

**MODELO CONCEPTUAL DEL MOVIMIENTO EN MASA DEL TALUD
UBICADO EN PK 28+400, RUTA 160, COMUNA DE LOTA.**

C. Arias Tapia¹, R. King St-Onge² y J. Montenegro Cooper³

RESUMEN:

El talud ubicado en el PK 28+400 de la Ruta CH-160, en la Comuna de Lota, ha sufrido desde su corte el año 2010 un fenómeno de movimiento en masa, en la forma de un lento pero progresivo deslizamiento traslacional en favor de la pendiente, esto es, hacia la carretera. Esto ha causado en la calzada daños considerables. La concesionaria a cargo de la autopista ha extraído material que cae al pavimento cada temporada invernal, los mayores volúmenes en 2014 y 2017. El presente Modelo Conceptual indaga en una serie de factores de diversa naturaleza, cuya combinación da origen a este proceso. Con una metodología consistente, a grandes rasgos, en investigación bibliográfica, trabajo de terreno y análisis con software especializado, se logra una caracterización de dichos factores, identificando cuales y en qué forma y magnitud contribuyen al problema en cuestión. Las características geológicas y geotécnicas del material, un suelo residual arcilloso de alta plasticidad, se combina con la saturación del terreno, causada por las intensas lluvias invernales y la nula evacuación de las aguas lluvias provenientes de los cerros colindantes, cuya escorrentía es descargada en la ladera estudiada. La vegetación, que contribuye a la estabilidad, fue removida en años pasados y se encuentra aún en proceso de recuperación. El contacto entre la unidad geológica en movimiento y la subyacente, una arenisca, así como la falla ubicada en su flanco izquierdo, que la separa de una unidad metamórfica, han facilitado el proceso, actuando como superficies de ruptura. Esta combinación da como resultado un riesgo alto de desastre. Las principales medidas propuestas consisten en la canalización de la escorrentía superficial de aguas lluvias, así como la mantención de una cobertura vegetal densa. Asimismo, se recomienda el monitoreo constante del movimiento en masa, a fin de prevenir la ocurrencia de un desastre.

PALABRAS CLAVES: Estabilidad de Taludes; Modelo conceptual; Movimiento en masa.

ABSTRACT:

The slope located at PK 28+400, Route CH-160, Community of Lota, has suffered a landslide phenomenon since its intervention in 2010, in the form of a slow but progressive translational slide along the slope, towards the highway. This has caused considerable damage to the road structure. The company in charge of the highway has continuously extracted material that falls on the pavement every winter season; the largest volumes were registered in 2014 and 2017. In this Conceptual Model study, a number of factors of different nature are investigated, which once combined will shed light on the origins of this process. With a methodology consisting of, bibliographical research, field work and analysis with specialized software a characterization of those factors are obtained. In addition, it allows the identification of what and in which way and magnitude they contribute to the issue in question. The geological and geotechnical characteristics of the material, a high plasticity residual clay soil, combine with the saturation of the soil, caused by heavy winter rains and the lack of evacuation of rainwater from the surrounding hills, whose runoffs are discharged on the slope studied. The vegetation, which contributes to stability, was removed in past years and it is still in the process of recovery/rejuvenation. The contact between the geological unit in motion and the underlying sandstone, as well as the presence of a fault located on its left flank, that separates it from a metamorphic unit, have facilitated the process, acting as surfaces of rupture. The combination of factors results in a high hazard of a potential disaster. The main mitigation procedures proposed are the channelling of surface rainwater runoff, as well as the maintenance of a dense vegetation cover. Likewise, a constant monitoring of the landslide is recommended, in order to prevent the occurrence of a disaster.

KEYWORDS: Slope stability; Conceptual Model; Landslide.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE,
<mailto:carias@ing.ucsc.cl>

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE,
<mailto:rking@ucsc.cl>

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE,
<mailto:jmontenegro@ucsc.cl>

1. INTRODUCCIÓN

Los movimientos en masa, término referido a aquellos movimientos a favor de la gravedad de una masa de terreno (Cruden, 1991), son uno de los fenómenos naturales de formación del terreno más comunes, así como uno de los más desastrosos para el ser humano (Gutiérrez Elorza, 2008). Como procesos geológicos naturales, producto de la combinación de factores de diverso tipo (Cruden & Varnes, 1996), los movimientos en masa son en su mayoría inevitables, pero fácilmente previsible con un adecuado estudio de ingeniería geológica. No obstante, su estudio ha sido limitado, y la consideración de parte de la población y las autoridades competentes suele ser nula hasta que se produce una desgracia. Como desastres naturales, los movimientos en masa suelen ser responsables de cuantiosas pérdidas económicas, así como de vidas humanas. Esto se puede observar a menudo en nuestro país, geológicamente activo y variado, y con un relieve abundante en laderas; el último evento de este tipo, ocurrido sólo en el reciente mes de diciembre de 2017, en la comuna de Chaitén, ha provocado una quincena de fallecidos, varios desaparecidos y la destrucción de una aldea.

Por sus características geológicas, morfológicas y demográficas, la zona del Gran Concepción posee un historial considerable de movimientos en masa con perjuicio a la población (Naranjo et al., 2005; Naranjo et al., 2006; Sernageomin, 2010; Sernageomin 2015). Esto es causado principalmente por la ocupación de las laderas para fines habitacionales, con poca consideración o conocimiento de riesgos geológicos. A menudo se lleva a los factores condicionantes al borde del equilibrio: sobrecarga de laderas, cortes al pie de estas, deforestación, bloqueo de redes de drenaje, entre otros (Naranjo et al., 2005; Naranjo et al., 2006; Sernageomin, 2010). Así mismo, las vías interurbanas, que unen Concepción con Arauco (Ruta CH-160) y con la Ruta 5 sur (CH-152 “De la madera”, CH-156 “Del Itata”, CH-146 “Cabrero”) presentan con frecuencia remociones, debido a la necesidad de excavar taludes para su construcción (EULA, 2010; Pradenas, 2014). En la ruta colindante al área de estudio se han registrado eventos de magnitud considerable (Naranjo & Ramírez, 2006). Los principales factores desencadenantes de remociones en masa han sido las precipitaciones y los sismos. Eventos importantes de ambos tipos han sido las lluvias torrenciales de junio de 2005 y julio de 2006, y el terremoto de febrero de 2010 (Naranjo et al., 2005; Naranjo et al., 2006; Sernageomin, 2010) siendo el más común e inmediato las precipitaciones. Cabe destacar que la mayoría de los eventos se registran en zonas pobladas, con influencia determinante del factor antrópico.

Como parte de la construcción de la Ruta CH-160, bajo concesión a la empresa Acciona S.A., iniciados en 2010, se realizó el corte del talud ubicado en el PK 28+400, al costado NE de la calzada. Posteriormente, el terreno se comenzó a ver sobresaturado de agua, en especial luego de las lluvias, lo cual ha desencadenado desde entonces, durante las temporadas invernales, remociones en masa que cubren de material la ruta, interrumpiendo el tránsito normal de vehículos. Estas pequeñas manifestaciones son producto del lento pero progresivo movimiento de una masa, con una forma vista en planta que recuerda a una lengua, de aproximadamente 175 metros de largo y 50 de ancho y dirección NE-SW, que repta en el sentido de la pendiente, esto es, al SW. Este movimiento se ve acelerado en la época invernal, debido a la saturación que sufre el terreno por las lluvias de la estación. Cada temporada, desde el año 2014, la concesionaria ha retirado material del talud. Dicho año, incluso, se retiró el material hasta 5 metros desde el borde de la carretera, como se puede observar en la Figura 1 (a y b). No obstante, el terreno continúa avanzando de manera continua, alcanzando el presente año nuevamente el borde de la calzada, como se observa en la Figura 1 (c y d). Esto ha causado problemas a la concesionaria Acciona S.A. debido a que genera presión sobre la cuneta y la calzada, llevando a que aquella se fracture y se monte sobre la última (Figura 2). Los días 9 y 10 de noviembre se realizaron nuevos trabajos de despeje, observados en directo (Figura 3) por la coincidencia del segundo de aquellos días con una visita a terreno de este estudio. En estos trabajos se retiraron alrededor de 24 camiones cargados con material extraído del talud, según información entregada en conversación con ingeniero civil en terreno, equivalente a entre 600 m³ y 800 m³. El año 2016 la concesionaria realizó una serie de estudios de ingeniería civil con la finalidad de encontrar el origen de este fenómeno y proponer medidas para solucionarlo. Estas prospecciones otorgaron una caracterización geotécnica del talud que será abordada en el presente estudio.



Figura 1: Evolución del pie del talud: **a.** Enero de 2014, la masa alcanza de la calzada; **b.** Febrero de 2015, luego de que se retire material hasta 5 m cerro arriba en la temporada invernal anterior; **c.** Octubre de 2015, el talud ha avanzado aproximadamente la mitad de la distancia retirada; **d.** Marzo de 2017, la masa nuevamente alcanza la calzada, superando, al parecer, su ubicación en 2014. Modificado de Google Earth



Figura 2: Daño causado sobre la cuneta y la calzada de la Ruta CH-160. Fotografías tomadas en octubre de 2017, antes del último retiro de material.



Figura 3: Retiro de material, 10 de noviembre de 2017. En rojo, perfil aproximado del talud antes de retirado el material.

El talud estudiado se encuentra al norte de la Comuna de Lota, en las cercanías del límite comunal de Coronel, al costado NE de la Ruta CH-160, próxima al ingreso norte del By Pass Lota, coordenadas 18H 665595 m E 5895487 m S (Figura 4). El talud forma parte de un cerro, cortado para la construcción de la carretera, rodeado a su vez por cerros de mayor altura. Estos terrenos son de propiedad privada, y su uso está destinado a plantaciones forestales de eucalipto. El acceso al área de estudio es posible a través de la misma carretera, a través de las pistas con sentido hacia el norte. Existen caminos de tierra en la parte alta de los cerros, pero son de acceso privado para uso forestal.

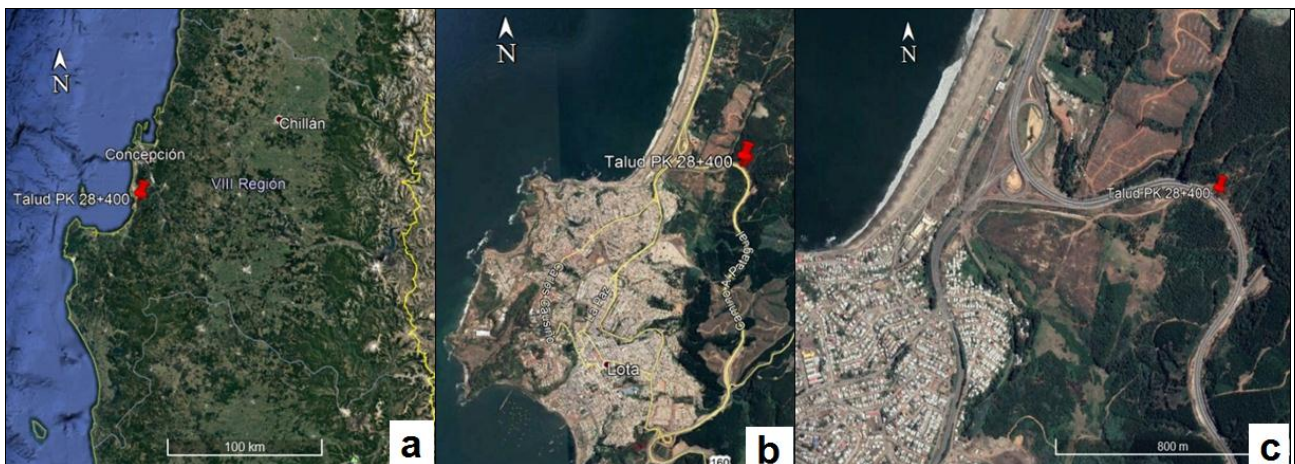


Figura 4: Ubicación del talud estudiado en: **a.** la región del Biobío; **b.** en la zona de la ciudad de Lota; **c.** en el extremo norte del by-pass de la Ruta CH-160. Modificado de Google Earth.

El objetivo principal de este estudio es realizar un modelo conceptual de este talud y la ladera contigua, para identificar y describir los factores que provocan el fenómeno. Para la consecución de esto se han de caracterizar los factores que contribuyen al proceso de remoción en masa en el talud estudiado, intentando identificar cuál o cuáles actúan como detonante del movimiento. Se propondrá también un cálculo de la masa involucrada en este movimiento. A partir de esto se intentará proponer medidas que contengan o detengan este fenómeno.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Movimientos en masa

2.1.1. Definición y Clasificación

Se define como un “movimiento en masa” -o “remoción en masa”- a todos aquellos movimientos a favor de la gravedad de una masa de roca, detritos o suelos (Cruden, 1991). Los movimientos en masa se originan de la combinación de diferentes factores condicionantes, que pueden ser de tipo geológico, geotécnico, morfológico, físico-químico, meteorológico, biológico o antrópico (Cruden & Varnes, 1996), que se desarrollan o se mantienen en estado de latencia, hasta que al menos uno de ellos actúa como gatillante o detonante del movimiento, siendo los más comunes, las precipitaciones intensas y los sismos (Wieczorek, 1996 *in* Mella *et al.*, 2010).

Las remociones en masa se clasifican de acuerdo al tipo de movimiento y al material involucrado, generándose así usualmente una denominación binominal para los eventos (Varnes, 1978, Cruden & Varnes, 1996). Los tipos de material distinguidos por Varnes (1978) corresponden a roca, detritos y tierra. Según el tipo de movimiento el mismo autor distingue caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y extensión lateral; se añaden los movimientos complejos o mixtos, por la combinación de dos o más de los anteriores (Cruden & Varnes, 1996).

2.1.2. Morfología

Varnes (1978) propuso una nomenclatura para las partes de un movimiento en masa, en base a la morfología que generalmente presentan estos fenómenos (Figura 5). Esta fue adoptada en su gran medida por la Comisión para Movimientos en Masa de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica –IAEG, por sus siglas en inglés–, a partir de la cual propuso un método para el cálculo estimativo de las dimensiones de un movimiento en masa (IAEG Commission on Landslides, 1990, *in* Cruden & Varnes, 1996), lo cual abordaremos más adelante. Cruden & Varnes (1996) también proponen una escala para la clasificación de la velocidad de un movimiento en masa, para una mejor descripción del fenómeno (Figura 6).

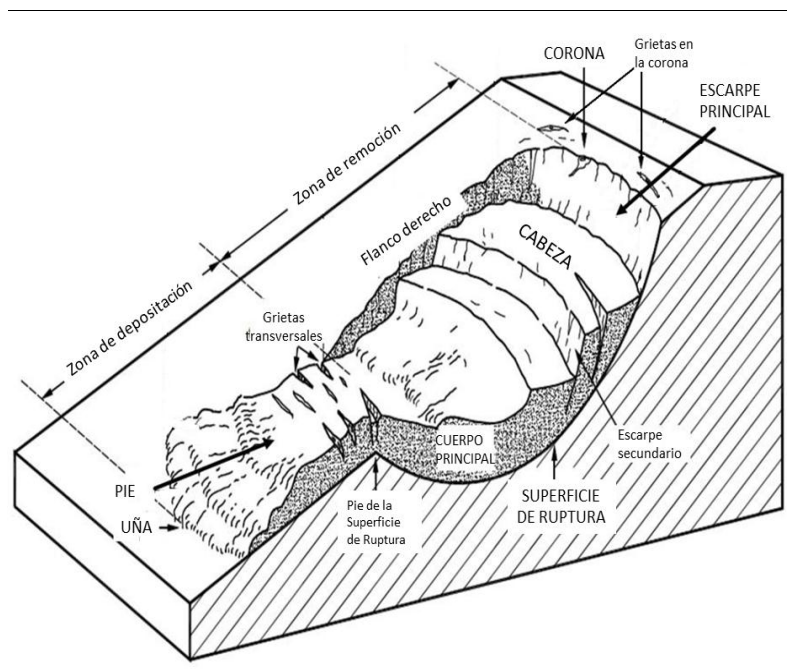


Figura 5: Partes de un deslizamiento (Editado de Cruden & Varnes, 1996).

Clase	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m / s
6	Muy rápido	5×10^1	3 m / min
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8 m / hr
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m / mes
3	Lento	5×10^{-5}	1.6 m / año
2	Muy lento	5×10^{-7}	16 mm / año
1	Extremadamente lento		

Figura 6: Clasificación de la velocidad de un movimiento en masa (Tomado de Cruden & Varnes, 1996).

2.1.3. Dimensiones del Movimiento

La Comisión para Movimientos de la IAEG propone un método para estimar el volumen de un movimiento en masa, en base a la morfología idealizada de este (IAEG Commission on Landslides, 1990, *in* Cruden & Varnes, 1996).

Para comenzar, IAEG (1990) define una serie de dimensiones que caracterizan el movimiento, basados en el diagrama idealizado de este. Estas dimensiones son mostradas sobre el diagrama idealizado en la Figura 7 y son explicados en la Tabla 1.

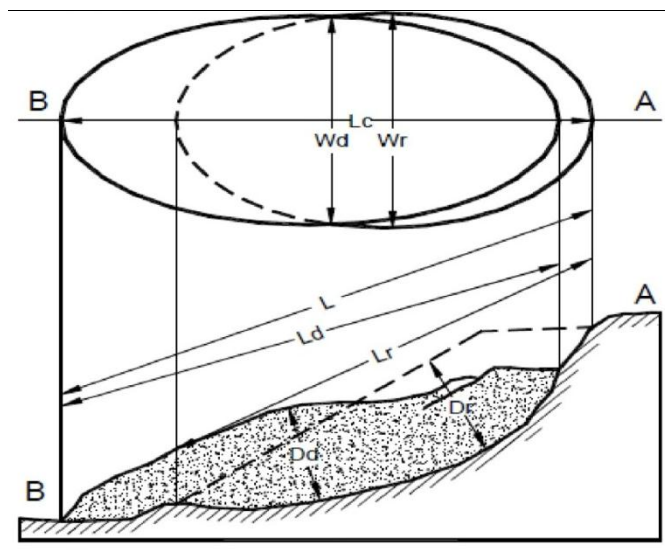


Figura 7: Esquema de las dimensiones de un deslizamiento (Cruden & Varnes, 1996)

Tabla 1: Descripción de la dimensiones de un movimiento en masa.

Símbolo	Descripción
W_d	Ancho de la masa desplazada, perpendicular a L_d .
W_r	Ancho de la superficie de ruptura, de flanco a flanco, perpendicular a L_r .
L_d	Longitud de la masa desplazada, distancia mínima entre uña y cabeza.
L_r	Longitud de la superficie de ruptura, distancia mínima entre el pie de la superficie de ruptura y la corona.
D_d	Profundidad máxima de masa desplazada, perpendicular al plano W_d - L_d .
D_r	Profundidad máxima de la superficie de ruptura, perpendicular al plano W_r - L_r .
L	Longitud total, de la uña a la corona.
L_c	Longitud de la línea central, es decir, de la línea desde la uña a la corona formada por la unión de los puntos medios entre los flancos del movimiento.

A partir de los parámetros D_r , W_r y L_r , se asume para la masa removida una forma elipsoidal. A partir de la fórmula de cálculo del volumen de un elipsoide, IAEG (1990) obtiene la Ecuación (1) para obtener el volumen estimado VOL_{ls} de la masa removida.

$$VOL_{ls} = \frac{1}{6} \pi \cdot D_r \cdot W_r \cdot L_r \quad (1)$$

Luego, es posible estimar, con este volumen, el peso (W) de esta masa, según la Ecuación (2), donde γ corresponde al peso específico.

$$W = VOL_{ls} \cdot \gamma \quad (2)$$

2.2. Modelo Conceptual

Un modelo conceptual para un movimiento en masa consiste en un análisis descriptivo de una serie de factores condicionantes que contribuyen a la ocurrencia del movimiento. 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.

El primer aspecto a considerar es la geología de la masa que se quiere estudiar, esto es, su litología y geoquímica, su edad y comportamiento, el grado de meteorización y la estratigrafía, información que permite entender y predecir el comportamiento del movimiento. Se deben identificar las estructuras presentes, discontinuidades, fallas, contactos y otros elementos que generan las debilidades que originan el movimiento. De la misma manera, se debe incluir la descripción geomorfológica, principalmente la topografía de la ladera o talud, así como las redes de drenaje por las cuales el agua se distribuye. Conocer todos estos aspectos geológicos es elemental para la comprensión del resto de información.

El modelo debe considerar las características geotécnicas, profundamente relacionadas con las geológicas. La granulometría, humedad, permeabilidad, plasticidad, entre otras, son importantes factores que condicionan el ritmo y la tipología del movimiento. El nivel freático también ha de ser considerado, pues el peso que agrega al suelo la humedad es determinante en la generación del movimiento, influyendo en su tipo, velocidad y desencadenamiento.

Otros factores, aunque no de un rol protagónico, contribuyen considerablemente en los que se mencionan antes. La meteorología, principalmente los regímenes de precipitación, determinan la saturación del suelo, acelerando la meteorización y otorgando peso a la masa, mientras que los cambios de temperatura, sobre todo aquellos que suben y bajan de los 0°C, ayudan a la formación de grietas. La vegetación es un factor que contribuye enormemente a la estabilización de laderas y taludes, cuando no actúa como sobre peso; sus raíces cohesionan el suelo, además de reducir la humedad, al absorberla del terreno y evitar que el terreno absorba el agua lluvia.

Es de suma importancia la elaboración de un modelo conceptual como primer estudio de ingeniería geológica a la hora de trabajar un talud o ladera debido a la naturaleza de los movimientos en masa, que son producto de una la combinación de estos factores, actuando de manera continua pero a la vez cambiante, de manera que lo que hoy parece estable, puede cambiar de situación en cuestión de días. Una vez ejecutado el modelo conceptual, se puede abordar el análisis determinístico o cálculo del factor de seguridad, teniendo en cuenta las restricciones que el modelo conceptual agrega. De lo contrario, se pueden obtener cifras engañosas, o que representan sólo un momento favorable de una masa de características cambiantes.

3. METODOLOGÍA

3.1. Investigación bibliográfica

La investigación bibliográfica incluye la revisión de mapas geológicos, especialmente los de Ferraris (1981) y Mendoza (2001), el mapa de riesgos de remoción en masa para la comuna de Lota, realizados por Mella *et al.* (2010) para el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), e imágenes satelitales del sector, obtenidas del software Google Earth. Se revisó literatura especializada en movimiento en masa, especialmente la contribución de Cruden & Varnes (1996), así como información de inventario de eventos de este tipo, obtenida de informes inéditos de Sernageomin (Naranjo *et al.*, 2005; Naranjo *et al.*, 2006; Sernageomin, 2010; Sernageomin 2015). Se indagó igualmente información de registro acerca de las características meteorológicas del sector, obtenidas de la plataforma *on-line* del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (2017).

Se tuvo acceso, por gentileza de la concesionaria Acciona S.A., a cargo de la autopista, a los estudios realizados el talud estudiado (Geoservice, 2016, Geo Soil Drill, 2016, Paine, 2016), como parte de la investigación solicitada por la concesionaria a Geoservice Ltda. en busca de una solución al problema del talud del PK 28+400, incluyeron una serie de prospecciones en base a las cuales se caracterizó geotécnicamente el terreno estudiado. El tipo y cantidad de prospecciones de campo y ensayos de laboratorio fueron definidos en conjunto por ambas empresas, en concordancia con las características del terreno y con lo que se deseaba obtener del estudio.

Los estudios consistieron en la perforación de 1 sondaje geotécnico, excavación de 5 calicatas de reconocimiento, ensayos geofísicos distribuidos en 2 perfiles basados en la medición de las velocidades de ondas de corte, Vs y 7 ensayos de penetración dinámicos portátiles tipo PANDA (Geoservice, 2016). El sondaje realizado alcanzó una profundidad de 7,5 m, e incluyó extracción de muestras y ejecución de ensayo de penetración estándar (SPT, por sus siglas en inglés). El Ensayo de Penetración Dinámica Tipo PANDA consiste en hincar un tren de barras con una punta de 2 a 4 cm² de superficie, conectado a un sistema que va registrando en un microprocesador para cada golpe la resistencia por punta qd (MPa) y la penetración de manera continua (Geoservice, 2016). Fue utilizado en este caso para conocer el grado de compacidad, nivel de resistencia de los suelos presentes y sus espesores (Geoservice, 2016). Desde cada una de las cinco calicatas realizadas, se extrajeron dos muestras, de diferentes profundidades, las cuales fueron sometidas a ensayos de laboratorio para su clasificación (granulometrías, límites de consistencia, peso específico y humedad natural). Los ensayos geofísicos sísmicos fueron realizados por el método ReMi, en dos tendidos de 60 metros de largo (Paine, 2016). Adicionalmente se extrajeron muestras representativas de los materiales detectados desde las calicatas de prospección y sondajes perforados para someterlas a ensayos de clasificación en laboratorio. A partir de estos estudios, Geoservice (2016) elabora una caracterización geotécnica, definiendo tres unidades de suelo.

3.2. Investigación en terreno

El trabajo en terreno consistió en la inspección de la morfología del terreno, verificación de la información obtenida de los mapas e informes revisados, en cuanto a las características geológicas y geotécnicas de la masa en movimiento, observación de medidas de mitigación tomadas por la concesionaria.

Se realizaron, también en terreno, dos perfiles geofísicos, mediante la combinación de métodos sísmicos pasivos y activos. El perfil A-A', de 115 m de largo, se ubica a partir del pie del talud, paralelo al eje

principal del movimiento, mientras que el perfil B-B', de 80,5 m, se posicionó paralelo a la carretera, perpendicular al perfil A-A', cortándolo aproximadamente en su mitad (Figura 8). Para el análisis pasivo, se aprovechan las vibraciones naturales del entorno, mientras que para el activo se dan golpes con una maza en tres o más puntos del tendido.

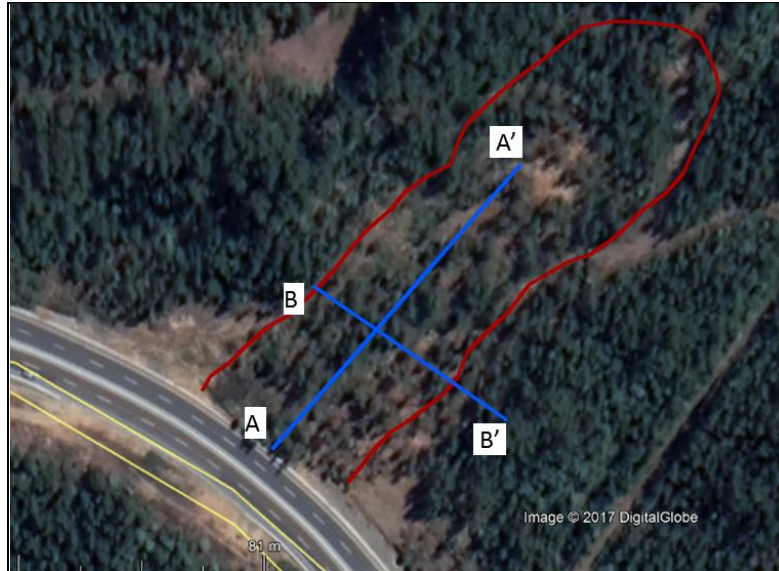


Figura 8: Tendido de los perfiles geofísicos (en azul) sobre la masa removida (en rojo). Modificado de Google Earth.

3.3. Trabajo en software

El análisis computacional parte por la observación de imágenes satelitales y ubicación sobre estas de puntos de interés y rutas de exploración, mediante el software Google Earth; en el mismo se pueden obtener datos como la pendiente de superficies o las coordenadas y altimetría de un punto. El programa ArcGIS otorga herramientas para la edición de mapas, así como para la obtención de curvas de nivel y otros modelos topográficos. Para el tratamiento de los datos del ensayo sísmico se utilizan los software proveídos por SeisImager, ejecutados con la asesoría de uno de ellos, Surface Wave Analysis Wizard; con esto es posible generar un perfil unidimensional de la velocidad de onda de corte (V_s) en función de la profundidad, que permite distinguir las distintas unidades del subsuelo.

4. RESULTADOS

4.1. Clasificación del movimiento

El fenómeno observado puede ser catalogado según los criterios de Cruden & Varnes (1996). Según el tipo de movimiento involucrado, por su aspecto en superficie, la masa en remoción responde a las características de un deslizamiento, observándose los elementos típicos descritos por Cruden & Varnes (1996) (Figura 5).

El tipo de material involucrado en el movimiento corresponde a una masa de suelo residual, resultante de la meteorización de roca sedimentaria, que al movilizarse, la mayoría de las veces se encuentra saturado de agua, por lo cual el material puede ser descrito como suelo o barro, según el caso.

Por la velocidad con que el material se desplaza, según la escala propuesta por los mismos autores (Figura 6), si se considera el avance de 5 metros entre 2014 y 2017 (3 años), nos da una velocidad promedio de 1,7 m/año, apenas sobre el límite entre la clase 2 (muy lento) y 3 (lento). No obstante, ha de agregarse que el movimiento del material se ve acelerado en la época invernal, debido a la saturación del terreno, mientras que en verano es casi nulo.

Sumado a lo anterior, como consecuencia del movimiento principal, se observa evidencia de la ocurrencia de deslizamientos rotacionales, flujos y caídas de menor escala, tanto en el pie del talud, como en la superficie de la masa en movimiento.

Considerando las características anteriormente descritas, el movimiento puede ser catalogado como un “deslizamiento traslacional complejo de suelo y barro, tipo reptación (*creep*) (muy lento)”.

La Figura 9 muestra un esquema realizado por Cruden & Varnes (1996) de un deslizamiento traslacional complejo de características similares a las del caso estudiado. Se muestra arcilla (en inglés *clay*) como material del movimiento, la cual se desliza por una superficie (*slip surface*) de debilidad. En la cabeza (*head*) del deslizamiento, se genera una zona de graben, producto de un componente rotacional en la masa en movimiento, tras el cual se reconoce el escarpe principal (*main scarp*). Al pie se forma una cresta de presión (*pressure ridge*), que explicaría el daño causado a la cuneta y al pavimento de la ruta al pie del talud.

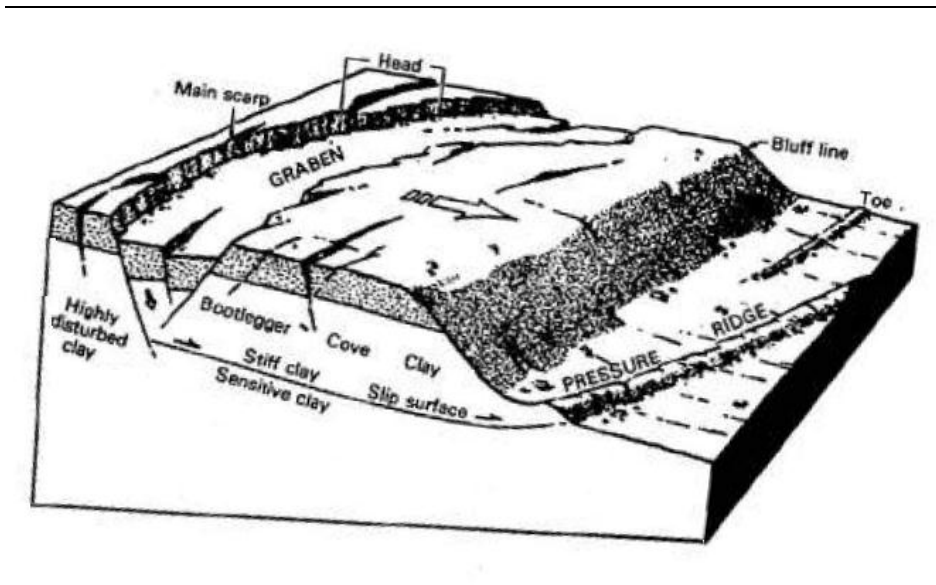


Figura 9: Deslizamiento traslacional, de características similares a las del caso estudiado (Cruden & Varnes, 1996).

4.2. Modelo Conceptual

4.2.1. Características geológicas

Las ciudades de Lota y Coronel se asientan sobre una planicie marina, caracterizada por depósitos sedimentarios no consolidados de origen fluvio-marino y fluvial (Mella et al., 2010), que se ve interrumpida y rodeada por cerros de altura variable conformados por rocas de la Formación Curanilahue y del Basamento Metamórfico (Mella et al., 2010). Además, en esta investigación se identificaron en terreno indicios de la presencia de la Formación Quiriquina. El Basamento Metamórfico, unidad paleozoica característica de la región costera centro-sur de Chile (Mella et al., 2010), fue definido por Aguirre et al. (1972), distinguiendo dos series: Occidental y Oriental. La Serie Oriental aflora en la zona de Lota, conformada de esquistos, filitas y metaareniscas (Ferraris, 1981, Mendoza, 2001). La fuerte meteorización que afecta a los esquistos pelíticos ha permitido el desarrollo de suelos arcillosos de color café-rojizo, que en promedio alcanza los 2 m de espesor (Mella et al., 2010). La Formación Quiriquina, de edad cretácica superior, definida por Muñoz-Cristi (1946), está constituida de areniscas finas, medias y conglomerádicas y arcillolitas marinas, de color amarillo y verde. Sobreyace al Basamento Metamórfico en discordancia angular y de erosión (Ferraris, 1981). La Formación Curanilahue, definida por Muñoz-Cristi (1946), presenta facies continentales y marinas, de edad eocena (Ferraris, 1981). Posee una potencia estimada de 500 m y está constituida por arcillolitas, areniscas y conglomerados que se intercalan con mantos centimétricos de carbón. La fuerte meteorización que afecta a

estas rocas ha permitido el desarrollo de suelo, en parte arcilloso, que puede alcanzar entre 1 y 2 m de espesor. En el área de Lota, se observa que esta unidad sobreyace con contacto discordante a esquistos micáceos del Basamento Metamórfico (Mella et al., 2010).

El área de estudio se encuentra en su mayoría cubierta por depósitos sedimentarios de limo y arena arcillosa, de grano fino y color marrón rojizo, que por su granulometría y por los antecedentes de mapas anteriores (Ferraris, 1981; Mendoza, 2001), se atribuyen a la meteorización de la Formación Curanilahue. Se ha detectado en las visitas a terreno, un estrato arcilloso, color gris pálido, cercano al suelo en el pie del talud, que quedó expuesto luego de los últimos trabajos efectuados por la concesionaria. También se observó cerca de la corona un estrato de arcilla de color marrón pálido, con clastos redondeados de cuarzo. Las características de ambos coinciden con las de la Formación Curanilahue, por lo que se asume son subunidades de la misma, con estado de meteorización menos avanzado que el resto de la masa en movimiento.

Las prospecciones realizadas por Geoservice (2016) detectaron a una profundidad entre 4 y 6 metros un estrato de arenisca gris, atribuible a la Formación Quiriquina.

En el extremo suroriental del talud, afloran los esquistos del Basamento Metamórfico, que se presentan altamente diaclasados y con una meteorización moderada, provocando que con facilidad se suelten detritos. Un mapa de las características mencionadas se presenta en la Figura 10.

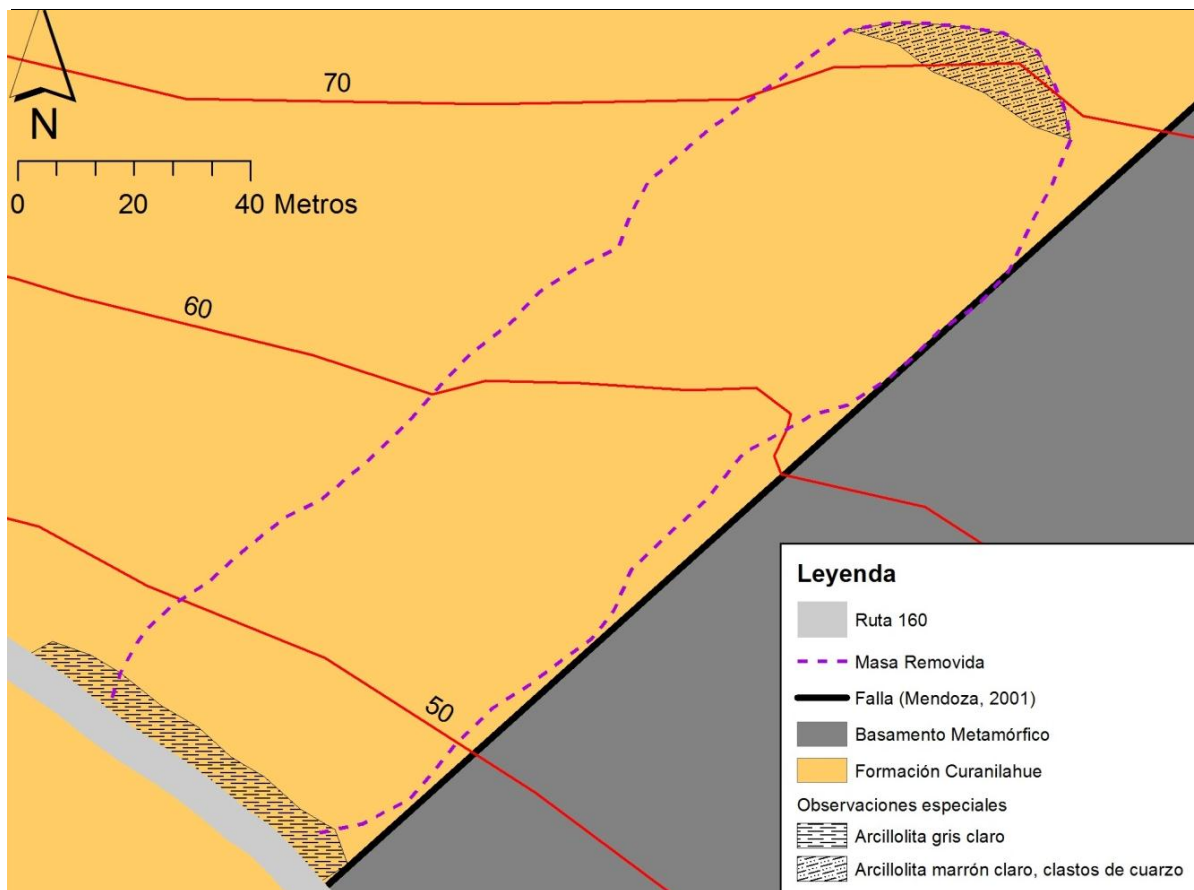


Figura 10: Mapa geológico del área de estudio. Elaborado en base a Ferraris (1981), Mendoza (2001) y observaciones propias.

4.2.2. Geología estructural

Ferraris (1981) y Mendoza (2001) ubican en el área de estudio una falla de dirección aproximada NE-SW, sin indicar claramente de qué clase de falla se trata. Esta coincidiría aproximadamente con el borde SE de la masa en remoción; más aún, se puede observar en imágenes satelitales (Figura 11) que en esta zona se dan los primeros rastros del movimiento. En terreno pudo observarse el contacto entre la unidad geológica que conforma la masa removida y las rocas del Basamento Metamórfico. Por ello se infiere que este contacto

marca la presencia de la falla, con un bloque ascendente conformado de roca metamórfica, y un bloque descendente en el cual se ubicaría la masa removida.

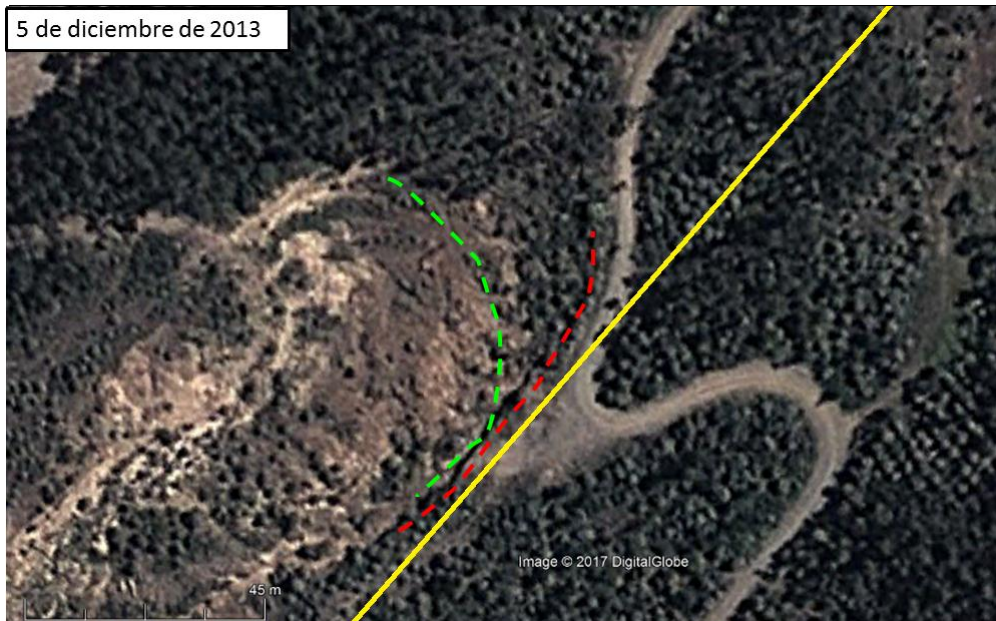


Figura 11: En línea punteada de verde y rojo, primeros indicios de movimiento en la corona. En línea continua de amarillo, trazado teórico de la falla (Ferraris, 1981, Mendoza, 2001). Modificado de Google Earth.

La Formación Curanilahue aflora en el área de estudio, subyaciendo a esta una arenisca gris atribuida a la Formación Quiriquina. El contacto de estas es de tipo concordante (Ferraris, 1981). Los perfiles geofísicos (Figuras 12 y 13), realizados en busca de observar este contacto, exhiben cierta anomalía, puesto que, aunque se detecta la variación de estrato esperada alrededor de los 6 m de profundidad, esta consiste en una baja de la velocidad V_s , cuando habría de ser un aumento; la causa de esta anomalía podría deberse a la presencia de agua, condición que reduce considerablemente dicha velocidad. No obstante, la diferencia de estrato da luces acerca del contacto entre la Formación Curanilahue, y la Formación Quiriquina, hipótesis reafirmada por los análisis de Geoservice (2016). Este contacto, buzando –según se calcula de los perfiles– entre 7° y 21° hacia la carretera, ha sido identificado como la más posible superficie de falla, sobre la cual repta la masa en movimiento.

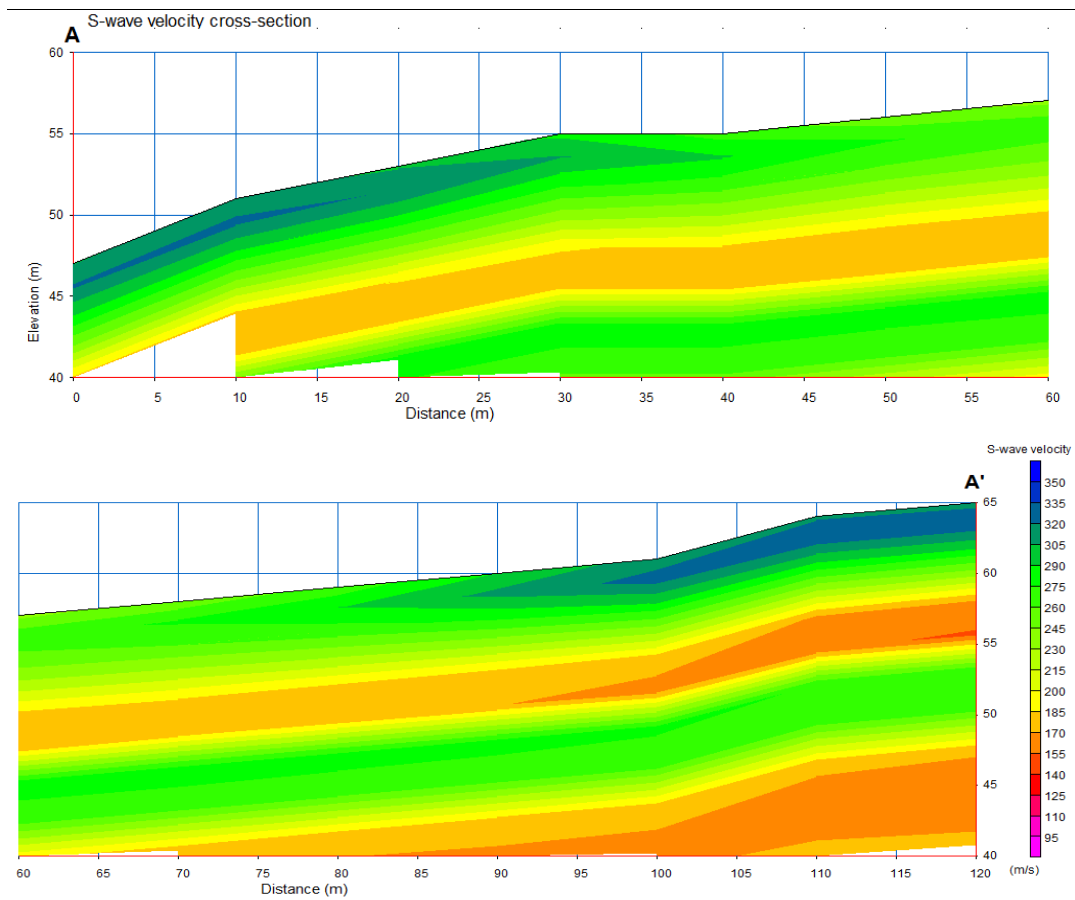


Figura 12: Perfil geofísico sísmico A-A'. Se observa, en distintos colores, la variación de velocidad de onda S en la profundidad, de lo cual se infieren los distintos estratos del subsuelo. Elaboración propia.

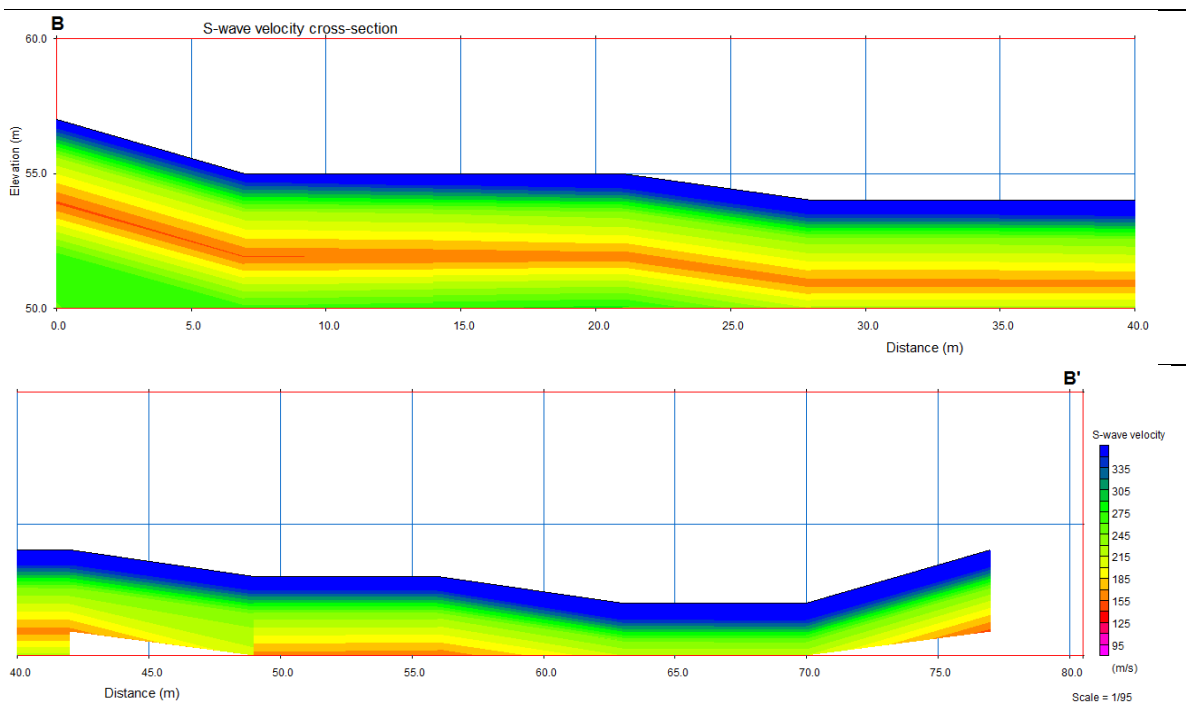


Figura 13: Perfil geofísico sísmico B-B'. Se observa, en distintos colores, la variación de velocidad de onda S en la profundidad, de lo cual se infieren los distintos estratos del subsuelo. Elaboración propia.

4.2.3. Geomorfología

La topografía del área estudio se compone de cerros y quebradas, como es típico de la zona de la Cordillera de la Costa. El talud estudiado y la masa en movimiento forman parte de una ladera que buza hacia el SW con pendiente promedio, medida en Google Earth, de $7,5^\circ$. La altitud en la corona es de 70 m s.n.m., mientras que la carretera junto pie alcanza los 47 m s.n.m. En el flanco derecho (NW) del movimiento y detrás (NE) de la corona, se eleva un cerro de mayor altitud (>100 m s.n.m. en sus cimas) cuyas laderas caen hacia el área de la remoción, con pendientes entre 9° y 11° , mientras que en el flanco izquierdo (SE) se baja una ladera paralela a la removida, con pendiente casi idéntica, que se diferencia de ella principalmente en lo geológico. La Figura 14 muestra un modelo de Red Irregular de Triángulos (*TIN*, por sus siglas en inglés) de un sector más amplio, en el cual se pueden observar las pendientes que rodean el área de estudio.

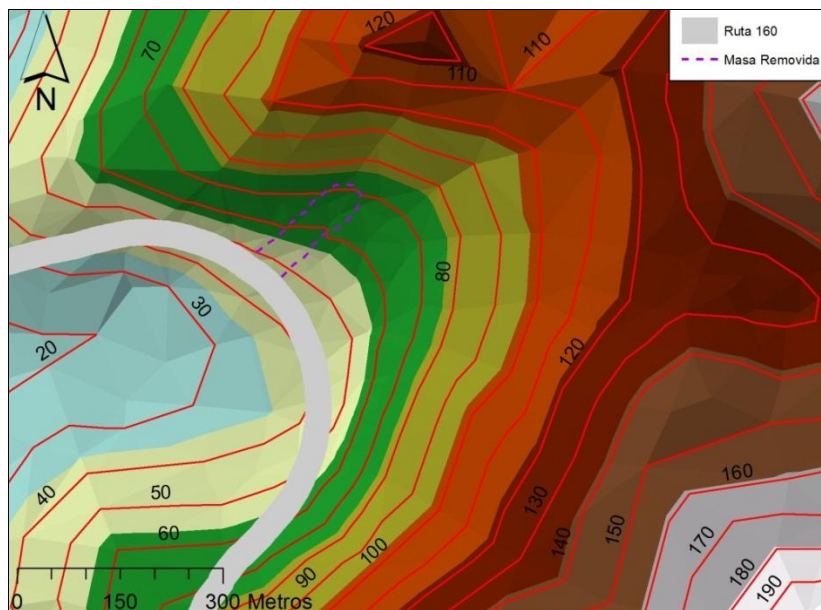


Figura 14: Modelo de red irregular de triángulos (*TIN*) del sector que rodea al área de estudio. Elaboración propia, en base a altimetría de Google Earth y mediciones en terreno con GPS.

En el mapa topográfico de la Figura 15 puede observarse la caída de altitud en el terreno que se encuentra en movimiento. Esta se hace más notoria en la mitad superior, lo cual afirma la similitud del caso en estudio con el esquema de Cruden & Varnes (1996) mencionado con anterioridad, que se muestra en la Figura 9.

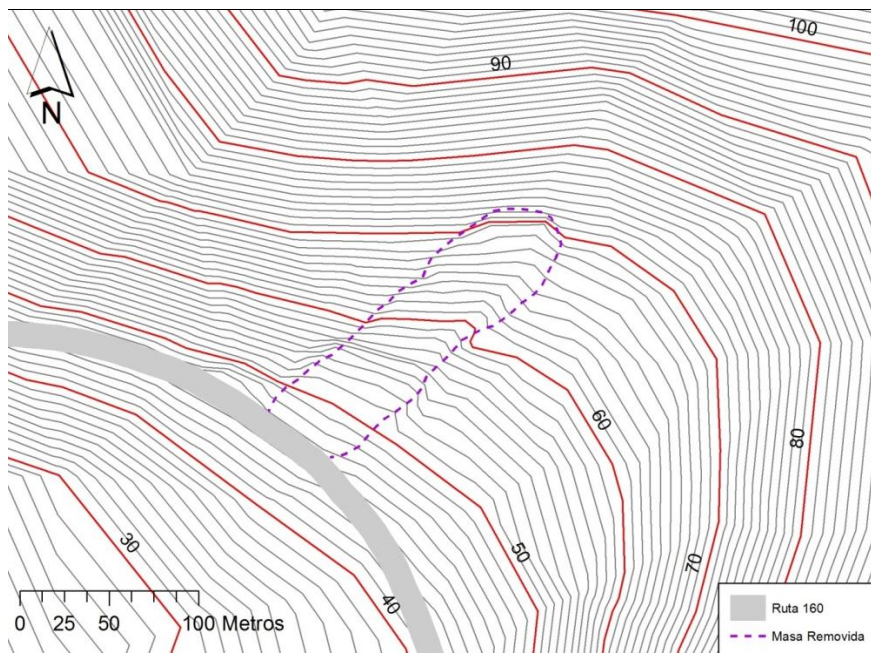


Figura 15: Mapa topográfico del área de estudio. Elaboración propia, en base a altimetría de Google Earth y mediciones en terreno con GPS.

Por el área de estudio escurren de manera ocasional aguas de origen pluvial desde los cerros más altos que la rodean. Cercano al flanco izquierdo (SE) de la masa en movimiento corre en días posteriores a lluvias prolongadas, una pequeña vertiente que forma su lecho a través de un camino de uso forestal (Figura 16). Así mismo, cerro arriba, dicho camino conecta con otro, estabilizado con ripio, que también conduce agua lluvia ladera abajo; éste hace una curva cerca del extremo alto de la masa removida, lo que provoca la descarga de las mencionadas aguas en la corona, donde se infiltran contribuyendo a la saturación del terreno.

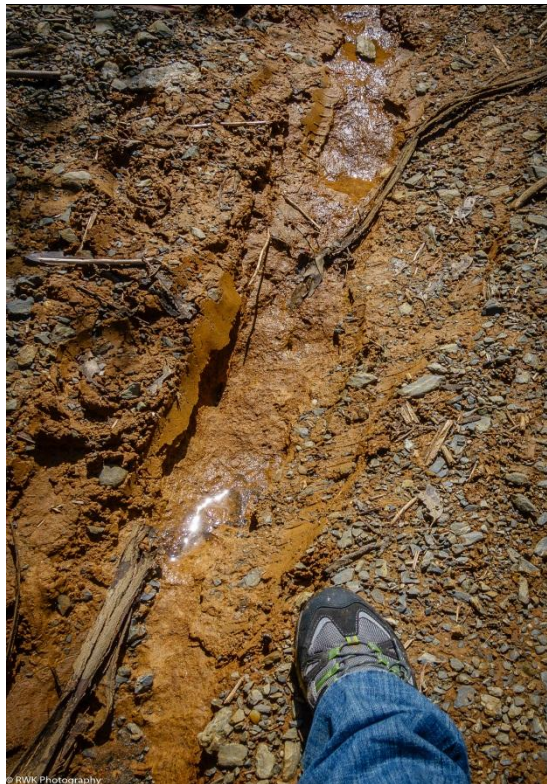


Figura 16: Pequeña vertiente, en lecho excavado por la misma agua, en camino forestal.

4.2.4. Características geotécnicas

Según los estudios de ingeniería elaborados como parte del proceso de construcción de la ruta, los suelos presentes en el sector corresponden preferentemente a materiales finos limosos y arcillosos de plasticidad media a alta con altos niveles de humedad y espesor variante entre los 5 m y 8 m, a los cuales subyace un estrato de arenisca (Geoservice, 2016). Los resultados del sondaje se traducen en la estratigrafía mostrada en la Tabla 2. Los resultados obtenidos del ensayo PANDA se muestran en la Figura 17. Se observa en general que los niveles de resistencia, a lo largo de la profundidad sometida al ensayo, no superan los 3 MPa, valor que se asocia a materiales de compacidad y resistencia baja (Geoservice, 2016), lo cual concuerda con la tipología de suelos detectados con el sondaje.

Tabla 2: Perfil estratigráfico sondaje (Geoservice, 2016).

Profundidad de a		Descripción
0,00	2,00	Arcilla limosa, color café claro, humedad alta, consistencia baja, plasticidad alta.
2,00	3,75	Limo arcilloso, color gris claro, humedad media, consistencia alta, plasticidad alta.
3,75	5,50	Arcilla arenosa, color café claro, humedad alta, consistencia media, plasticidad alta.
5,50	7,49	Arenisca, color gris claro, tamaño fino, humedad media, compacidad alta.

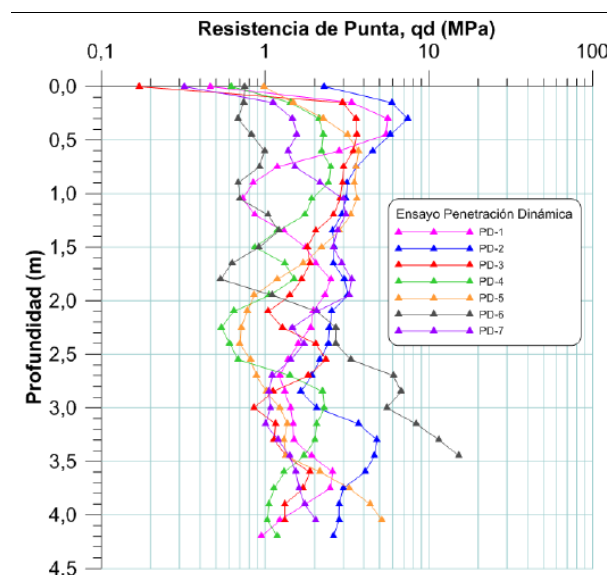


Figura 17: Resultados de ensayo PANDA (Geoservice, 2016).

En la Tabla 3, se muestran los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en las muestras extraídas. Se observa predominancia de limos, arcillas y arenas limosas; se observa también el límite líquido de las muestras, y como la humedad se encuentra cerca de este, superándola en dos casos; la plasticidad, no obstante, se muestra en general baja, a diferencia de los resultados de otros procedimientos.

Tabla 3: Resultado de ensayos geotécnicos (Geoservice, 2016)

ID.	CALI-CATA	PROFUN-DIDAD (m)	GRANULOMETRÍA			LÍMITE DE ATTERBERG		HUMEDAD NATURAL (%)	PESO ESPECIFICO (t/m ³)	CLASIFICACIÓN	
			GRAVAS %	ARENAS %	FINOS %	LL	IP			USCS	AASHTO
M-1	C-1	0,3 – 2,6	-	56	44	38	10	32,1	2,36	SM	A-4(2))
M-2		2,6 – 2,8	-	34	66	40	13	38,6	2,38	ML	A-6(8)
M-3	C-2	0,3 – 2,7	-	61	39	39	7	40,7	2,38	SM	A-4(0)
M-4		2,7 – 2,8	-	9	91	42	15	28,6	2,31	ML	A-7-6(16)
M-5	C-3	0,3 – 2,7	-	16	84	56	19	35,2	2,31	MH	A-7-5(20)
M-6		2,7 – 3,1	-	2	98	63	22	56,6	2,28	MH	A-7-5(30)
M-7	C-4	0,3 – 3,2	-	43	57	39	9	32,1	2,42	ML	A-4(4)
M-8		3,2 – 4,2	-	49	51	26	13	18,4	2,39	CL	A-6(3)
M-9	C-5	0,4 – 3,1	-	58	42	38	11	39,1	2,45	SM	A-6(2)
M-10		3,1 - 5,3	-	19	81	40	15	22,8	2,39	CL	A-6(13)

Producto de los perfiles geofísicos realizados se detectó el ya mencionado estrato de arenisca, a una profundidad de aproximadamente 6 metros (Figura 18). Estos resultados concuerdan con el sondaje, y apoyan la hipótesis interpretativa de los ensayos del mismo tipo realizados en este estudio.

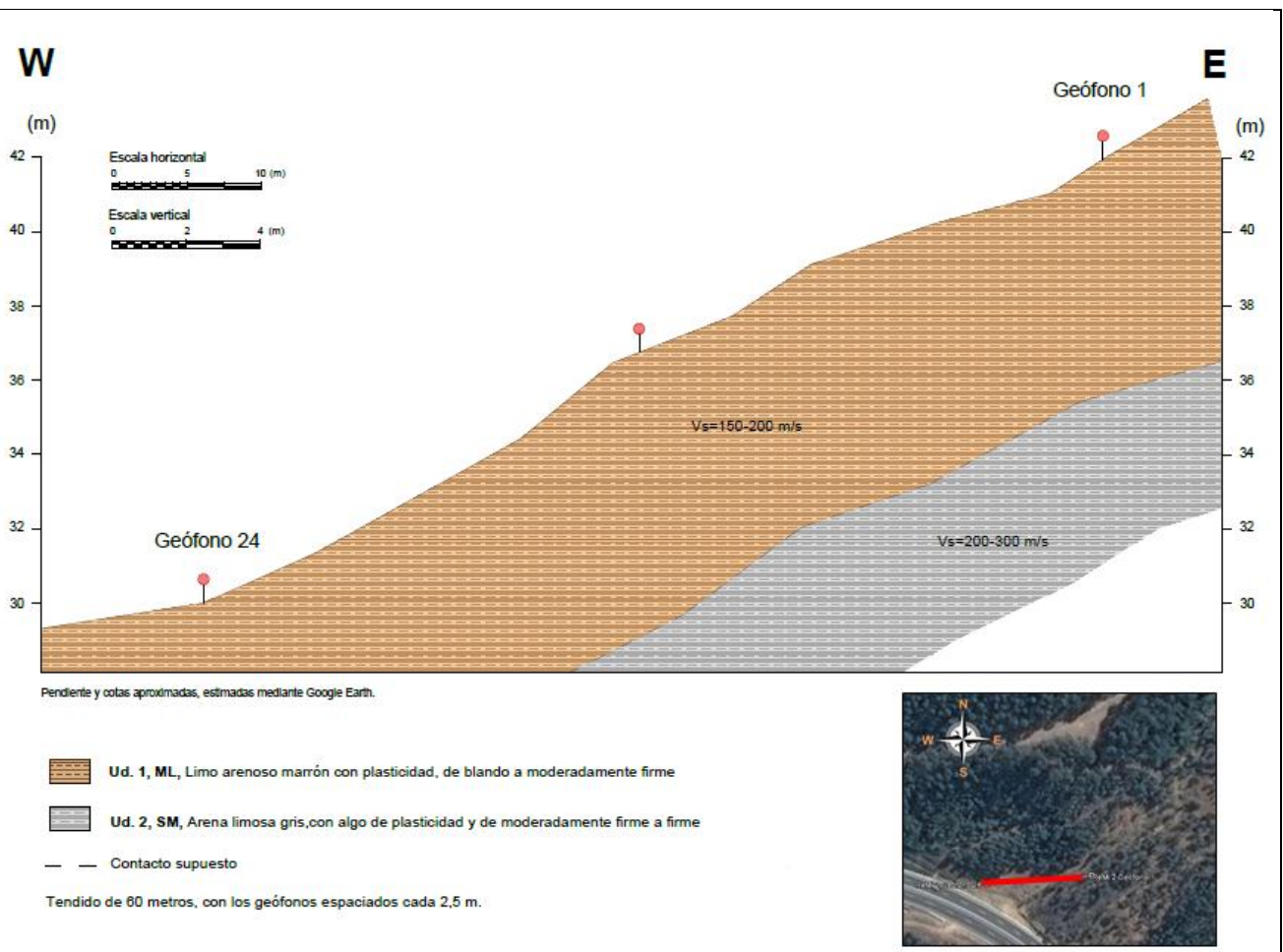


Figura 18: Perfil geofísico, método ReMi (Paine, 2016)

De acuerdo a los resultados obtenidos de las prospecciones realizadas, Geoservice (2016) define tres unidades geotécnicas en el suelo del talud estudiado. La más superficial, identificada como unidad U-1, consiste en cobertura vegetal con alta presencia de raíces y raicillas, con un espesor máximo de 20 cm. Bajo

la anterior se encuentra la unidad U-2, mezcla de arenas limosas, limos y arcillas de baja plasticidad con un alto contenido de humedad, baja compacidad y consistencia suave. Su espesor estimado varía de los 5,0 m en la parte más baja del talud (próxima a la calzada de la ruta) a los 8,0 m en la parte más alta. Por último, subyaciendo a U-2 se encuentra la unidad U-3, conformada de arenisca con presencia de partículas de mica y cuarzo, humedad media a alta y compacidad densa, y espesor indeterminado.

4.2.5. Nivel freático.

Las prospecciones realizadas por Geoservice (2016) no lograron detectar napa freática alguna. No obstante, en la fecha en que se realizaron estas, los días 7 y 8 de abril de 2016, no habían ocurrido precipitaciones en la última semana, y el acumulado de los 30 días anteriores no superaba los 5 mm, según los registros del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) (2017). En la primera de las visitas a terreno realizadas en el contexto de este estudio, el 6 de octubre de 2017, primer día sin precipitaciones luego de cinco días lluviosos –2, 4, 19, 21 y 8 mm– (INIA, 2017), se observó la gran saturación del suelo, habiendo incluso puntos en que el nivel freático alcanzaba la superficie (Figura 19).



Figura 19: Nivel freático alcanzando la superficie

Es importante notar un fenómeno observado al pie del talud en el mencionado primer terreno, la emanación de agua desde el subsuelo a través del pavimento de la carretera (Figura 20). Una hipótesis para explicar esto sería la presencia de una cuña de arcilla más compacta y con menor permeabilidad al pie del talud, como se observa en el perfil de la Figura 12, esta actuaría como “tapón” de las aguas de la napa freática, las cuales podrían escapar por fisuras del pavimento, como se esquematiza en la Figura 21. La determinación más detallada de este fenómeno sería materia interesante para estudios futuros.



Figura 20: Emanación de agua a través del pavimento de la Ruta CH-160, al pie del talud estudiado.

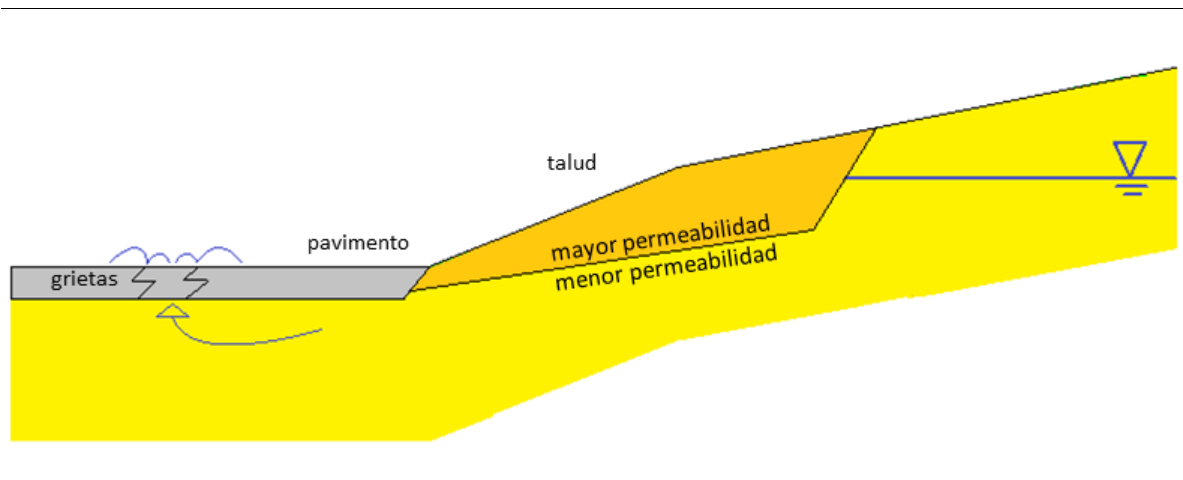


Figura 21: Esquema de posible explicación de la emanación de aguas en la carretera. Elaboración propia.

4.2.6. Factores meteorológicos

La zona del Gran Concepción presenta un dominio climático del tipo Mediterráneo, caracterizado por la alternancia de una estación invernal húmeda con lluvias moderadas y una estación estival cálida y seca, relativamente breve (Naranjo *et al.*, 2005). Las precipitaciones invernales se ven potenciadas por la orientación del relieve, siendo la Cordillera de la Costa un obstáculo para el avance de los frentes de mal tiempo hacia el oriente (Naranjo *et al.*, 2005). Por tanto, el área de estudio, ubicada en la vertiente occidental de la cordillera, recibe de frente la descarga de las precipitaciones.

La ocurrencia de períodos muy lluviosos en el Gran Concepción es un factor de movimientos de masa, con una precipitación superior a 80 mm y/o la acumulación en tres días consecutivos de 100 mm se saturan los suelos arcillosos facilitando su movimiento gravitacional (Mardones *et al.*, 1994). Son de consideración los eventos ocurridos en junio de 2005 y julio de 2006, que incluso provocaron la muerte de 5 y 11 personas,

respectivamente (Naranjo *et al.*, 2005; Naranjo *et al.*, 2006). Según registros históricos, la mayor concentración de precipitaciones se da entre mayo y agosto (Naranjo *et al.*, 2005).

Pradenas (2014) estudió la influencia del factor meteorológicos en taludes cortados en carreteras de la provincia de Concepción, en base a datos estadísticos de las rutas 152 (Autopista del Itata) y 156 (Ruta de la Madera). Propone un umbral de precipitaciones para generar remociones en taludes de carretera de 100 mm en menos de tres días. Sumado a esto, analiza el efecto de la lluvia acumulada en períodos mayores de tiempo, observando que la acumulación de 44 mm en un mes vuelve el terreno susceptible al movimiento (Pradenas, 2014). En la Ruta CH-160, se registró el 14 de agosto de 2006, luego de la acumulación de más de 60 mm en dos semanas, un evento considerable, combinación de al menos cuatro deslizamientos en cadena, convertidos en flujo, que causaron el colapso y destrucción de casi 50 m de la calzada, afortunadamente sin víctimas fatales.

En el área de estudio, las precipitaciones han jugado un papel clave en el movimiento, que se desarrolla de manera más acelerada durante el invierno, debido a la saturación del suelo (S. Mellado, comunicación personal). El gráfico de la Figura 22 muestra el registro de precipitaciones diarias de la estación pluviométrica de Coronel (665.452,71 m E 5.902.965,64 m S), ubicada 7,5 km al norte del área de estudio, durante los meses de mayor precipitación (mayo a agosto) de los últimos seis años. Puede observarse que las mediciones han superado más de una vez en el mes los 20 mm, lo cual concuerda con el umbral mensual propuesto por Pradenas (2014); asimismo, el año 2014 se dio una precipitación de casi 70 mm en un día, bastante cerca de valor umbral de 80 mm establecido por Mardones *et al.* (1994). También es de notar que el año 2014 se dieron los peaks más altos, así como la mayor cantidad de registros >10 mm y >20 mm; dicho año, como se explicó al comienzo, el avance de la masa fue crítico.

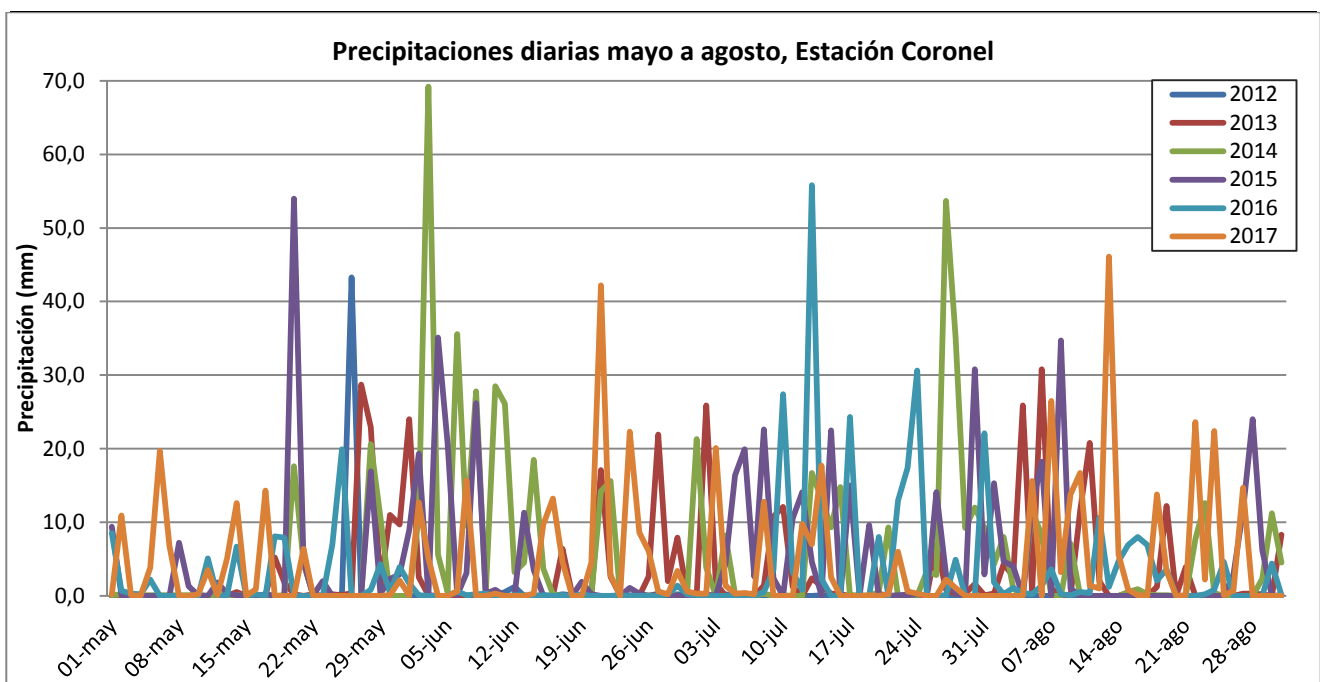


Figura 22: Precipitaciones diarias, del 1 de mayo al 31 de agosto, desde el año 2012 al 2017, registradas en la estación pluviométrica de Coronel. Elaborado en base a datos de INIA (2017).

4.2.7. Vegetación

El área de estudio corresponde a predios de uso forestal, plantados con eucaliptos (*Eucalyptus globulus*). Algunos de los árboles más jóvenes muestran señas ligeras del movimiento, observándose sus troncos levemente combados cerca de su pie. La vegetación menor consiste principalmente en helechos, espinos, zarzamoras y arbustos y pastos varios. Todo esto ayuda a evitar la saturación del suelo, interceptando y absorbiendo el agua que precipita en su follaje, así como extrayendo agua del suelo con sus raíces.

El efecto de la vegetación parece ser un factor importante en la estabilidad de la masa en movimiento. Según se observa en imágenes satelitales históricas de Google Earth, cuando comenzaban los trabajos para la

construcción de la Ruta CH-160, el área de estudio estaba cubierta por abundante vegetación forestal (Figura 23 a). El año 2012, la ladera es deforestada, luego de lo cual se observan los primeros indicios de movimiento (Figura 23 b), los cuales avanzan y se hacen más notorios al año siguiente (Figura 23 c). Durante el año 2014 (Figura 23 d y e), que, como se explicó con anterioridad, evidenció un avance importante del movimiento, la ruptura avanza más hacia arriba y aparece claramente el escarpe principal, así como la diferenciación entre la corona y la cabeza. Desde aquel año hasta el presente, la vegetación en la ladera vuelve a cubrir parcialmente el terreno, aunque no con la misma densidad que se observó al comienzo, mientras que la ruptura en la corona redujo la rapidez de su avance (Figura 23 f) aunque continúa en movimiento.

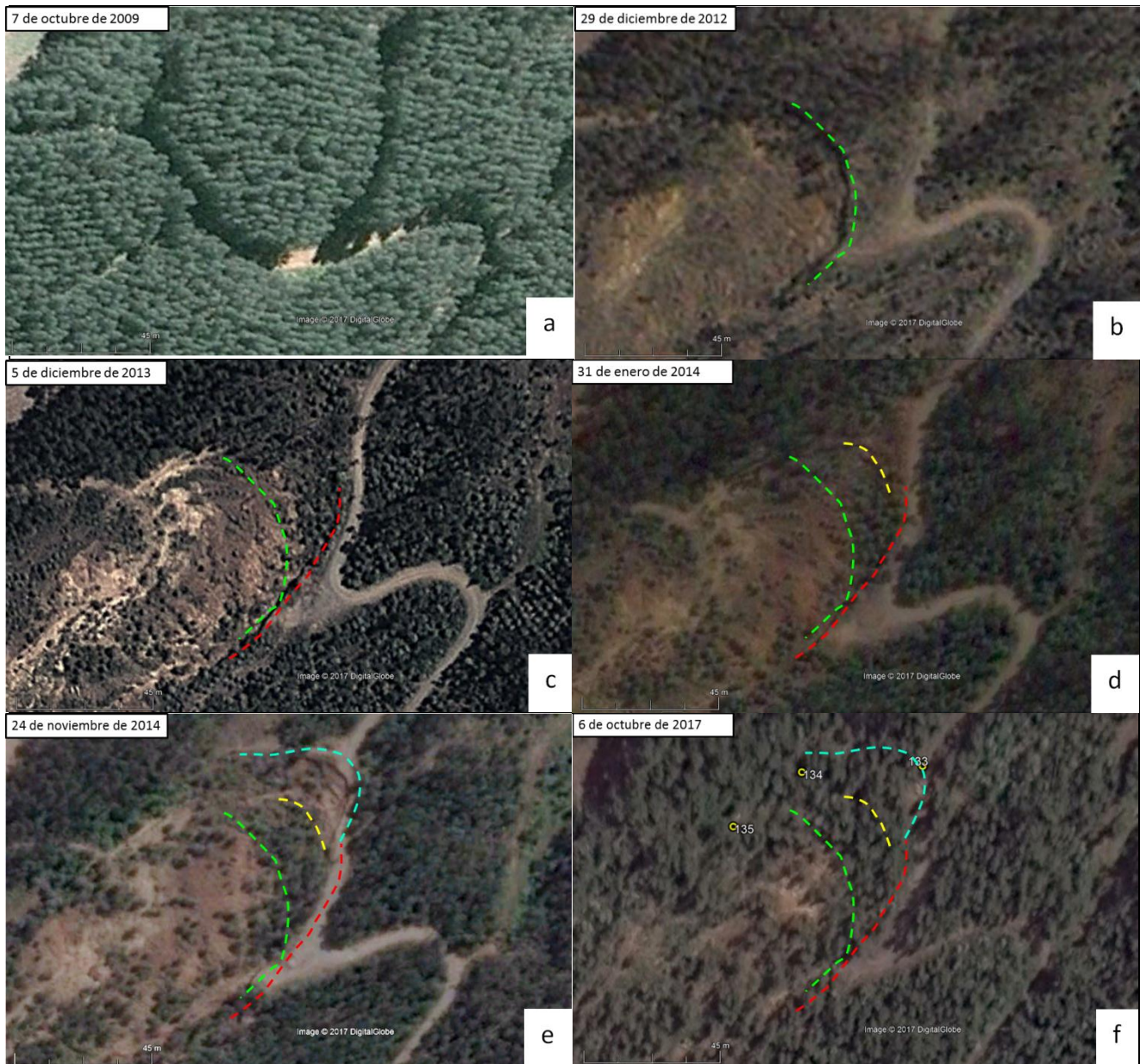


Figura 23: Evolución de la cabeza del movimiento y de la cobertura vegetal: **a.** octubre de 2009, antes del comienzo de las obras (2010), abundante cobertura vegetal forestal; **b.** deforestación de la ladera, a dos años del corte del pie, y primeras señales de ruptura, en forma de grieta transversal; **c.** ruptura más notoria, en un flanco, casi coincidente con la falla observada en mapas geológicos (ver Figura 10); **d.** nueva señal de grietas transversales; **e.** formación de escarpe principal, corona y cabeza; **f.** situación actual, el punto 133 marca la ubicación de la corona, no muy lejos de la última marca. Modificado de Google Earth.

4.3. Dimensiones del movimiento

Para el caso de estudio, se obtuvo un valor aproximado para los parámetros W_r y L_r midiendo sobre la imagen satelital mediante el software Google Earth. La forma en planta del movimiento se acomoda relativamente bien a la forma de la elipse, aunque no de manera perfecta. En la Figura 24, se muestra el trazado de dos elipses sobre el área removida, una circunscrita y otra inscrita. Para la primera, se tienen los valores $W_d=81,9$ m y $L_d=212,1$ m, mientras que en el segundo caso se tiene $W_d=45,4$ m y $L_d=176,6$ m. Para el cálculo del volumen, se propone considerar ambas mediciones y obtener su promedio.

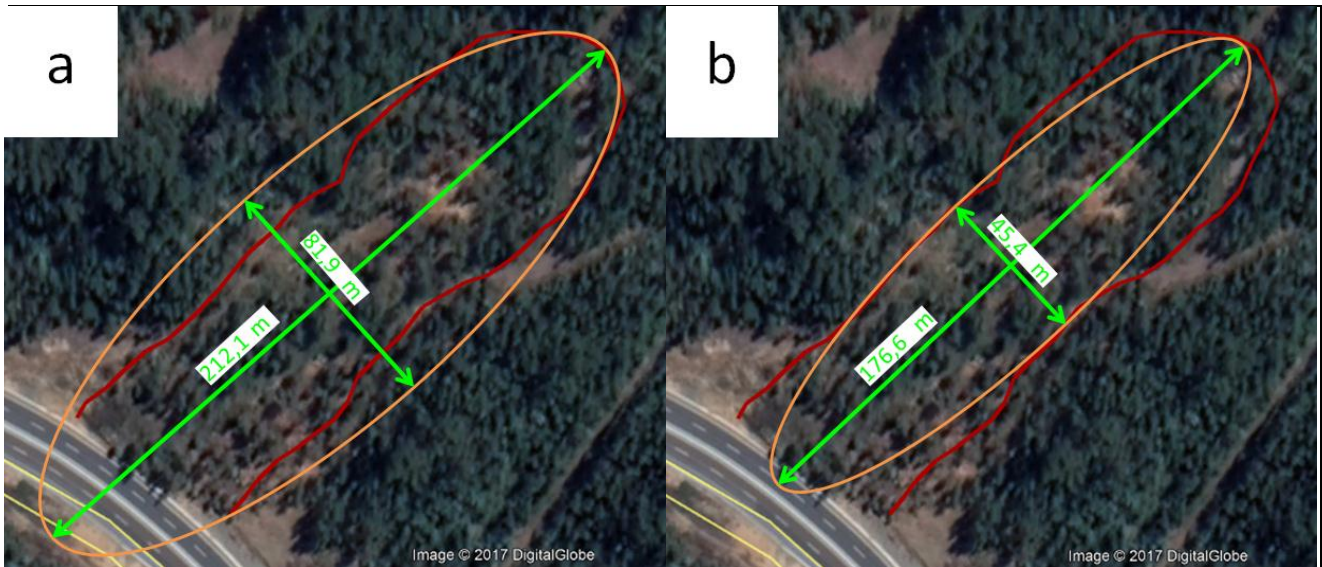


Figura 24: Dimensiones de la elipse del movimiento, con las dimensiones reales de este: **a.** inscritas a la elipse; **b.** circunscritas a la elipse. Modificado de Google Earth.

En cuanto a la profundidad del movimiento, los estudios realizados previamente (Geoservice, 2016, Geo Soil Drill, 2016, Paine, 2016) han detectado el contacto con la roca competente a una profundidad entre los 4 m y los 8 m, observación corroborada por este trabajo. Para fines de cálculo, se considerará $D_d=6$ m. Finalmente, en la Tabla 4 se muestra el cálculo del volumen del desplazamiento, según la Ecuación (1).

Tabla 4: Cálculo del volumen de la masa en movimiento.

	Área inscrita	Área circunscrita	Dimensiones promedio
W_d (m)	81,9	45,4	63,65
L_d (m)	212,1	176,6	194,35
D_d (m)	6	6	6
VOL_{ls} (m³)	54.572,6	25.188,2	38.862,7

Geoservice (2016) calculó para 10 muestras de esta masa su peso específico, como se ve en la Tabla 3. El promedio de estas es de $2,37 \text{ ton/m}^3$, de lo cual se obtienen los cálculos mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Cálculo del peso de la masa en movimiento.

	Área inscrita	Área circunscrita	Dimensiones promedio
W (ton)	129.173	59.620	91.988

5. CONCLUSIONES

5.1. Factores condicionantes del movimiento

El fenómeno de movimiento en masa del talud en el PK 28+400 de la Ruta 160 es el producto de la combinación de una serie de factores adversos, de diversa clase, que sumados y acumulados predisponen el talud y la ladera detrás de él, a moverse en el sentido de la pendiente. No obstante, el factor desencadenante del movimiento ha sido sin duda la intervención del ser humano.

La geología de la masa en movimiento, compuesta principalmente de arcilla, tiene una permeabilidad baja, lo cual por una parte implica la necesidad de lluvias prolongadas –como las que se verifican en los inviernos de la región– para ser saturado, y por otra parte, significa que el agua que contiene se evacúa con lentitud. Esta condición provoca que en el período invernal el suelo se mantenga casi permanentemente saturado de agua, aumentando drásticamente el peso y la plasticidad del terreno.

Lo anterior se combina con las discontinuidades estructurales, estas son, el contacto con la arenisca subyacente y la falla que separa la unidad estudiada del Basamento Metamórfico, que con la lubricación que ofrece el agua se convierten en superficies de ruptura. La morfología del sector no ayuda mucho a la estabilidad, con los cerros colindantes, cuyas laderas descargan la escorrentía superficial sobre la ladera estudiada, contribuyendo a su saturación.

Las características meteorológicas de la zona favorecen el movimiento, con una estación invernal de lluvias constantes y abundantes que se descargan con toda su fuerza en el área de estudio. La vegetación ha sido un factor importante evitando la saturación excesiva del suelo; esto se ve reflejado en como avanzó la masa luego de la deforestación de la ladera.

Todo lo anterior se mantendría en un estado latente, si no fuera por la intervención del hombre. La primera de ellas y la más fundamental fue el corte del talud al pie del cerro para la construcción de la carretera, que le quitó el apoyo a la masa que luego se comenzó a mover. Sumado a esto, la nula canalización de las aguas lluvias que bajan desde los cerros, combinado con la ubicación de los caminos forestales, convierten al área de estudio en receptáculo de la escorrentía superficial, que con la disminución de la pendiente se infiltra con más facilidad. Se agrega la deforestación del área, que contribuye negativamente, como se ha explicado ya antes.

Una contribución antrópica a considerar, y que no fue medida en este estudio, es el efecto de las vibraciones producidas por el tráfico de la carretera colindante. En las visitas a terreno realizadas se pudo comprobar el abundante tránsito de camiones, de uno y dos carros, y maquinaria pesada. Durante la ejecución de los ensayos geofísicos, el software pudo detectar la presencia casi constante de vibraciones provenientes de la ruta, aunque no entregó una cuantificación de ellas. Toda esta carga contribuye a la generación del movimiento en masa. La ocurrencia de un evento sísmico importante, como el terremoto de febrero de 2010, podría desencadenar un desastre de gran magnitud, incluso con pérdidas humanas.

5.2. Recomendaciones

Las medidas que se pueden tomar para la mitigación de este problema escapan en su mayoría a lo que tiene potestad de realizar la concesionaria Acciona, por encontrarse gran parte del área en terrenos privados. Estas consisten primero en la mejor canalización de las aguas venidas de los cerros, así como las que caen en el área de estudio misma, de manera de evacuarlas y evitar que saturen el suelo. Otra recomendación importante es no realizar en el futuro una nueva deforestación del área. Ambas medidas requerían de la cooperación y buena voluntad del propietario de los terrenos. De otra manera, el movimiento tardará muchos años más en estabilizarse, cuando la masa restante sea menor. Hasta entonces, habrá que contentarse con seguir retirando el material que se abalanza sobre la carretera.

El talud estudiado puede ser catalogado como de Alto Riesgo, por lo que sería de gran importancia el monitoreo constante del movimiento de esta masa. Así mismo, es recomendable la realización periódica de nuevos estudios, en especial desde aristas como la hidrogeológica y la sísmica, tanto como aporte al conocimiento y la disciplina de la gestión de riesgos geológicos, como para la prevención de un desastre.

6. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., Godoy, E.** (1972). "Distribution of metamorphic facies in Chile. Am outline". *Kristalinikum*, No. 9, p. 7-19.
- Cruden, D.** (1991). "A Simple definition of landslides". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v 43, p.27-29.
- Cruden, D; Varnes, D.** (1996). "Landslides types and processes". En *Landslides. Investigation and Mitigation* (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editores). Transportation Research Board, National Research Council. p 36-75. Washington.
- EULA** (2010). "Proyecto Estudio Básico Catastro Georeferenciado de Riesgos y Peligros Naturales en la Red Vial. Informe Etapas I y II". Informe inédito. 71 p. Concepción.
- Ferraris, F.** (1981). "Mapas geológicos preliminares de Chile: hoja Los Angeles-Angol escala 1: 250.000 Región del BíoBío". Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Geoservice** (2016). "Estudio Geotécnico e Ingeniería Talud Pk 28+400 Costado Oriente – by pass Lota". Informe Geotécnico CCS-1601-CI-MS-001.
- Geo Soil Drill** (2016). "Informe Sondaje Geotécnico Estudio Mecánica de Suelo Proyecto Ruta 160 - Lota". Informe N°08-16.
- Gutiérrez-Elorza, M.** (2008). "Geomorfología". Ed Pearson Educación. 920 p. Madrid, España.
- IAEG Commission on Landslides** (1990). "Suggested Nomenclature for Landslides". *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 41, pp.13-16.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)** (2017). "Red agrometeorológica de INIA". Recuperado de: <http://agromet.inia.cl/estaciones.php>
- Mardones, M., Rodríguez, A., Soto, J.** (1994). "Los riesgos naturales en la Comuna de Talcahuano". *VII Congreso Geológico Chileno*. Vol. 1, p. 653-656. Concepción.
- Mella, M.; Duhart, P.; Ramírez, P.; Constanzo, H.** (2010). "Evaluación preliminar de peligros geológicos: Área de Lota, Región del BíoBío. Mapa 8-1: Peligro de remociones en masa". *Geología para la reconstrucción y la gestión del riesgo, 1*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-10- 43: 12p., 21 mapas diferentes escalas. Santiago.
- Mellado, S.** Comunicación personal, 12 de octubre de 2017.
- Mendoza, J. L.** (2001). "Distribución, caracterización, génesis y características tectónicas de los yacimientos de arenas silíceas del área costera de la Octava Región entre Coliumo y Los Álamos". Memoria de título, Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra. 1 mapa. Concepción.
- Muñoz-Cristi, J.** (1946). "Estado actual del conocimiento sobre la geología de la Provincia de Arauco". *Anales Fac. Cs. Fis. y Mat. Univ. de Chile*, No 3, p 64-70.
- Naranjo, J. A., Clavero, J., Hauser, A., Ramírez, P.** (2005). "Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en Concepción, VIII Región". Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 26 p.
- 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.
- Naranjo, J.; Ramírez, P.** (2006). "Remoción en masa en el km 43 de la Ruta 160, Comuna de Lota, 14 de Agosto de 2006". Informe Inédito, Servicio Nacional de Geología y Minería, 11 p.
- Paine** (2016). "Proyecto de caracterización de terreno mediante sísmica de microtemores (ReMi)". Informe geofísico. Revisión 1.



Pradenas, M. (2014). “Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción”. Proyecto de título, Universidad del Bio-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Concepción.

SERNAGEOMIN (2010). “Efectos geológicos del sismo del 27 de febrero de 2010. Región del Bio-Bio”. INF-BIOBIO, n° 01 al 50. Informe inédito. Santiago, Chile.

SERNAGEOMIN (2015). “Registro de los Principales Desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados entre 1980 y 2015”. Santiago, Chile.

Wieczorek, G. (1996). “Landslides types and processes”. *Landslides. Investigation and Mitigation* (Turner, A.K.; Schuster, R.L.; editores). Transportation Research Board, National Research Council: 76-90. Washington.