenieriles permanentes y que éstas sean eficientes desde el primer momento en que se instauran. El Modelo Conceptual se realiza mediante la metodología tradicional que consiste en el trabajo de gabinete pre-terreno, trabajo de terreno y trabajo de gabinete post-terreno en un talud de la Ruta CH-160, en la localidad de Chivilingo. Los resultados obtenidos nos indican que el factor que detona el deslizamiento son las precipitaciones, y los factores que condicionan dicho movimiento son la geomorfología característica de la zona, la vegetación, la meteorización y el factor antrópico. Además, se realiza un análisis numérico de la estabilidad global del talud, y un análisis numérico con mejoramiento ingenieril del tipo soil nailing ya instaurado en la zona, con el fin de comparar con los resultados de trabajos anteriores sin la realización del Modelo Conceptual. Los resultados de dichos análisis indican que el talud pseudestáticamente no es estable, por lo que se proponen nuevas recomendaciones.

PALABRAS CLAVES: Remoción en masa., talud, Modelo Conceptual.

ABSTRACT

Slope stability is one of the most relevant applications in geotechnical engineering. It is for this reason that it becomes necessary the geological and geotechnical characterization of slopes that may be subject to potential processes of mass movement, trying in the best way, that the slopes remain stable in time and thus not generate structural damage or constitute a risk for human life. However, on many occasions, improvements are made for slope stabilization, but not all the factors that condition and detonate mass movements are taken into consideration and thus the stability problem remains in time. The basis of this study, focuses on studying these factors through the Conceptual Model of mass movement processes, which implies the first step in carrying out permanent engineering solutions that are efficient from the first moment they are established. The Conceptual Model is carried out by means of the traditional methodology consisting of pre field work, numerous field visits followed by post field work of a slope along the highway CH-160, near the locality of Chivilingo. The results indicate that the main factor that detonates the mass movement is precipitation, and the factors that condition this movement are the geomorphological characteristics of the zone, vegetation, weathering and anthropogenic factors. A numerical analysis of the overall stability of the slope, in addition to a numerical analysis of the already established soil nailing engineering improvement in the zone were carried out in order to compare with the results of previous works undertaken without the realization of a prior Conceptual Model. The results of both analyses indicate that the slope is not stable, so new recommendations are proposed.

KEY WORDS: Mass movement, slope stability, Conceptual Model.

¹ Daniela Paz Inostroza Hernández, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dinostroza@ing.ucsc.cl

¹ Robert Wallace King St-Onge, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

1.- INTRODUCCIÓN

Es sabido que la geotecnia es una de las ramas más relevantes dentro de la ingeniería civil. Entre sus aplicaciones principales se encuentran el diseño de las cimentaciones, control de las napas freáticas, diseño de túneles, puentes y presas y diseño de taludes. Cada día su estudio se hace imprescindible para la vida, ya que, con el constante aumento de la población a nivel mundial y sus expansiones urbanas, obras de conectividad en áreas geotécnicamente consideradas como hostiles, con topografías y pendientes abruptas con subsuelos desfavorables, crecen en conjunto las necesidades de nuevas infraestructuras que nos permitan por ejemplo asentarnos, conectarnos con otras ciudades o simplemente evitar la congestión vehicular que se provoca a diario en las principales calles de las ciudades. En Villalobos 2014 se dice que el estudio de estabilidad de taludes es muy necesario, debido a que los deslizamientos de éstos representan un gran costo social en términos económicos y de vidas humanas. Durante un período entre 1940 y 1992, deslizamientos de tierra y taludes en Chile provocan daños materiales que ascienden los U\$53 millones de dólares y según datos de un catastro realizado por el Servicio Nacional de Geología y Minería, sólo entre los años 2005 y 2006 se registraron al menos 27 personas fallecidas en la región del Biobío por eventos de remoción en masa, dejando miles de viviendas afectadas.

Uno de los grandes problemas en la región del Biobío son las rutas de acceso. Éstas se presentan en malas condiciones y debido a la gran demanda a consecuencia del uso recurrente de la población, se hace necesario agrandarlas para así generar una mejor conectividad urbana. Esto conlleva a la creación de nuevos cortes en las carreteras e intervenciones de las laderas naturales, generándose así gran cantidad de taludes a lo largo de todas las carreteras que conectan a la región del Biobío.

Los procesos que ocurren en un talud son generalmente complejos y dependen de gran una cantidad de factores, los cuales interactúan entre ellos para definir un comportamiento. Para estudiar estos factores se hace necesario la creación del Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa, el cual explica cómo se comporta el talud de acuerdo con sus características físicas, químicas y ambientales, y cómo actúan los mecanismos que producirían o están produciendo un determinado comportamiento.

Mardones en 2005, estudia el evento pluviométrico que afecta a la zona litoral de Concepción el 26-05 del 2005, donde caen más de 158 mm de precipitaciones en dicha zona durante 20hrs consecutivas, con un máximo de precipitaciones entre las 21 y 23 horas, lo que ocasiona efectos desastrosos en la población debido a los procesos de remoción en masa y a las inundaciones que se produjeron. Además, acontecimientos como los citados en Villalobos 2014, ocurridos entre Junio y Agosto de 1997, que se asocian a lluvias de más de 60mm en menos de 3 días consecutivos, donde los taludes compuestos principalmente de suelo residual y roca meteorizada se saturan, nos entregan un gran precedente en la región del Biobío que los problemas de estabilidad de taludes son atribuidos al agua. Por una parte, los flujos de agua dentro del talud son quienes provocan la disgregación física de la estructura de las partículas del suelo, así como su alteración química mediante procesos de disolución, oxidación, etc. Por otra parte, cuando el agua se infiltra y percola en el subsuelo a través de poros y fisuras, puede formarse un nivel de saturación variable, con un drenaje y un flujo determinado. Su acción desestabilizadora proviene tanto de la sobrecarga proporcionada por el peso del agua al ocupar poros y fisuras antes vacíos, como de las presiones intersticiales. Al tener un suelo saturado, constituido por partículas sólidas y agua, los esfuerzos son absorbidos en diferente proporción por ambos elementos. Como el agua no puede soportar esfuerzos cortantes, se disminuyen las tensiones efectivas del terreno, y se incrementa el esfuerzo de corte, lo que afecta, por tanto, a la estabilidad. Esto es de gran importancia cuando el terreno está compuesto por una alternancia de capas permeables e impermeables, ya que las primeras son capaces de desarrollar presiones intersticiales considerables.

La zona de estudio es un talud que pertenece a la Ruta CH-160, la cual se extiende desde Concepción hasta Lebu, en la región del Biobío. Específicamente se ubica en la comuna de Lota, a 12 km al sur de ésta, en la localidad de Chivilingo, (Figura 1).

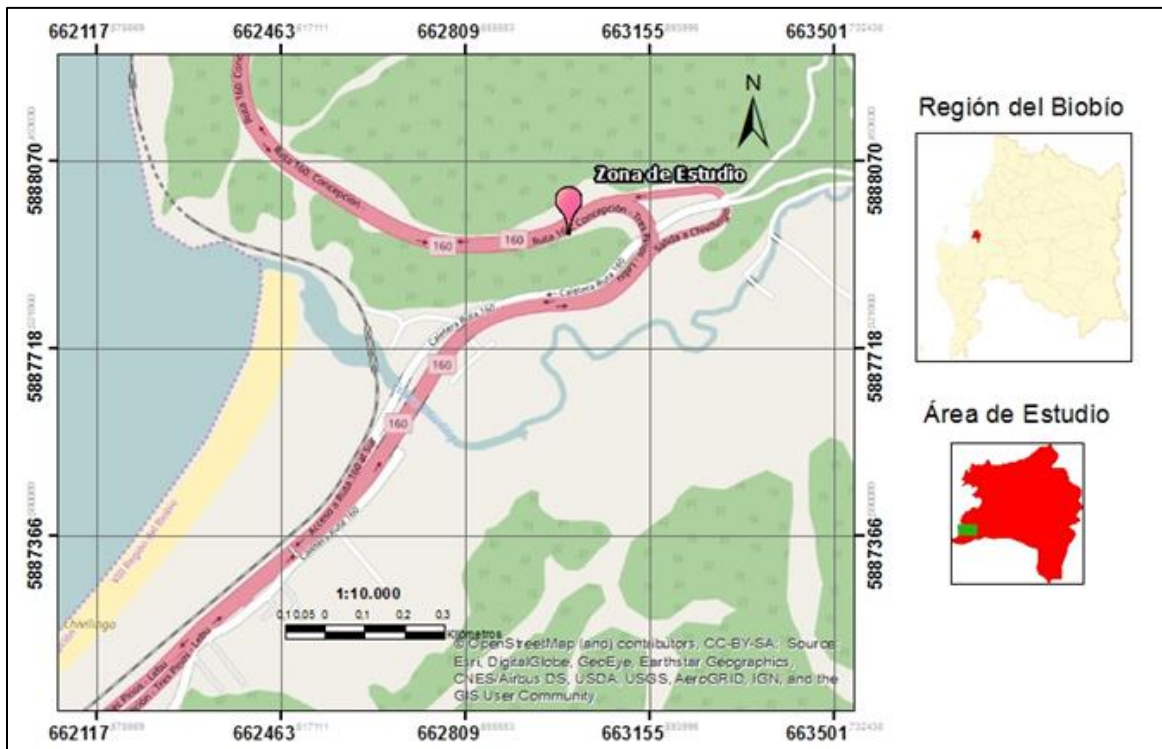


Figura 1: Mapa de ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia usando ArcGis.

La región del Biobío está compuesta por cuatro unidades morfoestructurales principales, (Figura 2): Las Planicies Litorales, formadas por sedimentos marinos y continentales alzados del Cenozoico; la Cordillera de la Costa, un complejo acrecionario del Paleozoico y arco magmático constituido de basamento cristalino continental; la Depresión Central, una cuenca rellena por sedimentos clásticos de edad Plioceno-Cuaternario; y finalmente la Cordillera de los Andes, caracterizada por un arco volcánico activo y una topografía elevada (Mpodozis y Ramos, 1989).

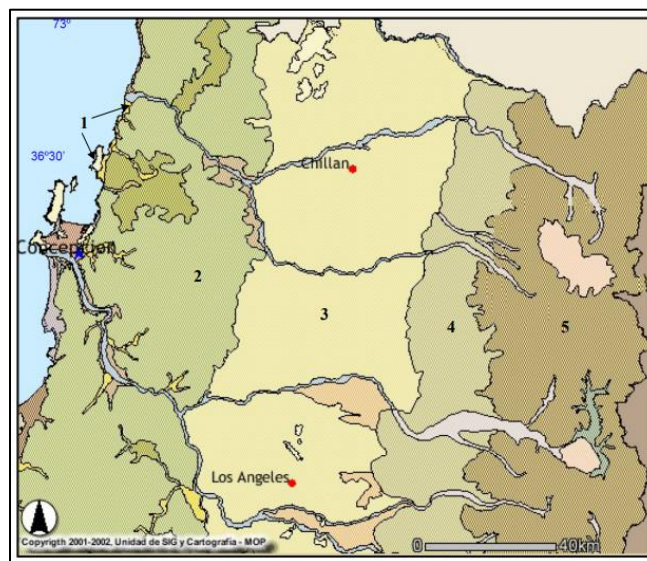


Figura 2: Principales formas geomorfológicas de la región del Biobío. 1. Planicies litorales. 2. Cordillera de la Costa. 3. Depresión Central. 4. Precordillera. 5. Cordillera Andina (Cartografía MOPTT).

La zona de estudio se encuentra emplazada en la unidad morfológica de la Cordillera de la Costa, donde encontramos al Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa de la ribera sur del Río Biobío (Figura 3), el cual corresponde a un antiguo sistema acrecionario. Este sistema acrecionario está constituido por dos series, la Serie Oriental y la Serie Occidental, ambas identificadas como un Cinturón Metamórfico Pareado (Hervé, 1977). La Serie Occidental, de alto P/T, corresponde litológicamente a esquistos micáceos, metabasitas y metacherts; mientras que la Serie Oriental, de bajo P/T, está compuesta por pizarras, filitas y esquistos (Hervé, 1977). Esta última serie, de protolito sedimentario, fue sometida a metamorfismo regional de contacto, desde el Pérmico Inferior (Willner, 2005). Responsable de este metamorfismo de contacto es el Batolito Costero del Sur, un intrusivo de signatura calcoalcalina, que se extiende desde los 32°30' hasta los 38° y cuya litología corresponde principalmente a granodioritas y tonalitas de hornblenda y biotita, con variaciones locales a dioritas y gabros.

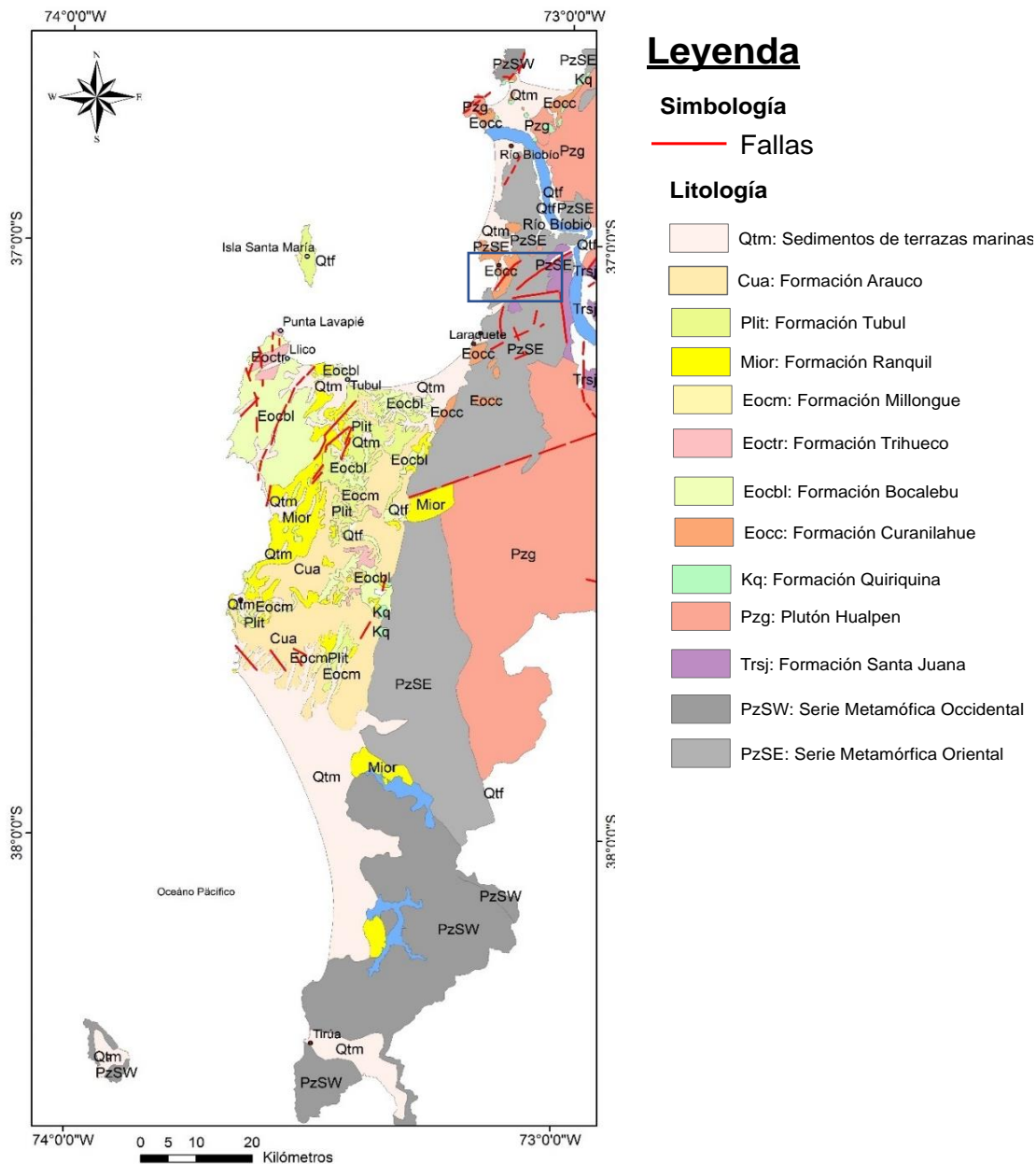


Figura 3: Mapa de la geología de la zona de estudio (Tomado de Quinzio et al., 2000-2001).

El objetivo de esta investigación es analizar los factores pertenecientes al Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa y aplicarlos al talud en estudio, lo cual nos permite describir, analizar y valorar las causas y mecanismos que están produciendo el problema de estabilidad. Para la realización de este análisis es necesario determinar los factores condicionantes y los factores detonantes que provocan la falla en la zona de estudio. Una vez determinados dichos factores, con el fin de comparar con trabajos anteriores y aportar con una solución permanente al problema, se realizará una modelación numérica para evaluar la estabilidad global del talud, se propondrá un análisis de una solución ingenieril (mejoramiento tipo soil nailing) y se pondrán a disposición nuevas recomendaciones.

2.- MARCO CONCEPTUAL

Para el mayor entendimiento del estudio investigativo, se presentan a continuación algunas definiciones claves:

Deslizamientos: Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. En el sistema de Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, como traslacionales o rotacionales. Los deslizamientos traslacionales a su vez pueden ser planares o en cuña. Sin embargo, las superficies de rotura de movimientos en masa son generalmente más complejas que las de los dos tipos anteriores, pues pueden consistir de varios segmentos planares y curvos, caso en el cual se hablará de deslizamientos compuestos (Hutchinson, 1988).

Factores condicionantes: Los factores condicionantes corresponden a aquellos que generan una situación potencialmente inestable. Estos corresponden principalmente a la geomorfología, geología, geotecnia, meteorización y vegetación, que actúan controlando la susceptibilidad de una zona a generar fenómenos de remoción en masa, donde la susceptibilidad se define como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Sepúlveda, 1998).

Factores desencadenantes: Un agente desencadenante se caracteriza principalmente por la existencia de un corto lapso entre causa y efecto. Entre los agentes desencadenantes más comunes de remociones en masa se encuentran principalmente las lluvias de gran intensidad y las lluvias más débiles que se extienden por largos períodos, la intervención antrópica y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la fusión de nieve, la erosión de canales, entre otros.

Factor de seguridad: Conjuntamente, para el estudio de la estabilidad de un talud se hace uso de un factor de seguridad (FS), el cual se obtiene de un análisis matemático de estabilidad. Este debe tener en cuenta factores como la geometría del talud, parámetros geológicos, cargas sísmicas, flujo de agua, propiedades gravimétricas de los suelos, entre otras (obtenidos del Modelo Conceptual). Aunque es una herramienta muy veraz para el ingeniero no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar, tales como la acción antrópica, para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones y debilidades en los modelos que no permiten la obtención de resultados satisfactorios. El factor de seguridad se define con la siguiente ecuación:

$$F.S. = \frac{\text{Fuerzas resistentes}}{\text{Fuerzas deslizantes}} \quad (1)$$

Falla Rotacional: Este tipo de fallas ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo comportamiento mecánico esté regido básicamente por su fracción arcillosa. En general afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto mayor sea la pendiente. Las fallas por rotación se denominan según donde pasa el extremo de la masa que rota. Puede presentarse pasando la superficie de falla por el cuerpo del talud (falla local), por el pie, o adelante del mismo afectando al terreno en que el talud se apoya (falla en la base) (Figura 4). Cabe señalar que la superficie de este último tipo de falla puede profundizarse hasta llegar a un estrato más resistente o más firme donde se encuentre el talud, provocando en este punto un límite en la superficie de falla (De Matteis, 2003).

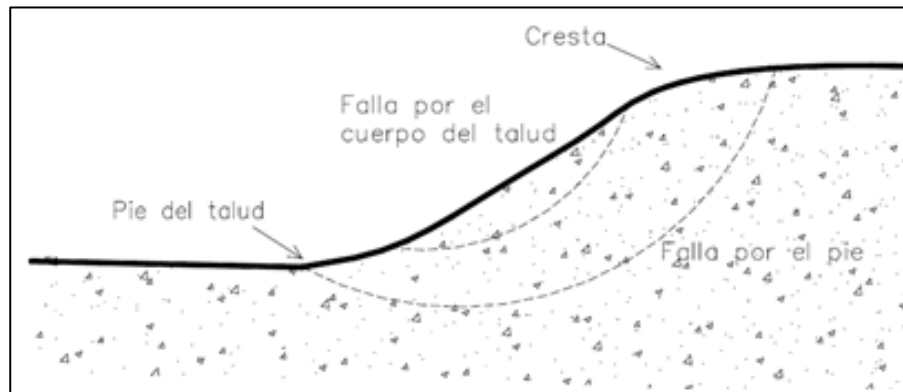


Figura 4: Distintos tipos de falla (Modificado De Matteis, 2003).

Meteorización: Según Centeno (2008), la meteorización es el nombre genérico del conjunto de procesos que destruyen las rocas cuando son expuestas a las condiciones de la superficie. La meteorización incluye procesos físicos que desintegran o desagregan las rocas y procesos químicos que modifican la composición o estructura de los minerales que forman las rocas. Por eso se habla de dos tipos de meteorización básicos: Meteorización física y Meteorización química. Sin embargo, ambos conjuntos de procesos actúan a menudo simultáneamente y con varias formas de influencia de unos procesos sobre otros.

Métodos de equilibrio límite: Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de equilibrio límite. Este sistema supone que, en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Un ejemplo de este tipo de métodos es el método de Bishop.

Modelo Conceptual: En general, hablamos de un Modelo Conceptual cuando se describen, analizan y valoran las causas y mecanismos que producen un cierto fenómeno. El Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa explica cómo se comporta una ladera o un talud de acuerdo con sus características físicas, químicas y ambientales, y cómo actúan los mecanismos que producirían o están produciendo un determinado comportamiento. Una vez elaborado el Modelo Conceptual, se puede realizar el análisis determinístico o cálculo del factor de seguridad. No se debe elaborar un modelo matemático si no se tiene previamente un Modelo Conceptual.

Procesos de remoción en masa: Los fenómenos de remoción en masa son procesos de transporte de material definidos como procesos de movilización lenta o rápida de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 1993). Estos movimientos tienen carácter descendente ya que están fundamentalmente controlados por la gravedad (Cruden, 1991). Existen numerosas clasificaciones para los distintos tipos de eventos de remoción en masa, una de ellas es la realizada por Varnes (1978), quien emplea como criterio principal en la clasificación el tipo de movimiento y el tipo de material. Así, siguiendo esta clasificación (Varnes, 1978), según el tipo de movimiento encontramos 5 tipos:

- Desprendimientos o caídas
- Volcamientos
- Deslizamientos
- Flujos
- Extensiones laterales

Regolito: En geología se define a la transición de roca meteorizada a suelo como regolito. Un regolito se produce cuando la roca madre empieza una secuencia de meteorización cuando se expone a agentes meteorizantes como

los atmosféricos, hídricos y bióticos. Éstos desencadenan una serie de reacciones que producen cambios físicos, químicos y fisicoquímicos en las rocas, transformándolas en dos nuevos tipos de materiales: regolito y solución.

Soil Nailing: El sistema constructivo Soil Nailing o Muro Anclado de Hormigón Proyectado, consiste en una pantalla flexible de hormigón proyectado y anclajes pasivos separados a poca distancia, que se utiliza para la estabilización de taludes.

Talud: Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de suelo, roca o ambas. Cuando la superficie inclinada se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

3.- METODOLOGÍA Y APLICACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

3.1 Metodología

3.2.1 Trabajo de gabinete pre-terreno (recopilación de antecedentes históricos y bibliografía)

Esta etapa consiste en la recopilación y revisión de material bibliográfico de la zona de estudio, con información de la geología, geomorfología, características geotécnicas, actividad antrópica y antecedentes históricos de la zona de estudio. Se definen los límites del área de estudio, se preparan las vías de acceso, se observan imágenes satelitales, fotografías aéreas e imágenes topográficas del área para la campaña de terreno y se organizan los trabajos a realizar a futuro.

3.2.2 Trabajo de terreno

Esta etapa consiste en la observación y caracterización de los factores condicionantes y detonantes de la zona de estudio, tales como geología y estructuras, geomorfología, condiciones hidrológicas e hidrogeológicas, características de la vegetación y clasificación geotécnica de las unidades de roca y suelo presentes en el área, con el objetivo de confeccionar un Modelo Conceptual. Se delimita las unidades de suelo y roca que se han identificado, indicando su caracterización, distribución espacial y la geología estructural presente. Además, se identifican las vías de drenaje de agua, su estado y funcionamiento, también se monitorean las grietas de tracción encontradas en los bancos luego de las primeras visitas.

3.2.3 Trabajo de gabinete post-terreno (análisis de antecedentes históricos, datos de terreno y ensayos de laboratorio)

Análisis de los antecedentes recopilados, bibliografía asociada y datos de terreno, para la elaboración del Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa en la zona de estudio.

3.2 Aplicación del modelo conceptual

3.2.1 Antecedentes

Acciona Ruta CH-160 puso a disposición toda la información posible para llevar a cabo el estudio investigativo, facilitando informes geotécnicos, ensayos de mecánica de suelos, topografía y perfiles de diseño de la zona de estudio. Cabe destacar que el talud dm [40+000 – 40+400] de la Ruta CH-160 presenta actualmente al menos dos eventos de deslizamientos en los años 2015 y 2016. En la Figura 5 se puede apreciar un perfil transversal del talud en estudio el cual muestra la geometría adoptada inicialmente el año 2014 y posteriormente la del año 2015. El primer diseño (2014), consistía en una altura de 35m contemplando 3 bancos ubicados en las cotas 8, 18 y 30m. Sin embargo, en Julio del año 2015 ocurre el primer deslizamiento en la zona, lo que implica que el talud sea reperfilado adoptando un nuevo diseño que consiste en aumentar la altura el talud a 45m con bancos cada 15m y reducir la pendiente.

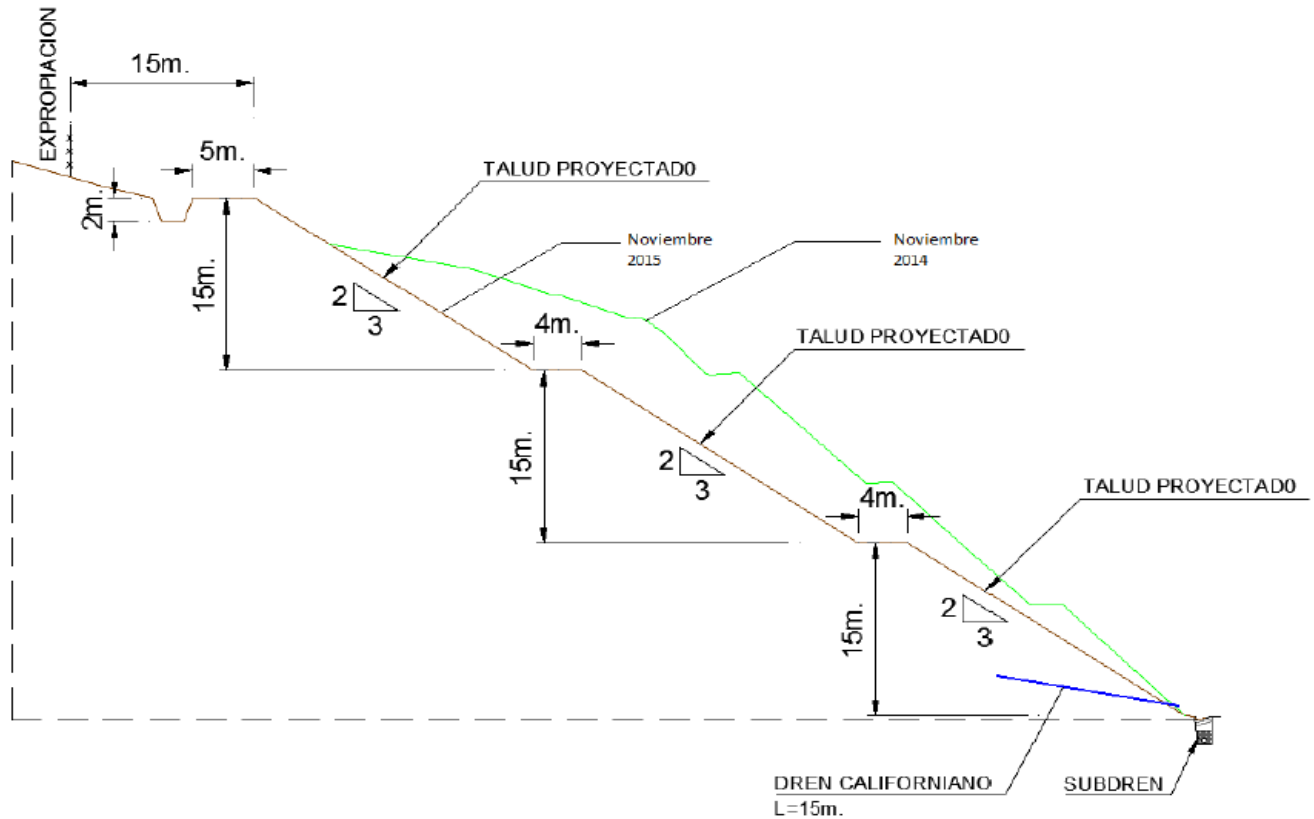


Figura 5: Perfiles transversales del talud ubicados en dm [40+250 – 40+400] (Concesionaria Ruta CH-160, evaluación talud Dm [40+000 – 40+400]; Informe Técnico).

A continuación, en las Figuras 6, 7 y 8 se pueden apreciar un perfil con la zona afectada por la falla, la ruptura de badenes y deformación del primer banco y rotura de la cuneta, berma y deformaciones a nivel de pista de incorporación respectivamente.



Figura 6: Identificación de zona inestable (Concesionaria Ruta CH-160 – Evaluación talud dm 40+000 – 40+400 Informe Técnico).



Figura 7: Ruptura badén y deformaciones en terraza primer banco (Concesionaria Ruta CH-160 – Evaluación talud dm 40+000 – 40+400; Informe Técnico).



Figura 8: Rotura cuneta, berma y deformaciones a nivel de pista de incorporación (Concesionaria Ruta CH-160 – Evaluación talud dm 40+000 – 40+400; Informe Técnico).

3.2.2 Modelo Conceptual

Entendemos que la generación del Modelo Conceptual es muy importante para el desarrollo de una modelación matemática y para un futuro mejoramiento de terreno, sin embargo, generalmente se desprecia su elaboración, ya sea para abaratar costos, por desconocimiento, o simplemente porque en el momento no se visualizan sus beneficios y se considera “no necesario”. Las consecuencias de no realizar un buen Modelo Conceptual antes de cualquier modelación matemática y posterior mejoramiento de terreno se ven a futuro; cuando algún factor no se contempló en dicha modelación, como por ejemplo considerar el nivel freático constante en los meses de verano e invierno.

Luego de dos deslizamientos rotacionales acontecidos en la zona y de la constante preocupación de la ocurrencia de nuevos movimientos, es que se decide elaborar este Modelo Conceptual con el fin de ser un aporte para el desarrollo de una solución definitiva al problema de estabilidad, ya que se han realizado variados estudios técnicos con medidas de mitigación, pero que con el tiempo no han tenido el éxito que se esperaba.

Los factores por analizar pertenecientes al Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa se presentan a continuación, de los cuales analizaremos en más detalle los factores que se consideran más pertinentes para el área

de estudio como la litología, la geomorfología, la meteorización, el rol de la vegetación y del agua y finalmente el factor antrópico.

3.2.2.1 Litología

En la zona de estudio encontramos a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, donde afloran esquistos en diferentes estados de meteorización (Figura 9).



Figura 9: Esquistos de la zona de estudio.

Gracias a las observaciones de terreno y a un perfil sísmico en el dm [39+880] elaborado en el marco del proyecto de referencia de la Ruta CH-160 (Figura 10), se logran apreciar los diferentes estados de la roca y suelo. En superficie se aprecia un horizonte de suelo de 10m, que se encuentra inmediatamente por debajo de la capa vegetal (deforestada casi en su totalidad). Luego se encuentra un horizonte de aproximadamente 20m de roca suelta, mezclada con suelo, geológicamente llamado regolito, lo que se traduce en una de las principales problemáticas de este talud en estudio, ya que se hace muy difícil definir propiedades a un horizonte tan heterogéneo como éste. Finalmente, se encuentra roca de una calidad regular a buena, que subyace a los dos horizontes anteriores. Entonces encontramos a la serie Oriental del Basamento Metamórfico en distintos estados de meteorización.

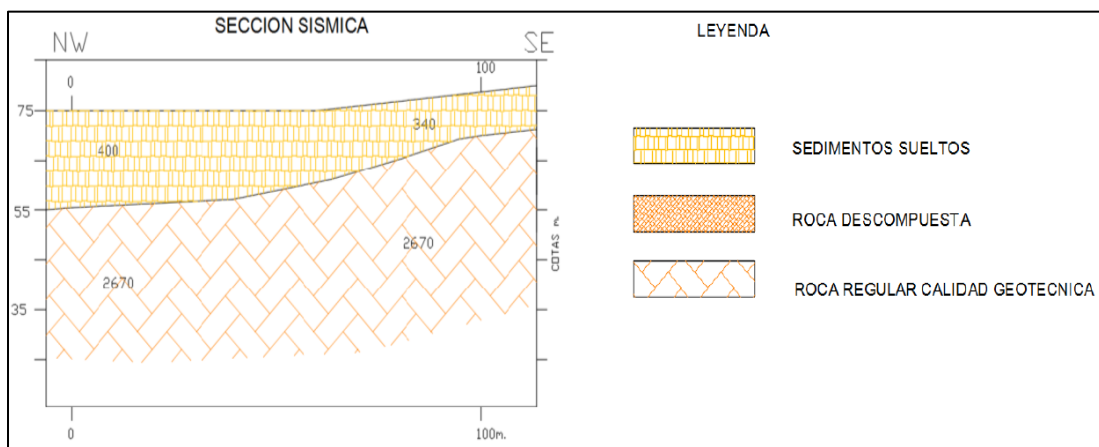


Figura 10: Perfil sísmico dm [39+880] (Concesionaria Ruta CH-160 – Evaluación talud dm [40+000 – 40+400]; Informe Técnico).

Para la clasificación del suelo residual presente en la zona, se extraen los resultados obtenidos en Jara 2017 de los ensayos de granulometría, límites de consistencia, gravedad específica y densidad in situ. A continuación, se presentan los resultados de los ensayos anteriormente mencionados:

- Granulometría y límites de consistencia: Con los resultados arrojados por la curva granulométrica y los límites de consistencia y siguiendo la clasificación USCS, el suelo residual corresponde a un limo de baja plasticidad (ML).
- Gravedad específica (G_s): 2.7
- Densidad in situ: Densidad natural del terreno en un rango de [2.19-2.57] g/cm³.

Como se menciona anteriormente, luego del horizonte de suelo residual, se encuentran fragmentos de esquisto meteorizado entremezclado con suelo, los que conforman en conjunto el regolito. Los minerales que predomina en el esquisto son los micáceos, específicamente en este caso la clorita con la biotita que se presentan con distintos niveles de oxidación. La textura es foliada y los minerales se presentan en forma de hojuelas. En los afloramientos se observa la presencia de abundantes vetas y fragmentos de cuarzo lechoso, donde además en este horizonte de aproximadamente 20m, la roca puede ser fácilmente desintegrada con la mano o se fractura naturalmente en favor de la dirección de la foliación. Luego encontramos la roca madre aflorando pocos metros hasta convertirse en regolito. Se encuentra levemente fracturada en algunas zonas, pero estas fisuras se encuentran rellenas de acumulaciones ferreoarcillosas.

3.2.2.2 Estructuras geológicas

A nivel regional, en la zona del basamento metamórfico (serie oriental y occidental) están presente los plegamientos más intensos, donde sus ejes buzan en general, al oriente y tienen rumbos predominantemente NNE. Los sistemas de fallas principales son N-S a NNE-SSO y NNO-SSE.

En la zona de estudio no es posible realizar mediciones in situ de estructuras geológicas, ya que por la vegetación existente y el desarrollo de los mejoramientos ingenieriles no hay acceso. Sin embargo, se logró apreciar en algunos pequeños sectores sistemas de diaclasamiento los cuales corresponden al sistema de diaclasas que sigue todo el borde costero de la octava región.

Fue posible observar el fracturamiento sufrido por la roca por un tiempo muy limitado, ya que posteriormente se realiza el mejoramiento ingenieril, lo que impide tener afloramientos de roca del tamaño necesario para levantamientos de este tipo de datos.

3.2.2.3 Geomorfología

El área de estudio está ubicada en el sector sur de la comuna de Lota, específicamente a 12km de ésta. A nivel regional la zona se ubica precisamente en la Cordillera de la Costa a aproximadamente 300m al Oeste del estero Chivilingo, casi limitando al Oeste con las Planicies Litorales. En el contexto regional la Cordillera de la Costa presenta dos características diferentes: al norte del río Biobío se constituye en una orografía de lomas, colinas y cuencas de reducido tamaño y de baja altura (Mardones 2005). Al sur del Biobío adquiere nombre propio y es la denominada Cordillera de Nahuelbuta que se extiende 190 km en eje norte-sur con su punto culminante de 1.300m en el Alto de la Cueva. Este relieve adquiere doble importancia como elemento físico regional: 1) actúa como dispersor de aguas alimentando ríos cortos que dan al Océano Pacífico y 2) produce el efecto de biombo climático sobre los territorios situados en su vertiente oriental, generando condiciones de continentalidad térmica para las ciudades interiores (Börgel, 1982).

En la Figura 11 que corresponde a un mapa de relieve, se puede apreciar la elevación de la zona de estudio, la cual alcanza aproximadamente los 70m s.n.m. Si consideramos las alturas hacia la cordillera, la elevación presente en la zona es baja en comparación, pero cabe destacar que el talud generado presenta en sus primeros 15m una pendiente de 50°, lo que, sumado a la elevación presente y a la gran cantidad de movimientos de taludes y laderas a lo largo de la carretera y en general del borde costero debido a pendientes abruptas, se puede considerar como

una zona de posibles deslizamientos. Para poder considerar a la zona como una de riesgo, es necesario analizar todos los factores pertenecientes a este modelo conceptual.

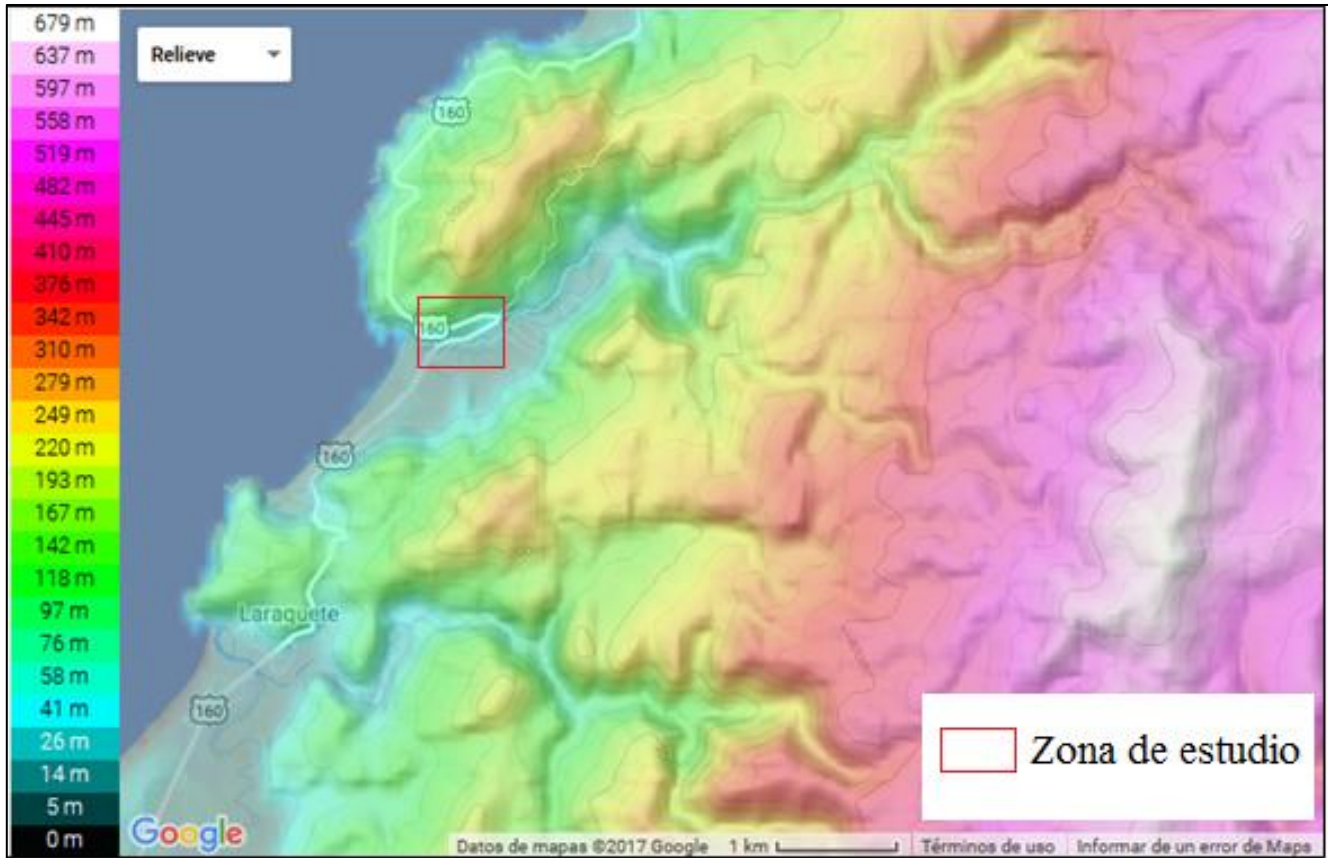


Figura 11: Mapa de relieve zona de estudio (Modificado de Topographic-map.com).

3.2.2.4 Meteorización

Un componente esencial en la estabilidad de taludes es el perfil de meteorización, ya que en muchas ocasiones controla la superficie de falla potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión de poros (Brand, 1985). Generalmente, los perfiles de los suelos residuales se componen de zonas de diferente meteorización que van desde el suelo propiamente dicho hasta la roca sana. Para el talud en estudio se han tratado de definir zonas homogéneas, pero en la práctica no existe zonificación real dentro de un perfil, sino un cambio gradual de las características de los materiales con la profundidad, incluso es muy difícil definir en forma precisa el límite de la roca sana con el suelo residual o la roca descompuesta.

De acuerdo con Cooke y Doornkamp (1990), la meteorización química en Concepción es moderada, dado que la temperatura media anual es de aproximadamente 10°C y la precipitación anual fluctúa entre 900 mm y 1200 mm (Figura 12).

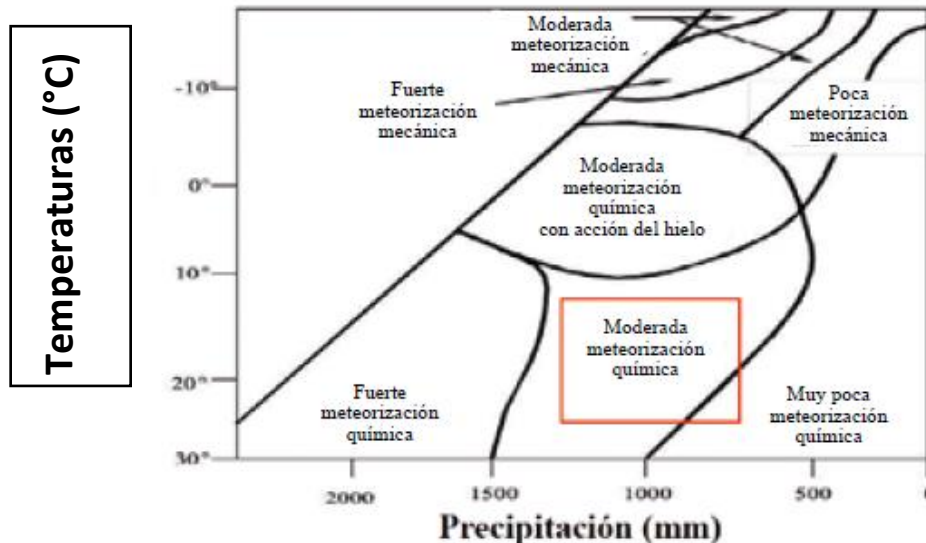


Figura 12: Relación entre precipitación, temperatura y tipo de meteorización (modificado de Sobarzo et. al., 2011).

En las visitas a terreno efectuadas, se aprecia claramente que la meteorización química es uno de los factores que afecta en mayor envergadura a la zona. Si bien en este estudio investigativo no se harán pruebas para detallar el grado de meteorización de los distintos horizontes que comprende el talud, es necesario entender que la meteorización química juega un rol muy importante en la estabilidad, especialmente en el horizonte de regolito definido por una zona de suelos arcillosos intercalados con bloques de rocas en variados estados de meteorización.

El basamento metamórfico aflorante en la zona de estudio presenta distintos grados de meteorización, según la cota en la que nos encontremos. En la base, la roca presenta mediana competencia, con algunas alteraciones pero que no son de mayor relevancia. Sin embargo, a medida que ascendemos, la roca se empieza a desintegrar, afectada claramente por la meteorización química, generando que descienda desde las cotas más altas a las más bajas material coluvial, el cual queda expuesto a lo largo de toda la cara del talud. Finalmente, en las cotas superiores (del banco 1 hacia arriba), se aprecia un horizonte de suelo residual.

3.2.2.5 Tectónica y fracturación

Durante el Paleozoico, en el borde occidental del continente, se produjo el desarrollo de prismas de acreción (Mpodzis y Ramos 1990). En el Silúrico-Devónico, se depositan series turbidíticas en el piso oceánico adyacente al borde occidental del continente. Dado que no existen registros de actividad intrusiva, se considera un margen continental pasivo, según Mpodzis y Ramos (1990). Previo al Carbonífero, se comienza a generar una zona de subducción, las secuencias turbidíticas que forman parte del prisma de acreción, son sometidas a una fuerte compresión y acoplamiento mecánico de la placa oceánica en el complejo de subducción, seguido de un enterramiento de las rocas de la base del prisma. La parte oriental, de mayor potencia, es afectada por metamorfismo de baja presión/temperatura, mientras que, en el sector occidental del prisma, fue afectado por metamorfismo de mayor grado. Estos procesos se generaron en el Carbonífero Superior. La culminación de este periodo está marcada por la generación de un arco magmático en el Paleozoico Superior (Mpodzis y Ramos, 1990). Con la formación de este arco, se elevó todo el sistema de modo que el complejo metamórfico es elevado a la superficie y comienza su erosión.

Los plegamientos más intensos conocidos para la zona corresponden a los que se presentan en las series oriental y occidental del Basamento Metamórfico (Ferraris, 1981). Sus ejes buzan en general, al oriente y tienen rumbos predominantemente NNE. El fallamiento y/o fracturamiento alcanza su mayor intensidad en el Batolito de la Costa, tanto en su porción central como periférica. En la Depresión Central, las trazas de estas estructuras están cubiertas

por los depósitos pleisto-holocénicos, mientras que, en el flanco occidental de la Cordillera Andina, se observa un menor desarrollo relativo de estas estructuras. Los sistemas de fallas principales son N-S a NNE-SSO y NNO-SSE. El primer sistema (N-S a NNE-SSO) controla, fundamentalmente, tanto los acantilados costeros, como los quiebres de pendiente locales entre la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, manifestándose también en la Cordillera Andina. El segundo sistema (NNO-SSE) controla, mediante estructuras de mayor desarrollo aparente, los cauces principales y tributarios que atraviesan estas cordilleras, los cuales tienen una dirección general semejante y son sensiblemente paralelos entre sí. Por otra parte, estas estructuras que permitieron el levantamiento relativo de la Cordillera de la Costa respecto de la Depresión Central son las responsables de las grandes acumulaciones sedimentarias que existen al oriente de la Cordillera de la Costa, debiendo los ríos, como el Biobío, abrirse paso a través de ésta mediante llanos relativamente estrechos (Aquaterra Ingenieros Ltda., 2011).

3.2.2.6 Pendiente y topografía

Como se señaló anteriormente y se detalla en la Figura 5, en el sector correspondiente al tramo dm [40+200] a dm [40+400], originalmente se definió, de acuerdo con el proyecto de la concesionaria de la Ruta CH-160, un talud con un tendido de 1H:1V, con bancos cada 10m de altura y bermas de ancho 3m, hasta alcanzar la superficie natural del suelo y la altura que resultase de esto. Por motivos de ajuste en sectores con deslizamientos, se efectuó un reperfilado lográndose taludes según un tendido 3H:2V, con bancos de 4m de ancho cada 15m de altura.

El resultado definitivo de lo propuesto por Acciona Ruta CH-160, comprobado en las visitas a terreno es que desde el pie hasta el primer banco se logra obtener una pendiente aproximada a los 50°, donde posteriormente se realiza el mejoramiento de terreno. Luego, desde el primer banco hacia arriba, se logra una pendiente aproximada de 33°. En total, la altura alcanza los 45m, con bancos cada 15m.

La topografía de la zona realizada por Acciona, nos indica alturas de 90m s.n.m. aproximadamente.

3.2.2.7 Clima

Las condiciones climáticas del área a evaluar están directamente relacionadas con la meteorización y erosión de la misma. Dentro de los factores climáticos considerados están las precipitaciones, viento, cambio de temperatura y radiación solar. Sin embargo, las precipitaciones es el factor más relevante para nuestro estudio y coincide con otros estudios y observaciones en la zona (Bravo, 2016).

La región del Biobío marca la transición entre los climas templados secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos que se desarrollan inmediatamente al sur del río Biobío. En la franja costanera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales.

Las precipitaciones acumuladas en la zona sobre los 100mm en un período de hasta 10 días son consideradas generadoras potenciales de eventos de remoción en masa, según estudios hechos por Bravo (2016). Por ejemplo, Mardones (1994) considera 2 días de precipitaciones acumuladas sobre los 100mm como factor causal de eventos de remoción en masa para la comuna de Talcahuano, perteneciente a la región del Biobío. Sin embargo, López (2015) estima, también para Talcahuano, precipitaciones umbrales con intensidades entre 84,8 y los 85,1 mm en 24 horas; por otra parte, la propuesta por Peña, Tavares y Mardones (1993), indica como forzante de eventos de remoción en masa a precipitaciones con intensidades de 80 mm en 24 horas en la región.

3.2.2.8 Hidrogeología

El agua es un elemento condicionante de remociones en masa tanto directa como indirectamente. La característica de los caudales, escorrentías, infiltración y posición del nivel freático, además de la permeabilidad y porosidad, influyen en la incorporación de agua en suelos y macizos rocosos (Lara, 2007). El agua juega un papel negativo en la resistencia de los materiales, ya que, por un lado, genera presiones intersticiales que reducen la resistencia, aumentan los esfuerzos de corte por el incremento de peso del terreno y generan fuerzas desestabilizadoras en

grietas y discontinuidades, y por otro lado reduce la resistencia al corte de discontinuidades al lavar los rellenos de estas (González de Vallejo et al. 2002).

En el talud de este estudio no se tiene una estimación real del nivel freático ya que nunca fue medido con precisión. Las grietas de extensión generadas en el primer banco del talud con las lluvias quedan rellenas con agua, el sistema de drenaje de agua no es eficiente y además es sabido que los deslizamientos históricos en la zona se han llevado a cabo luego del período de lluvias. Este último precedente hace que la hidrogeología juegue un rol fundamental en el desarrollo de los movimientos en masa en toda la zona de estudio.

3.2.2.9 Sismicidad

El régimen tectónico en el que se encuentra Chile lo convierte en un país naturalmente sísmico y ya en el 2017 estamos prácticamente acostumbrados a presenciar sismos de media intensidad constantemente. Sin embargo, cuando hablamos de sismicidad en el Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa, no solo se abarcan temblores y terremotos, sino que se incluyen todo tipo de vibraciones que se puedan generar en la zona. Éstas pueden ser inducidas por vehículos que transitan en las cercanías, maquinarias que se utilizan en trabajos cercanos (obras de construcción), diversa actividad antrópica y naturalmente por el movimiento de las placas tectónicas.

Los problemas de estabilidad comienzan luego de la entrega parcial de la Ruta CH-160. A diario transitan gran cantidad de camiones con cargamento que necesitan subir una pronunciada pendiente paralela al talud, por ende, las vibraciones de los vehículos afectan en alguna medida en la estabilidad, ya que éstas se pueden sentir cuando los camiones pasan cerca. Sin embargo, esta hipótesis podrá ser comprobada en el ítem de alternativas de remediación, ya que ahí se realizará un análisis de estabilidad global pseudoestática del talud.

3.2.2.10 Vegetación

Al realizar los cortes para la generación de la nueva carretera, fue necesario remover parte de la vegetación existente. Sin embargo, para obtener la geometría adoptada en el año 2015 la cual implicaba una extensión del talud preexistente, fue necesario remover el 100% de la vegetación (Figura 13). Lo que predominaba en el área eran eucaliptus de plantaciones forestales.

El eucalipto es un árbol que absorbe grandes cantidades de agua por lo cual se dice que mejora el balance del ciclo del agua y así mismo también presenta tasas muy inferiores de erosión (Grupo Empresarial ENCE, S.A. 2009).

También es sabido que la existencia de vegetación en los taludes provoca una fuerza resistente que se opone a los deslizamientos, así como también ayuda a que la erosión superficial por agentes naturales no afecte de manera directa al suelo en cuestión.

Es por aquello que el factor vegetación está implicado de forma directa en los problemas de estabilidad, ya que, con la deforestación se elimina la gran vía de drenaje de agua que tiene naturalmente el talud, generando un aumento de la presión de poros en el suelo y un aumento del nivel freático (lo que no se considera al momento de hacer efectiva la deforestación). Además, esto permite que el agua infiltre directamente al suelo, favoreciendo a la erosión superficial.


(a)

(b)

Figura 13: (a) Deforestación del talud, (b) Talud desforestado con nueva geometría (Concesionaria Ruta CH-160 Evaluación talud dm [40+000 - 40+400] informe técnico, 2015)

3.2.2.11 Efecto antrópico

El área de estudio presenta una gran intervención antrópica. En primera instancia este talud fue modificado en el marco de la construcción de la nueva Ruta CH-160 que conecta San Pedro, pasando por la comuna de Lota hasta llegar a Lebu. Debido a la inestabilidad de este talud, se ha hecho necesaria la intervención en variadas ocasiones. Luego de su geometría definitiva al entregar la ruta, se deforestó toda la cara expuesta que corresponde a la cara Sur, que va de W-E. Posterior a esto, se crea una nueva geometría por un deslizamiento local generado después de los meses de invierno en el año 2015.

Esto implicó disminución de la pendiente, creación de bancos de 4m de ancho ubicados cada 15m de altura, deforestación de la cabeza del talud ya que inicialmente éste tenía 35m y se extendió a 45m aproximadamente. Se hicieron canales de drenaje de agua en ambos bancos y en el pie del talud, así como también drenajes verticales que recolectan el agua y la hacen descender a la canal principal del pie del talud. Además, se instalaron drenes californianos en todo el pie del talud, pero no eran eficientes ya que el agua que salía por éstos se volvía a infiltrar en el pie y no caía en la canal principal (no cumplían su función). No obstante, estos cambios no fueron significativos, ya que el talud vuelve a deslizarse en el año 2016, generándose una superficie de falla que traspasó el pie del talud, deformando parte de la carretera (Figura 14).

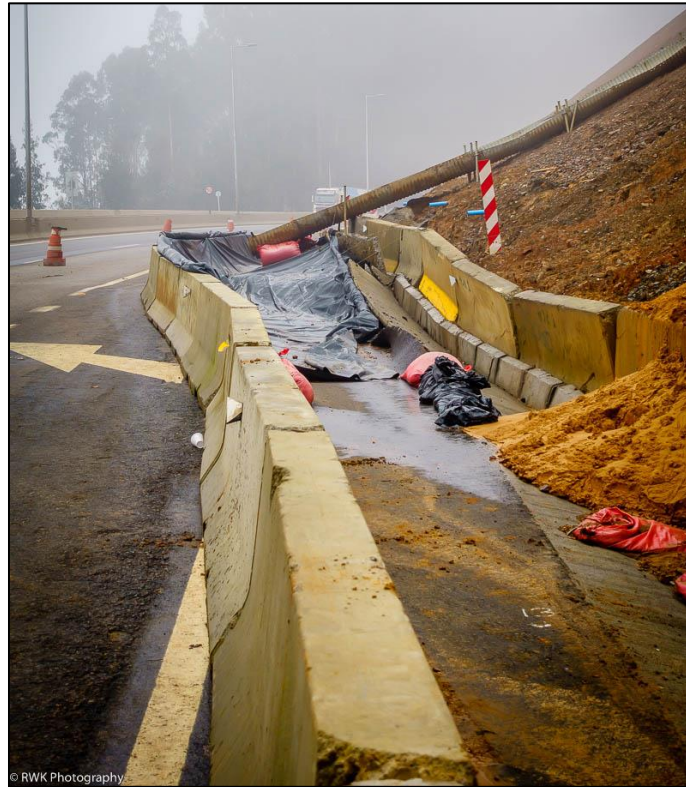


Figura 14: Parte de la carretera deformada producto del deslizamiento ocurrido el 2016 en la zona.

Es por aquello que se vuelve a intervenir con un mejoramiento ingenieril tipo soil nailing, con drenes californianos en toda el área que abarca el mejoramiento.

Añadiendo a lo anterior, cabe destacar que para la realización de la nueva geometría y el posterior soil nailing, se extrajo gran cantidad de material (suelo y roca). Esto genera que el área del talud que presenta mejoramiento ingenieril se encuentra un par de metros más en profundidad que el área sin mejoramiento ingenieril.

3.2.2.12 Factor tiempo

Generalmente todos los procesos que afectan a un talud no son generados instantáneamente, sino que, toman períodos largos de tiempo. Es por eso que el tiempo juega un rol importante ya que algunos factores que puedan estar afectando a cualquier talud pueden irse modificando a través del tiempo, como lo son el clima, la hidrogeología, las condiciones ambientales, la intensidad de las lluvias, etc.

Con el tiempo las reactivaciones de movimientos pueden mostrar cambios en relación con la fase de rotura. En efecto, después de periodos prolongados de inactividad las propiedades de los materiales deslizados pueden haber cambiado por efecto de la consolidación, drenaje o alteración, entre otros mecanismos.

En la Figura 15 se puede apreciar un gráfico de desplazamiento acumulado v/s tiempo, donde puede existir una superficie de falla progresiva, que se va generando en el tiempo debido a los factores condicionantes que están influyendo en el talud. Sin embargo, cuando se produce la falla, es cuando acontece el evento activo o factor desencadenante del movimiento, pudiendo tardar desde algunos días, hasta años. Luego de ocurrida una falla, si no se han tomado las precauciones necesarias o respectivas medidas de prevención para que el movimiento no ocurra nuevamente, el deslizamiento puede volver a reactivarse.

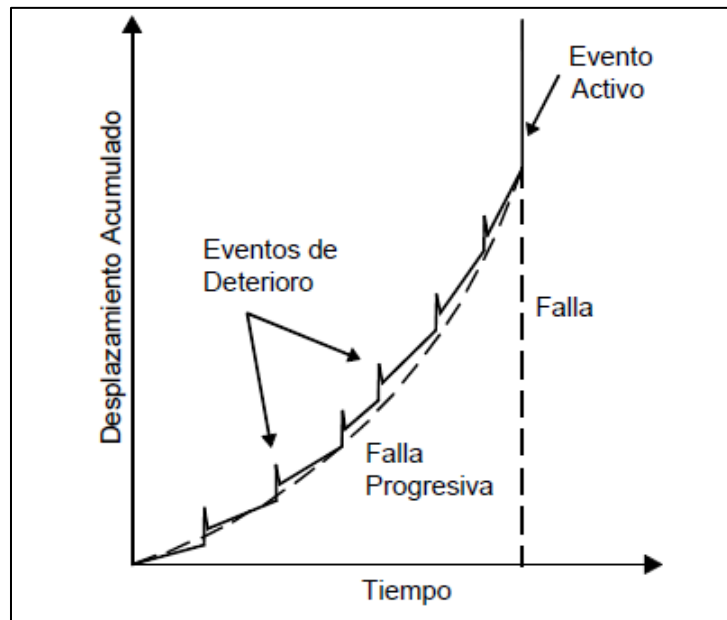


Figura 15: Gráfica del desplazamiento acumulado v/s tiempo (Suarez,1998).

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de estabilidad global del talud

Sabemos con anterioridad que el talud en cuestión ha presentado deslizamiento en dos ocasiones, por lo cual nos basamos en Atkinson (2007), quien dice que si un suelo ha presentado falla se deben ocupar los parámetros residuales para la modelación. Para el análisis ocuparemos los parámetros residuales del suelo obtenidos por Jara (2017), con el fin de hacer una comparación con la modelación realizada por la concesionaria Ruta CH-160. Los parámetros se pueden observar en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Parámetros de resistencia residuales Limo de baja plasticidad (Tomados de Jara 2017).

	Limo de baja plasticidad (ML)
Ángulo de fricción residual Φ_r (°)	15
Cohesión residual C_r (kPa)	10

Tabla 2: Parámetros de resistencia Roca Esquisto (Tomados de concesionaria Ruta CH-160).

	Esquisto
Ángulo de fricción Φ (°)	30
Cohesión C (kPa)	50

Con el objetivo de realizar una modelación representativa, escogemos el perfil B de la topografía facilitada por la concesionaria Ruta CH-160, el cual coincide con el dm [40+318] (Figura 16).

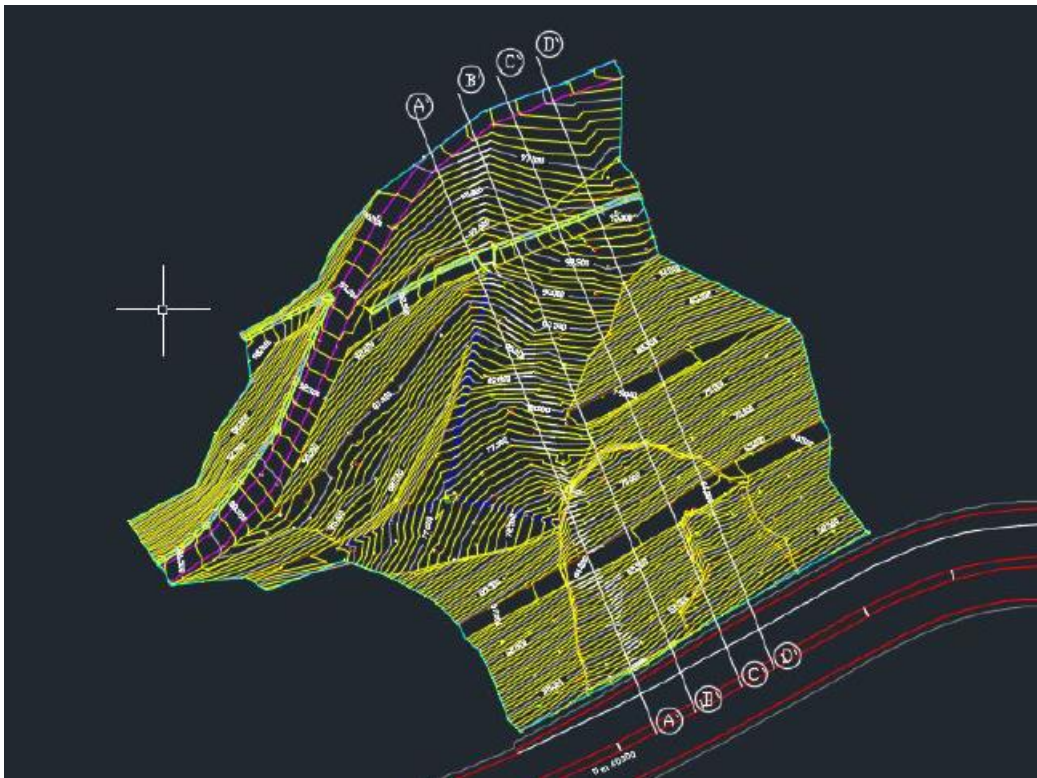


Figura 16: Vista en planta de la topografía realizada en la zona y los perfiles transversales estudiados (Concesionaria Ruta CH-160).

Se realiza un análisis de estabilidad global estático y pseudoestático en el programa GGU-STABILITY. Cabe destacar que este tipo de análisis es sólo una aproximación a la realidad, ya que representar la litología de la misma forma en que ésta se presenta en terreno se hace muy difícil para este tipo de software. Es sólo a través de los parámetros geotécnicos que se diferencian los materiales que constituyen en este caso el talud, y no es posible diferenciar entre un suelo, un regolito o una roca de otra forma.

Este análisis de estabilidad global se realiza a través del método de Bishop (Bishop y Morgenstern, 1960), específicamente en el dm [40+318].

Este método de equilibrio límite trabaja con las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de ruptura circular.
- La masa deslizando se divide en n rebanadas o bloques verticales.
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo.
- A partir de la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas normales a la superficie de ruptura y se sustituyen a la ecuación resultante del equilibrio de momentos.
- El Método de Bishop Simplificado ignora las tensiones tangenciales entre rebanadas. Por otro lado, considera las normales.

Cuando se realiza un análisis de estabilidad global de un talud, a través de un método de equilibrio límite como el método de Bishop, se necesitan los parámetros de resistencia del o los materiales que conforman el talud, la geometría que se desea modelar y una estimación de la probable superficie de falla que se generaría. En este caso al utilizar un método de equilibrio límite el nivel freático (N.F.) no influye en el cálculo del factor de seguridad

(F.S.), por lo que la modelación en cualquiera de los 3 casos hipotéticos de N.F. nos conduce al mismo valor del F.S., generando las mismas superficies de falla (Figura 17). Las tonalidades de las diferentes superficies de falla generadas varían entre los colores rojos y azules, los cuales corresponde a un factor de seguridad de 0.8 y 1.0 respectivamente.

En el caso pseudoestático, considerando $k_h = a_h/g = 0.2$ y $k_v = a_v/g = 0.0$. El factor de seguridad mínimo alcanza un valor de 0.84. Esto nos indica que el talud con su geometría actual y con los parámetros de resistencia de los materiales que lo constituyen (suelo residual y regolito), no es estable.

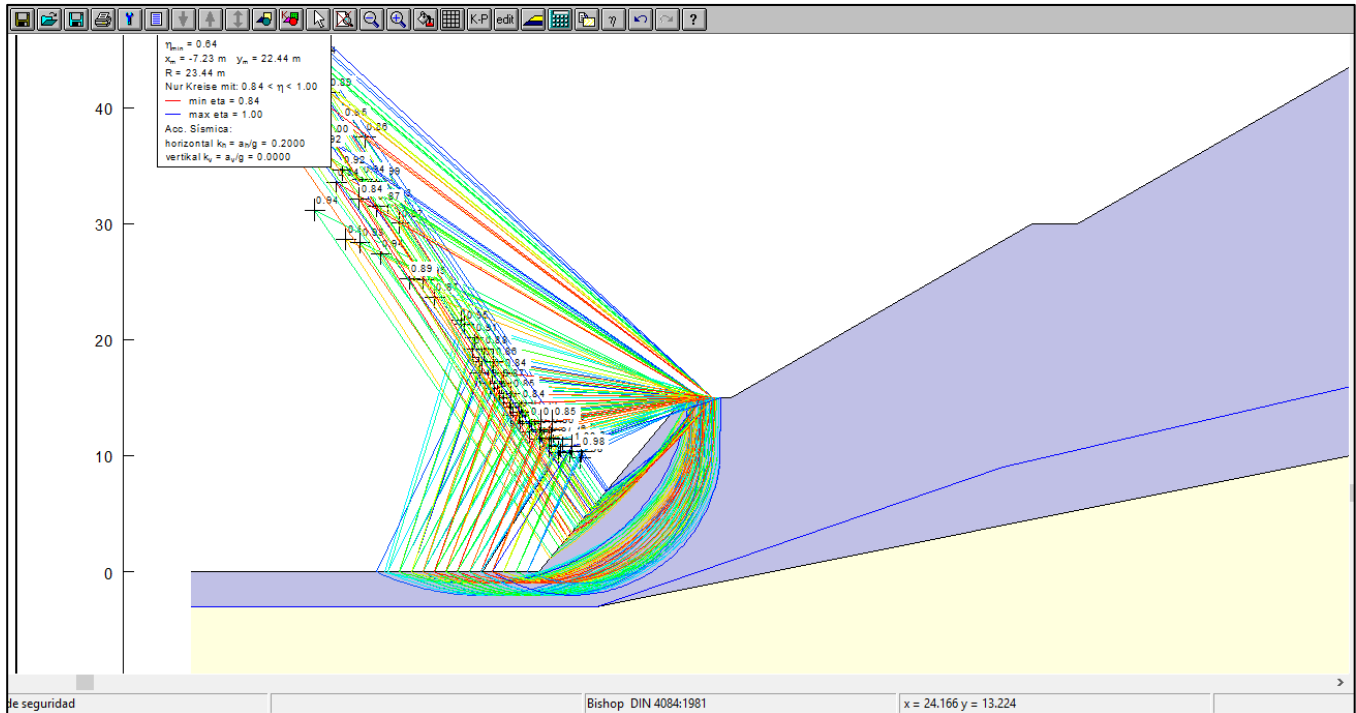


Figura 17: Análisis de la estabilidad global del talud en estudio con las superficies de falla generadas considerando $k_h = a_h/g = 0.2$, utilizando programa GGU-STABILITY.

5.2 Factores desencadenantes y condicionantes

La evidencia recopilada a través de la aplicación del Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa y el análisis de estabilidad global permite tener en conocimiento cuales son los factores que detonan y condicionan el deslizamiento del talud.

Aproximadamente en la región del Biobío caen anualmente entre 1200 y 2000 mm de precipitaciones. El agua precipitada se infiltra, aumentando la presión de poros del suelo residual presente, lo que automáticamente genera una disminución de la resistencia de éste. En primera instancia se agregaron drenes californianos en el pie del talud luego del primer deslizamiento, para generar una vía de evacuación del agua, pero no fueron suficientes, ya que el talud en el año 2016 volvió a deslizar luego de las precipitaciones del invierno. Por ende, se optó por una solución ingenieril que consistió en un mejoramiento tipo soil nailing, además de un aumento del número de drenes californianos, que se añadieron en toda la cara del mejoramiento del talud (Figura 18).



Figura 18: Soil nailing y drenes californianos en los primeros 15m del talud en estudio (Fotografía tomada en Mayo 2017).

En observaciones de terreno, se puede apreciar en una de las últimas visitas al talud (Mayo 2017), que drena agua a través de los drenes californianos, incluso en períodos sin precipitaciones, lo que nos indica que el talud presenta en su interior grandes cantidades de agua. Además de los drenes, se crearon canales en el pie y en todos los bancos del talud, así como también canales verticales que van desde la corona del talud al pie, con el objetivo de poder drenar el agua y evitar que se infiltre el 100% de precipitaciones que caen. Sin embargo, algunas de estas canales se encuentran a medio terminar y otras sin conexión entre alturas, por ende, no cumplen su función y el agua que debería ser drenada se vuelve a infiltrar en el primer banco del talud (Figura 19).



Figura 19: Canales sin conexión con el contrafoso principal (Fotografías tomadas en Mayo 2017).

Sumado a todo lo anterior, también está la deforestación de la vegetación que preexistía. Al ser removidos gran cantidad de eucaliptus de la corona y toda la cara expuesta del talud, se elimina una gran fuente de drenaje de agua, lo que genera otro problema relacionado con la infiltración.

Considerando que los deslizamientos se han generado justo después de la temporada de lluvia, encontrándose el suelo residual saturado e intensamente meteorizado, es muy probable que los factores detonantes de los deslizamientos ocurridos sean las vibraciones a las que se somete el talud en conjunto con las precipitaciones.

En resumen, los factores que condicionan al talud y lo mantienen en riesgo de deslizamiento constante so, la vegetación, debido a la ausencia de ésta luego de la deforestación, la meteorización que afecta a la zona ya que ésta genera que la roca del Basamento Metamórfico (esquisto) vaya perdiendo su calidad y con el tiempo se genere un horizonte de suelo residual más extenso y finalmente el efecto antrópico. Este último es el responsable de que los drenajes de agua (canaletas en este caso) no estén cumpliendo su función adecuadamente luego de realizar el mejoramiento ingenieril, de la deforestación en 100% de la vegetación, de la remoción de material a lo largo de toda la cara expuesta del talud y de todos los cortes realizados en el pie de éste.

5.3 Alternativa de remediación: mejoramiento ingenieril tipo Soil Nailing

La concesionaria Ruta CH-160 (Acciona), propone un mejoramiento de terreno de tipo soil nailing, el cual se ejecuta en los meses de verano del 2017. Este mejoramiento de terreno consiste en una pantalla flexible de hormigón proyectado y anclajes pasivos separados a poca distancia que se utiliza para la estabilización del corte en excavaciones.

Nuevamente con el fin de comparar con los trabajos de la concesionaria, se realiza un modelamiento en el software GGU-STABILITY, con el mejoramiento de terreno tipo soil nailing usando los parámetros obtenidos por Jara (2017) en su back análisis, escogiendo el mismo perfil en el que se realiza el análisis de estabilidad global (Figura17). Sin embargo, se considerarán 3 escenarios de análisis posibles: nivel freático inferior, nivel freático medio y nivel freático superior, con el objetivo de tener una estimación del factor de seguridad en éstos 3 casos, ya que no existe una estimación real del nivel freático.

Para la modelación se consideran las propiedades de las Tablas 4 y 5.

Tabla 4: Propiedades elementos de refuerzo (Concesionaria Ruta CH-160 Evaluación talud dm [40+000 - 40+400]; Memoria de Cálculo soil nailing, 2016).

Tipo	Barra MAI R38N
Diámetro exterior de la barra	38 mm
Diámetro interior de la barra	19 mm
Área de la barra	850 mm ²
Carga de rotura	50 0kN
Carga de fluencia	400 kN

Tabla 5: Propiedades del revestimiento de hormigón proyectado reforzado con mallas metálicas (Concesionaria Ruta CH-160 Evaluación talud dm [40+000 - 40+400]; Memoria de Cálculo soil nailing, 2016).

Hormigón proyectado (shotcrete)	H-30
Refuerzo tipo	Doble malla ACMA C-257
Espesor revestimiento	200 mm

Además de las propiedades de los elementos de refuerzo y del revestimiento de hormigón proyectado, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Una sobrecarga en la corona del talud de $q=12\text{kPa}$.
- Para el análisis pseudoestático se consideran aceleraciones que se ajustan a la norma chilena (NCh433 y NCh3206). Coeficiente de aceleración sísmica horizontal: $k_h = 0.2$.
- Análisis a través del Método de los Bloques con la norma DIN 4084: 1981.

La Figura 19 representa la modelación del talud con el mejoramiento de terreno en el caso más desfavorable con un nivel freático superior.

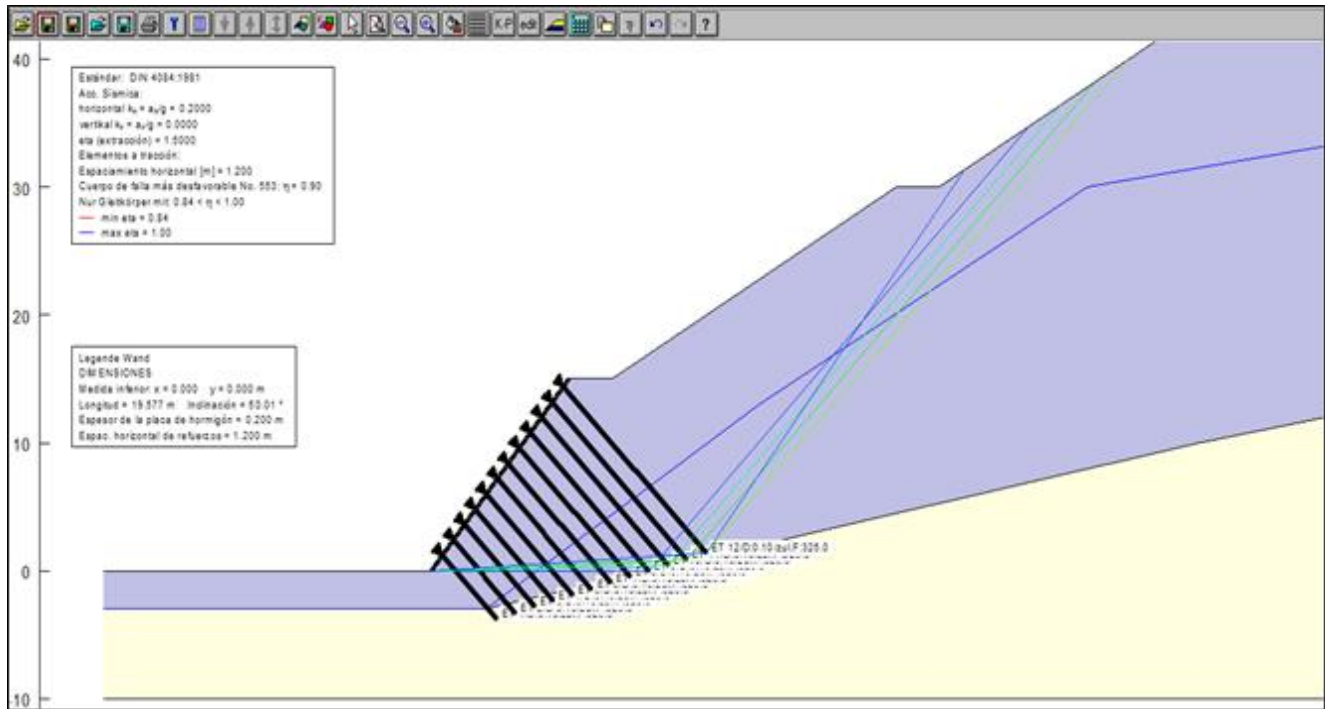


Figura 19: Geometría y modelación del soil nailing en el talud con superficies de falla generadas considerando $k_h = a_h/g = 0.2$, Elaborado con software GGU-STABILY.

Los resultados de la modelación son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores de los Factores de Seguridad (F.S.) obtenidos en la modelación del soil nailing.

Nivel freático	F.S. Caso estático	F.S. Caso pseudoestático
Inferior	1.46	1
Medio	1.45	0.99
Superior	1.3	0.99

Como se puede apreciar en la Tabla 6, en los 3 casos de diferentes de nivel freático, tenemos que pseudoestáticamente el talud no es estable, según el criterio de aceptabilidad recomendado por FHWA. Cabe destacar que se cree que el nivel freático superior se escapa de la realidad, pero como no se tiene una estimación real de éste, no es posible descartarlo y se presenta como el peor escenario posible.

6.- CONCLUSIÓN

El Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa realizado representa la base para una caracterización global del talud en estudio, lo que abre las puertas para una correcta y eficiente realización de mejoramientos ingenieriles. Los resultados de este Modelo Conceptual nos arrojan los factores más importantes a tener en consideración en el futuro y a evaluar las causas por lo que se están produciendo los deslizamientos.

Estudios anteriores como el de Mardones (1994) quien establece un umbral de 100mm de precipitaciones en 48 horas para un posible evento de remoción en masa en la región del Biobío, o lo que indica López (2015) estableciendo umbrales de intensidades aproximadas de 85mm de precipitación en 24 horas como evento de potenciales deslizamientos, y sumado a todos los resultados obtenidos en este Modelo Conceptual, es que se concluye que el agua infiltrada producto de las precipitaciones presentes en la zona juega un rol fundamental en la estabilidad del talud, haciendo que las lluvias sean el factor detonante de cualquier movimiento o colapso ocurrido. Es por esta razón que es de gran interés enfocar los estudios futuros en la hidrogeología de la zona.

Si bien se ha instaurado un mejoramiento ingenieril en la zona de deslizamiento, es posible que éste no sea de gran efectividad si no se toman en consideración las recomendaciones señaladas en el capítulo siguiente, como por ejemplo el mejoramiento de la red de drenaje de agua que involucra las canaletas y contrafosos.

Finalmente, el talud de la zona es el principal ejemplo de que en la ingeniería el Modelo Conceptual no es contemplado en ninguna clase de estudio, y cada vez que se intenta solucionar el problema de estabilidad sin la previa realización de éste, la solución no es eficiente. Es por aquello que, en esta investigación, más allá de entregar resultados concretos y tangibles, busca instaurar al Modelo Conceptual para procesos de remoción en masa como parte fundamental de cualquier mejoramiento de terreno que implique la estabilidad de taludes, y así a futuro disminuir tanto los costos estructurales que implican los mejoramientos, así como también disminuir considerablemente las pérdidas humanas que cada año surgen por este tipo de problemas.

7.- RECOMENDACIONES

No se sabe con certeza que la última intervención en el talud sea la solución permanente para terminar con el problema de estabilidad en la zona y es por esta razón que se propone adoptar las siguientes recomendaciones:

1. Mejorar el sistema de drenaje ya que las canaletas no están cumpliendo su función. El agua se vuelve a infiltrar en el talud, porque las conexiones entre éstas están interrumpidas, y no es captada por el contrafoso principal que está aledaño a la carretera.
2. Realizar una estimación real del nivel freático. Esta estimación se puede realizar artesanalmente a través de un agujero barrenado en el suelo. El nivel de agua en el agujero corresponde con el nivel freático.
3. Realización de estudios geofísicos en la zona. Por ejemplo, los métodos eléctricos. Estos métodos pueden brindar información sobre el acuífero de una zona, determinando las capas permeables e impermeables, así como la profundidad a la cual se encuentra el nivel de agua subterránea.
4. Monitoreo mediante topografía al talud, para así detectar posibles movimientos y deformaciones que éste vaya teniendo en el transcurso del tiempo.
5. Monitoreo de las grietas de tracción situadas en toda la extensión del primer banco del talud. Se recomienda cubrirlas con polietileno.
6. Monitoreo de la solución ingenieril implementada (soil nailing). Este monitoreo se puede llevar a cabo a través de las células de presión y de carga. Estas células nos entregarán la carga que está ejerciendo el talud y la carga que está recibiendo el perno respectivamente.
7. Estudios de vibraciones al pie del talud, como por ejemplo con transductores (geófonos) instalados en el interior o en la superficie del macizo rocoso. Se puede utilizar el monitoreo de las vibraciones como una herramienta de diagnóstico.

8.- REFERENCIAS

- Aquaterra Ingenieros Limitada.** (2011). Estudio hidrogeológico cuencas Bio Bío e Itata. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile.
- Atkinson, J.** (2007). *The Mechanics of Soils and Foundations*. Second Edition by Taylor & Francis.
- Bishop A.W., Morgenstern N.** (1960). "Stability Coefficients for Earth Slopes". *Geotechnique* Vol 10, No. 4,.
- Borgel, R.** (1982). *Geomorfología*. Vol. 11 Colección Geografía de Chile. Santiago. Eds. Instituto Geográfico Militar de Chile.
- Brand, E.W.** (1985). "Predicting the performance of residual soil slopes". In Proc., 11th International conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 5, pp. 2541-2578.
- Centeno, J.** (2008). *Geodinámica Externa LG-IG: Meteorización*.
- Cooke, R.U. Doornkamp, J.C.** (1990). *Geomorphology in environmental management: An introduction*. Clarendon Press, Oxford, 410 pp.
- Cruden, D.** (1991). A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Ferraris, F.** (1981). Avance geológico Hoja Los Ángeles-Angol: Región del Biobío. Esc. 1:250.000. N°5. 26 pp. Santiago.
- GEOTECHNICAL ENGINEERING CIRCULAR N° 7: Soil Nail Walls, Publication N° FHWA 0-IF-03-017 (marzo 2003).
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C.** (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson.
- Grupo Empresarial ENCE, S.A.** (2009). *La gestión forestal Sostenible y el Eucalipto*.
- Hauser, A.** (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. Boletín No. 45, p. 7-29.
- Hervé, F.** (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. En: *Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile*: T. Ishikawa and L. Aguirre. Japan Society for the promotion of Science, Tokyo. pp. 1-51.
- Hutchinson, J.** (1988), General Report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In *Bonnard, C. (Editor), Proceedings, fifth international Symposium on Landslides*, A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 3-36.
- Jara, F.** (2017). Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil: Estudio de la estabilidad de un talud en la ruta 160. Concepción: UCSC.
- Lara, M.** (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en la quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias Mención Geología y Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, 212 p.
- López Filun, P. A.** (2015). "Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur". *Revista Colombiana de Geografía*.
- Matteis, A.** (2003). *Geología y Geotecnia, Estabilidad de Taludes*. Universidad Nacional de Rosario.

- Mardones, M., Echeverría, F., y Jara, C.** (2005). “Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción”. Investigaciones Geográficas.
- Mardones, M., Rodríguez A., y Soto J.** (1994). “Los riesgos naturales en la comuna de Talcahuano”. Actas del 7° Congreso Geológico Chileno, vol. 1, 653-656. Concepción, Universidad de Concepción.
- Mpodozis, C; Ramos, V.** (1989). The Andes of Chile and Argentina, in: Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources; Ericksen, G.E., Cañas M.T. and Reinemund, J.A. (Editores), Houston, Texas, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Science Series, Vol. 11, p.59-90.
- NCh 3206-2010** Geotecnia – Excavaciones, Entibaciones y Socalzados – Requisitos.
- NCh 433 Of.1996** Mod.2009 Decreto 2011 Diseño Sísmico de Edificios.
- Quinzio, A., Collao, S., González, A., Alfaro, G. & Ceccioni, A.** (2000-2001). Proyecto SERPLAC. Evaluación de los recursos metálicos de la Región del Biobío. Fondo Nacional del Desarrollo Regional. BIP N°20107632-0.
- Sepúlveda, S.A.** (1998). Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Sobarzo, V., Villalobos, F y King, R.** (2011). Estudio de la estabilidad de taludes en roca meteorizada de la formación Quiriquina. Obras y Proyectos 9, 38 – 48.
- Suarez, J.** (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial Santander.
- Varnes, D.** (1978), Slope movement types and processes. In Shuster, R. L and Krizek, R. J. (Editors), Landslides, Analysis and Control, Special Report 176: Transportation Research Board National Academy of Science, Washington, DC., pp. 11-33.
- Villalobos, F.** (2014). Mecánica de Suelos. Editorial UCSC y LGM.
- Willner, A.** (2005). Pressure–Temperature Evolution of a Late Palaeozoic Paired Metamorphic Belt in North–Central Chile (34°– 35°30’S). Journal of Petrology 46/9: 1805–1833.