

## **EVALUACIÓN DE PELIGROSIDAD DE REMOCIÓN EN MASA TRAS INCENDIOS FORESTALES Y SU EXPOSICIÓN A PRECIPITACIONES EN LA RUTA DE LA MADERA, REGIÓN DE BIO BÍO, CHILE**

*Tania Romanette Acuña Hernández<sup>1</sup>, José Miguel Montenegro Cooper<sup>2</sup>, Robert Wallace King St-Onge<sup>3</sup>*

### **RESUMEN:**

El análisis de estabilidad de taludes es crucial para mitigar peligros asociados a eventos de remoción en masa, pues estos pueden afectar la seguridad de personas, conectividad vial e infraestructuras. Debido a la reducción de vegetación, como consecuencia de incendios forestales, y al aumento de saturación del suelo tras su exposición a precipitaciones intensas, el terreno se vuelve potencialmente inestable, siendo este último factor el principal desencadenante de eventos de movimiento en masa. Por lo anterior, se propone realizar un estudio multicriterio ponderado de factores condicionantes, mediante el procesamiento de modelos digitales de sistemas de información geográfica (SIG), para la obtención de un mapa de susceptibilidad, y posteriormente, la corroboración de peligrosidad en terreno con métodos de clasificación geomecánicas. En el sector de estudio, ubicado en la ruta de la Madera, comuna de Coronel, región de Bio bío, afloran cuerpos de roca altamente meteorizados, fracturados y suelos residuales, implicando una potencial exposición al peligro, que podría perdurar a lo largo de los años.

**PALABRAS CLAVES:** remoción en masa, análisis multicriterio, clasificación geomecánica, precipitaciones

### **ABSTRACT:**

The slope stability's analysis is crucial for decreasing hazards related with landslides, these may affect the safety of people, road connectivity, and infrastructure. Due to the vegetation decrease, because of wildfires, and the increased soil saturation after the exposure to intense precipitation, the land becomes potentially unstable, being the latter factor the mainly trigger for mass movement events. Therefore, a weighted multicriteria study of conditioning factors is proposed, through the processing of digital models within geographic information systems (SIG), to generate a susceptibility map, and subsequently, the corroboration of hazards in the field using geomechanical classification methods. In the study zone, located along the Ruta de la Madera, commune of Coronel, Bio bío region, there are highly weathered rock bodies, fractured formations, and residual soils, which implies a potential danger exposure, that may could persist over the years.

**KEYWORDS:** landslide, multicriteria analysis, geomechanical classification, rainfall

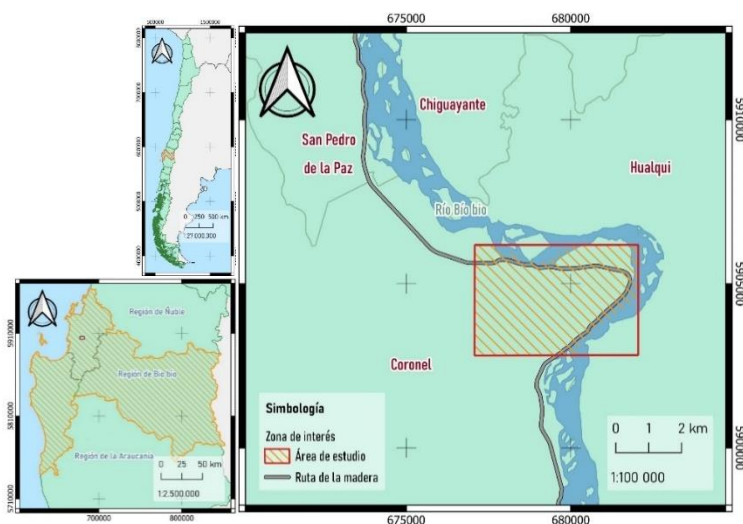
## 1 INTRODUCCIÓN

La remoción en masa (RM) es un proceso geológico que ocurre principalmente en zonas de alta pendiente, ya sea en laderas o taludes, causando cada año millones de muertes, lesiones, desapariciones humanas y miles de millones de dólares en pérdidas económicas a lo largo del mundo (Hauser, 2000; EM-DAT, 2008; Highland & Bobrowsky, 2008; Azimi, Nikraz, & Yazdani-Chamzini, 2018; USGS, 2023). Se define RM como el movimiento lento o rápido de grandes volúmenes de material compuesto de roca, escombros, y/o suelo pendiente abajo, influenciada por múltiples factores, entre ellos la gravedad (Cruden, 1991; Hauser, 2000; USGS, 2023). Estos factores se clasifican en intrínsecos, que definen las propiedades internas del terreno y participan del mecanismo de ruptura, y de carácter extrínseco, siendo cargas descendentes externas a las propiedades del suelo que controlan en gran medida los volúmenes de material movilizado (Hauser, 2000).

Incendios forestales altamente devastadores y difíciles de contener han afectado a la zona centro – Sur de Chile durante las últimas dos décadas, los cuales han tenido serias consecuencias sociales, económicas y ambientales (CR2, 2020; González et al., 2020). Las lluvias intensas en zonas deforestadas, ya sea por urbanización, intervención antrópica, incendios, entre otros., pueden contribuir al aumento de fuerzas descendentes, y a la reducción de resistencia de un talud o ladera (Varnes, 1978; Wiekzorek, 1996; Sarkar, 2018; USGS, 2023). Ambos procesos detonantes causan que los taludes montañosos de la zona sufran desestabilidad, y generen con su ruptura un movimiento en masa (González et al., 2020).

La ruta de la Madera (R156), corresponde a la conectividad vial directa de la zona Metropolitana del Gran Concepción y la zona centro-Sur de la provincia, extendiéndose hasta 300 kilómetros (Rivera & Varela, 2018). Este estudio se enfoca en el tramo entre los kilómetros 16 – 26 de la ruta (Figura 1), considerando siniestros ocurridos entre 2003 y 2006; además, de caudales máximos de precipitación durante el año 2006, los que presumiblemente desencadenaron movimientos en masa entre 2006 y 2007. Este trabajo se centra en el análisis y caracterización de las zonas de peligro en el tramo de interés, utilizando técnicas de procesamiento de imágenes satelitales, manejo de datos jerárquicos ponderados para la estimación de susceptibilidad, y la utilización de la clasificación geomecánica RMR para la evaluación de peligrosidad en terreno.

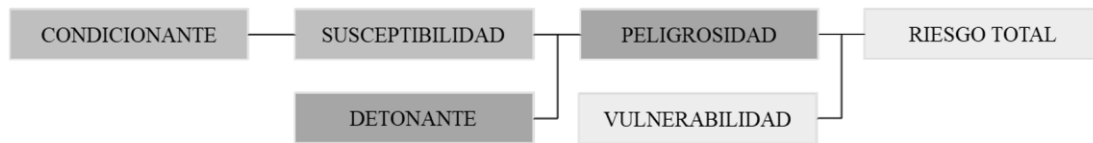
Si bien la frecuencia y/o gravedad de eventos de remoción en masa no ha cambiado, hay una cantidad creciente de personas fallecidas y/o lesionadas que se atribuye al aumento de población que se expone a zonas de terreno montañoso, lo que vuelve primordial comprender la naturaleza de exposición potencial a estos eventos (Lacasse, Nadim, & Kalsnes, 2010; USGS, 2023).



**Figura 1:** Mapa de ubicación de la zona de estudio Ruta de la madera, provincia Bio bío, región Bio bío, Chile

## 2 MARCO TEÓRICO

En el contexto de estudio de cartografía de desastres naturales, es necesario definir una serie de conceptos generales con el fin de prevenir confusiones (Figura 2). La evaluación de estos, el estudio de su ocurrencia en el tiempo y la relación entre factores condicionantes y desencadenantes puede permitir la prevención y mitigación de daños hacia la población y su entorno (Lara & Sepúlveda, 2006).



**Figura 2:** Esquema que expone las relaciones entre los conceptos relacionados con el riesgo en remociones en masa (modificado de Rodríguez, 2009)

### 2.1 Susceptibilidad

La susceptibilidad representa la posibilidad del terreno a ser afectada por un proceso geológico determinado, a causa de los factores condicionantes que forman parte de las propiedades y comportamiento del medio (Sepúlveda, 1998; INDECI, 2011). Los *factores condicionantes* (Tabla 1) representan la predisposición de un terreno a perder su estado de equilibrio y volverse inestable, debido a cualidades naturales e intrínsecas del medio (Hauser, 2000; González de Vallejo, 2002). Estos se clasifican principalmente en los parámetros de geomorfología, geología, vegetación y antecedentes históricos, que actúan controlando la susceptibilidad de una zona a la generación de eventos de remoción en masa (Sepúlveda, 1998; González de Vallejo, 2002; Lara, 2007). Se categorizan los factores condicionantes según:

**Tabla 1:** Clasificación de factores condicionantes según parámetros

Parámetro	Factor
Geomorfología	Pendiente
	Orientación
	Red hídrica
	Altura
Geología	Litología
Vegetación	Vegetación
Antecedentes	Antecedentes históricos

La *geomorfología* es un parámetro que define la forma del relieve que se da como resultado de procesos endógenos (vulcanismo, terremotos o plegamiento), sin considerar las fuerzas de denudación que generan desgaste, como movimiento de agua, viento, hielo, entre otros (Gutiérrez, 2008). Permitiendo comprender los principios físicos y geológicos (morfológicos y topográficos) que llevaron a la evolución de relieve, como montañas, valles, mesetas y llanuras, basado en criterios como altitud, pendiente, red hídrica, y orientación (Bangar, 2020).

La *geología* de la zona depende de variables, como litología, permeabilidad, meteorización, entre otras (Hauser, 1993). La composición del terreno es determinante al evaluar resistencia y estabilidad, pues los bloques de roca o material detrítico son estructuras potencialmente inestables (González de Vallejo, 2002).

La *cobertura vegetal* suele ser una barrera natural de contención de material, al tener la capacidad de reducir la erosión externa y aumentar la estabilidad del suelo mediante la absorción de agua tras precipitaciones, evitando la saturación (Lara, 2007; Muñoz, 2013; Araya, 2014; Inostroza, 2017). Sin embargo, puede darse que la evapotranspiración no alcance a compensar la alta infiltración del suelo en zonas con clima lluvioso, aún con abundante vegetación, provocando el aumento de nivel freático, presión de poros y saturación del terreno (Selby, 1993 en Arlegui, 2013 en Araya, 2014). La deforestación implicaría la exposición del terreno, aumentando las probabilidades de un evento de remoción en masa (Arlegui, 2013 en Araya, 2014; Inostroza, 2017).

La adquisición de información de la superficie terrestre para zonas remotas o inaccesibles se realiza desde sensores instalados en satélites o plataformas aéreas, proceso conocido como teledetección (Kogut, 2021). Estas imágenes satelitales son otorgadas por el programa *Landsat* o *Sentinel*, y permiten analizar datos históricos de vegetación, no sólo el estado actual (Ramos, 2019; Kogut, 2021; USGS, 2023). La teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), son frecuentemente combinados para obtener datos físicos, que se procesan en plataformas SIG (QGIS, ArcGIS Pro, etc.) (Kogut, 2021).

La teledetección permite medir las propiedades de reflectancia de la vegetación, facilitando evaluar la salud de la flora con índices de vegetación diferencial normalizado (NDVI) (Kogut, 2021). El NDVI mide la intensidad de emisión de bandas del espectro electromagnético, utilizando imágenes satelitales en un software de sistema de información geográfica (SIG) (Ramos, 2019; Sykas, 2020; Sergieieva, 2022; USGS, 2023). Valores muy bajos de NDVI (-1 a 0) corresponden a zonas estériles de roca, arena o nieve; valores moderados (0.2 a 0.3) a arbustos y pastizales; valores de (0.3 a 0.6) a vegetación moderadamente saludable y; valores de (0.6 a 0.8) a bosques templados y vegetación muy saludable (Weier & Herring, 2000).

El estudio de *antecedentes históricos* se centra en recopilar el historial de eventos de remociones en masa de un área de interés, identificando patrones y tendencias, es decir, las zonas que podrían reincidir en su ocurrencia (SERNAGEOMIN, 2022). Este análisis permite discriminar la peligrosidad sectorialmente, utilizando plataformas SIG.

La contribución a la inestabilidad de los factores condicionantes se mide con el *método de jerarquías analíticas (AHP)*, donde se determina la ponderancia de cada factor ( $P_{F_1, F_2}$ , etc.) y se correlaciona (Tabla 2) con técnicas de evaluación multicriterio (EMC) para obtener el peso ponderado (Saaty, 1980). Esta interpretación permite analizar datos cualitativos de forma cuantitativa, siendo aquellas correlaciones con un valor más alto las de mayor incidencia en la generación de procesos de RM (Saaty, 1980). La escala para asignar valores numéricos a la correlación entre factores es del 1 al 9, siendo el primer valor de igual importancia, y el último de extrema influencia de un factor sobre otro (Tabla 3) (Saaty, 1980).

**Tabla 2:** Matriz AHP para factores condicionantes (Modificado de Saaty, 1980).

Factor	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	Peso ponderado
F <sub>1</sub>	1	$P_{F_1, F_2}$	$P_{F_1, F_3}$	%
F <sub>2</sub>	$1/P_{F_1, F_2}$	1	$P_{F_2, F_3}$	%
F <sub>3</sub>	$1/P_{F_1, F_3}$	$1/P_{F_2, F_3}$	1	%

**Tabla 3:** Ponderancia relativa de un factor sobre otro (Modificado de Saaty, 1980)

Ponderancia relativa	Influencia de un factor sobre otro				
	Igual	Moderada	Fuerte	Muy fuerte	Extrema
	1	3	5	7	9

La asignación de valores a las ponderaciones posee una cuota significativa de subjetividad, con lo que se evalúa además, la razón de consistencia (r.c.) para verificar si el juicio utilizado tiene real consistencia con su importancia real (Saaty, 1980). Así, los valores de r.c. mayores o iguales a 1.0 requieren revisión, pues no son consistentes, y los valores menores a 0.1 son válidos (Saaty, 1980).

La elaboración de un *mapa de susceptibilidad* se realiza mediante procesamiento SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio.

## 2.2 Peligrosidad

La peligrosidad, también conocida como amenaza, representa la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino de RM, dentro de un área y un periodo de tiempo dado (Henríquez, 2019; Westen, 1993; Varnes, 1984). Esta corresponde a la relación entre la susceptibilidad del terreno a moverse, y los factores desencadenantes (González de Vallejo et al., 2002).

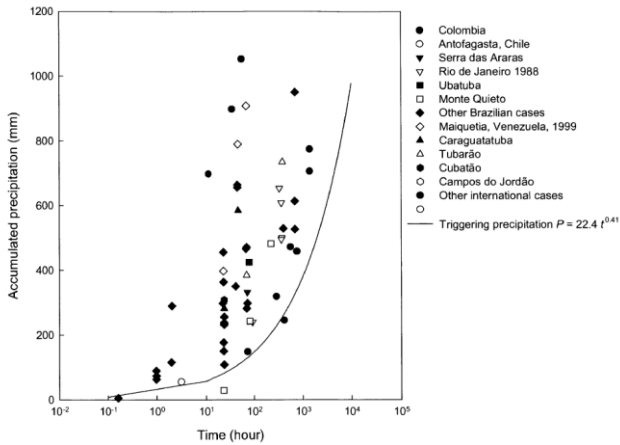
Los *factores desencadenantes* son extrínsecos, es decir, un estímulo externo al medio que puede provocar un evento de movimiento en masa, a causa de un rápido incremento de esfuerzos o reducción de resistencia del material de un talud en un corto periodo de tiempo entre causa y efecto (Wiekzorek, 1996). Entre los factores desencadenantes más relevantes están las precipitaciones intensas y movimientos sísmicos, mientras que incendios forestales, derretimiento de nieve, entre otros, tienen menor impacto (Hauser, 2000; González de Vallejo et al., 2002; Ortigao & Sayao, 2004; Lara & Sepúlveda, 2006).

Las *precipitaciones intensas* son reconocidas como el principal factor desencadenante de RM, generando en ocasiones pérdidas de vidas humanas e infraestructura de obras civiles (Hauser, 2000; Ortigao & Sayao, 2004). Intensas lluvias condicionan la estabilidad del suelo, disminuyendo la resistencia al corte, alterando el estado tensional del terreno con su saturación, y aumentando su peso (Abramson et al., 2002; González de Vallejo, 2002; Ortigao & Sayao, 2004). Estas pueden ocasionar la activación de flujos de barro y/o detritos con reiterada frecuencia en zonas montañosas (Hauser, 2000; Ortigao & Sayao, 2004).

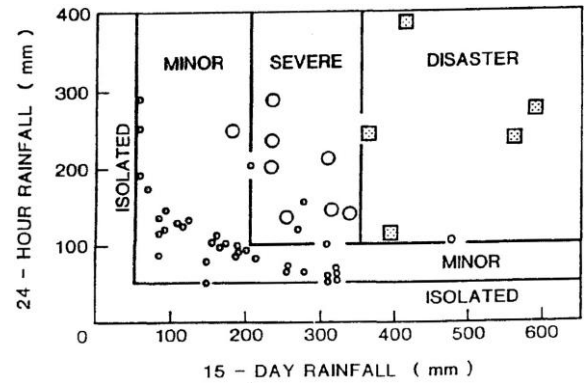
Si bien lluvias de gran intensidad en periodos cortos de tiempo son favorables para la generación de eventos de RM (Figura 3), la relación entre estas variables depende además, de la localidad y el tipo de suelo, pues no hay un valor estándar global de precipitación para desencadenar un evento (Kanji et al., 2000 en Ortigao & Sayao, 2004; Ortigao & Sayao, 2004). Para zonas andinas en Chile se consideran precipitaciones sobre 60 mm en 24 horas o menos, como el valor detonante para la generación de eventos de movimientos en masa (Hauser, 2000; Kanji et al., 2000 en Ortigao & Sayao, 2004).

Además de la intensidad de la lluvia, se requiere una cierta cantidad de precipitación acumulada (días a semanas) para la ocurrencia de fallas poco profundas (Lumb, 1975; Abramson, et al., 2002; Lee, 2002; Ortigao & Sayao, 2004). El manto del suelo debe estar completamente saturado antes de tormentas posteriores, la cantidad de lluvia antecedente necesaria dependerá de la litología, tasa de infiltración, evaporatranspiración, entre otros (Lee, 2002).

Lumb (1975) describe la relación entre 24 horas de precipitación y 15 días de lluvia acumulada previamente en Hong Kong, categorizando los eventos como aislado, menor, severo y desastroso según la cantidad de eventos de RM generados para cada caso (Figura 4). Más de 50 eventos de RM se desencadenaron en un día, tras 100 mm de precipitación en 24 horas y la acumulación de 350 mm de lluvia anterior, siendo un suceso desastroso (Lumb, 1975 en Lee, 2002). Eventos severos fueron provocados por 100 mm de lluvia en 24 horas, tras 200 mm de agua caída durante los 15 días anteriores, dando paso a entre 10 y 50 eventos de RM (Lumb, 1975 en Lee, 2002).



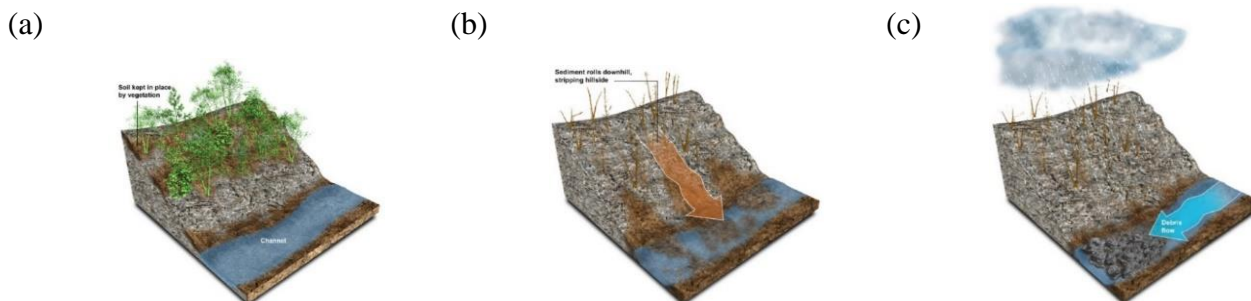
**Figura 3:** Niveles de precipitación crítica para generar eventos de flujo de detritos (Kanji et al., 2000 en Ortigao & Sayao, 2004)



**Figura 4:** Relación entre duración de la lluvia y su acumulación tras 15 días, Hong Kong (Lumb, 1975)

Un *incendio forestal* es un fuego que, sin importar su origen, se propaga de forma descontrolada, usando como combustible vegetación viva o muerta, pudiendo destruir todo a su paso (CONAF, 2016). Tras el siniestro se alteran las condiciones normales edafológicas (composición y naturaleza) e hidrológicas del suelo, disminuyendo su capacidad de infiltración, lo que lleva a una mayor probabilidad de inundación y generación de una RM tipo flujo o deslizamiento (Eaton, 1935; DeBano et al., 1979; Wells, 1987; DeBano, 2000; Woodsmith et al., 2004, 2007; Jackson y Roering, 2009; Dowling and Santi, 2014; Ebel and Moody, 2016; McGuire et al., 2018; De Graff, 2018; Kean et al. 2019 en Rengers et al., 2020). Por otro lado, las raíces pueden perder fuerza tras el siniestro, reduciendo la cohesión y dejando las laderas o taludes más propensas a fallar (Regelbrugge and Conard, 1993 ; Jackson & Roering, 2009; Lanini et al., 2009; De Graff, 2018; Gehring et al., 2019 en Rengers et al., 2020).

Como se observa en la Figura 5, previo al siniestro la vegetación natural del talud planta sus raíces en el macizo rocoso fragmentado, atrapando suelo meteorizado entre escarpadas rocas (Figura 5, (a)); luego de un incendio forestal, la vegetación quemada genera sedimentos sueltos, que se depositan pendiente abajo, cargando cuerpos fluviales aledaños en pocas horas o días (Figura 5 (b)), finalmente, tras intensas precipitaciones se produce escorrentía que moviliza sedimento suelto aguas abajo (Figura 5 (c)) (National Weather Service, 2015).



**Figura 5:** (a) Zona con vegetación natural previa a siniestro. (b) Zona posterior al incendio. (c) Zona con exposición a lluvia y escorrentía (National Weather Service, 2015).

Los desencadenantes de RM más recurrentes para áreas siniestradas son tormentas y lluvias intensas (Scott, 1971). Los tres primeros años luego de un incendio forestal predisponen altamente al terreno a eventos de RM en temporada de lluvias, esta predisposición a fallar del terreno se vuelve de intensidad media a los cinco años, y en los últimos diez años se vuelve poca o nula, recuperando sus propiedades

previas al siniestro. (Rice y Foggin, 1971; Benda y Dunne, 1997; Meyer et al., 2001; May y Gresswell, 2003; Napoli, et al., 2020 en Rengers et al., 2020).

### 2.2.1 Vulnerabilidad

La vulnerabilidad son las características propias de la población e infraestructura, considerando los medios de vida o medio ambiente, servicios públicos o privados que los hacen vulnerables a sufrir daños y pérdidas por el impacto de una determinada amenaza (ONEMI, 2016).

### 2.2.2 Riesgo

El riesgo es el efecto potencial de sufrir pérdidas de vidas humanas y/o daños sociales, económicas o ambientales en un área particular, durante un periodo de tiempo definido, como consecuencia de la interacción entre alguna amenaza y la vulnerabilidad (ONEMI, 2016).

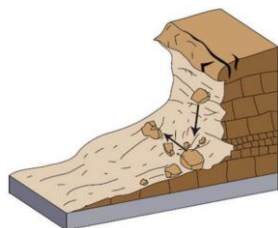
### 2.3 Procesos de remoción en masa

La remoción en masa se define como el movimiento de material pendiente abajo de rocas, detritos o suelo, controlados esencialmente por la fuerza de gravedad (Cruden, 1991). Los tipos de remoción de masa han sido extensivamente estudiados hasta el punto de clasificarlos según el movimiento efectuado o el tipo de material removido al producirse la remoción (Tabla 4) (Highland & Bobrowsky, 2008; Cruden & Varnes, 1996; Varnes, 1978).

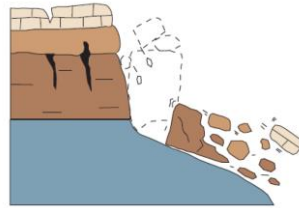
**Tabla 4:** Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978)

Tipo de movimiento		Tipo de material	
Caída		Roca	Suelo
Volcamiento			
Deslizamiento	Rotacional		
	Traslacional		
Extensión lateral			
Flujo			
Complejo			
		Grano grueso (detritos <80% partículas <2mm)	Grano fino (barro, >80% partículas <2mm)

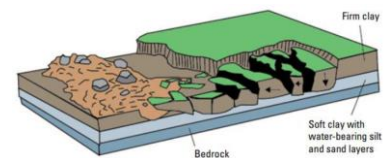
Los tipos de movimiento de RM se resumen en cinco grupos principales: caída, derrumbe o volcamiento, deslizamientos, extensiones y flujos (Tabla 4, Figura 6); pero también es posible un sexto grupo más complejo, donde se combinan dos o más de los cinco tipos mencionados (Cruden & Varnes, 1996; Varnes, 1978). El tipo de material se resume en dos grandes clases: roca y suelo; este último a su vez se categoriza en grano grueso y fino (Varnes, 1978).



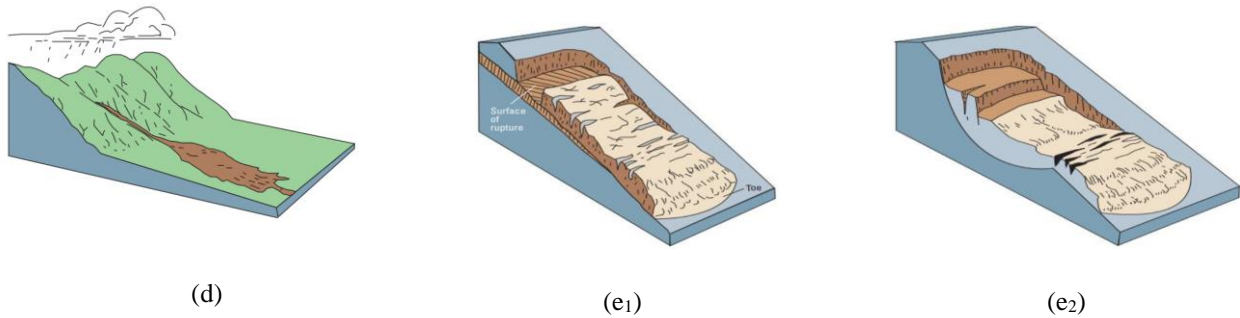
(a)



(b)



(c)



**Figura 6:** Principales tipos de rotura en taludes (a) Caída, (b) Volcamiento, (c) Extensión lateral, (d) Flujo, (e<sub>1</sub>) Deslizamiento traslacional, (e<sub>2</sub>) Deslizamiento rotacional (Highland & Brobowsky, 2008)

La *caída* (Figura 6\_(a)) es el movimiento en el que una masa de cualquier tamaño sufre un desprendimiento, y cae libremente, efectuando golpes, rebotes y rodamiento desde una pendiente o acantilado a lo largo de una superficie (Cruden & Varnes, 1996; Varnes, 1978). Los movimientos son muy rápidos o extremadamente rápidos, dependiendo de la pendiente (Cruden & Varnes, 1996). Se asocian a pendientes altas o verticales, zonas costeras o rocosas, donde el material caído no suele frecuentar nuevos movimientos (Highland & Brobowsky, 2008)

El *volcamiento* (Figura 6\_(b)) consiste en la rotación de una masa de suelo o roca con respecto a algún punto o eje que se encuentre bajo el centro de gravedad, por efecto de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes, o bien por fluidos en grietas (Cruden & Varnes, 1996). Estos movimientos van desde extremadamente lento a extremadamente rápido y pueden ocasionar una posterior caída o deslizamiento (Cruden & Varnes, 1996).

La *extensión lateral* (Figura 6\_(c)), se refiere a bloques rocosos que se desplazan sobre material blando y deformable con una velocidad extremadamente lenta a favor de pendientes muy bajas (González de Vallejo, 2002). Estos ocurren como resultado de la pérdida de resistencia del material subyacente, el cual fluye o se deforma debido al peso de los bloques rígidos (Highland & Brobowsky, 2008; González de Vallejo, 2002). Pueden ocurrir como resultado de licuefacción o debido a procesos de extrusión lateral de arcillas húmedas y blandas debido al peso de masas superiores en zonas de baja pendiente (Highland & Brobowsky, 2008)

El *flujo* (Figura 6\_(d)) implica movimientos de masa de suelo (flujo de barro o tierra), ya sea flujo de derrubios o flujo de fragmentos de roca, donde el material se encuentra disgregado y con abundante presencia de agua, dando lugar a un comportamiento como un “fluido viscoso”, sin presentar superficies de rotura definidas y sufriendo una deformación continua (González de Vallejo et al., 2002). En muchas ocasiones se generan a partir de otros tipos de movimientos, como deslizamientos o caídas (Varnes, 1978).

Un *deslizamiento* consiste en el desplazamiento de un suelo o masa rocosa a lo largo de una o varias superficies de rotura, o en zonas relativamente delgadas de intensa tensión de corte (Varnes, 1978). El movimiento puede ser progresivo, propagándose desde una falla local hasta generar una superficie definida de ruptura (Varnes, 1978). Se subdivide en:

*Deslizamientos traslacionales* (Figura 6\_(e<sub>1</sub>)), se trata de movimientos de masa a lo largo de una superficie que es mayormente plana o ligeramente ondulada, por lo general de menor profundidad que los movimientos rotacionales (Cruden & Varnes, 1996). La magnitud de su desplazamiento puede ser significativa cuando la superficie de ruptura es lo suficientemente inclinada (Highland & Brobowsky, 2008).

*Deslizamiento rotacional* (Figura 6\_(e<sub>2</sub>)), se distinguen por presentar una ruptura concéntrica que sigue un plano cóncavo en la dirección del movimiento (Cruden & Varnes, 1996). Este es prácticamente

rotacional con respecto a un eje, acompañado por un desplazamiento coherente de la masa (Highland & Brobowsky, 2008).

## 2.4 Clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating)

El sistema de Clasificación de Macizo Rocoso (RMR), también conocido como clasificación geomecánica fue desarrollado por el autor Bieniawski durante 1972 a 1973, y ha experimentado modificaciones a lo largo de los años, siendo su última actualización en 1989 (González de Vallejo et al., 2002; Bieniawski, 1989). Este sistema se utiliza en el análisis de túneles, taludes y macizos rocosos; las clasificaciones geomecánicas se encargan de caracterizar el macizo mediante la observación de afloramientos o sondeos, con el propósito de obtener parámetros relacionados con su resistencia y deformabilidad (Tabla 4) (Bieniawski, 1989). Esto permite comprender su posible comportamiento y calidad, facilitando la recomendación de sistemas de soporte para mitigar la probabilidad de remoción (González de Vallejo et al., 2002).

**Tabla 5: Clasificación del macizo rocoso RMR (Bieniawski, 1989)**

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	> 10	10-4	4-2	2-1	Compresión simple (MPa)		
		Resistencia a Compresión simple	> 250	250-100	100-50	50-25	25-5	5-1	< 1
		Puntaje	15	12	7	4	2	1	0
2		RQD	90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25 %		
		Puntaje	20	17	13	6	3		
3		Separación entre diaclasas	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	0.06-0.2 m	< 0.06 m		
		Puntaje	20	15	10	8	5		
4		Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntaje	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	<0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm		
		Puntaje	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntaje	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5mm		
		Puntaje	6	4	2	2	0		
5		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntaje	6	5	3	1	0		
5		Presencia de agua	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntaje	15	10	7	4	0		

La descripción del macizo rocoso se realiza según la *Norma ISRM 1978*, que permite caracterizar y discriminar las discontinuidades en macizos rocosos, de gran importancia para reconocer posibles planos de falla y comprender su comportamiento mecánico (Barton en ISRM, 1978). Esta norma proporciona métodos sugeridos para la recopilación de información, con tal de predecir su calidad como masa rocosa,

en base a sus condiciones geotécnicas y geomecánicas (ISRM, 1978 en Bieniawski, 1989). Los enfoques que trata son:

- Resistencia: Es el grado de meteorización de la roca, se representa como el estado general de descomposición de la familia de discontinuidades. Un alto grado de meteorización se liga a un suelo residual, que ha sido expuesto a procesos erosivos. Por otro lado, un macizo rocoso sano es aquel sin signos de meteorización.
- Número de familias de diaclasas: Las fracturas con orientación paralela conforman una familia de discontinuidades, siendo posible encontrar más de una en el mismo macizo rocoso.
- Orientación de las discontinuidades: La orientación se mide en el conjunto de familia de discontinuidades, definen la forma de los bloques de la masa rocosa. Se mide según la dirección del buzamiento y buzamiento, es decir, según la dirección de la línea de máxima pendiente con respecto al norte del plano de discontinuidad y la inclinación con respecto a la horizontal.
- Espaciamiento de las discontinuidades: Distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia.
- Persistencia de las discontinuidades: Implica la longitud a lo largo de la cual una fractura específica se mantiene sin interrupciones, esta puede variar desde centímetros a metros. La extensión de la junta en el macizo rocoso, al igual que la abertura es inversamente proporcional a la calidad del macizo rocoso.
- Abertura de las discontinuidades: Es la separación entre las caras opuestas de una discontinuidad. Este parámetro es esencial para evaluar la permeabilidad y la capacidad de deformación de la masa rocosa.
- Rugosidad de las discontinuidades: Influye en la fricción y la resistencia al deslizamiento entre bloques de roca separados por fracturas.
- Relleno de la discontinuidad: Material que separa las discontinuidades de una roca, depende directamente del grado de meteorización de la junta y presencia de agua. Un relleno de material blando se categoriza de peor calidad que uno duro.
- Presencia de agua: La presencia de agua puede afectar rápidamente al comportamiento del macizo rocoso con discontinuidades, pues potencia su deterioro.

La aplicación de este sistema de clasificación requiere de observación y medición en terreno (González de Vallejo et al., 2002; Bieniawski, 1989). Cada talud estudiado se considera una estación geomecánica, lo que implica la necesidad de examinar su entorno en busca de estructuras geoestructurales como fallas normales, inversas o destrales, así como sus conjuntos de discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002; Bieniawski, 1989). Es necesario evaluar los parámetros para cada una de las familias de discontinuidades individualmente en la estación geomecánica, y posteriormente considerar el peor caso de rotura del talud, no el promedio (Bieniawski, 1989).

### 3 METODOLOGÍA DE ESTE TRABAJO

La metodología de investigación se llevó a cabo mediante tres etapas principales: pre – terreno, terreno y post – terreno para la zona de interés (Figura 7). A continuación se describen estos procesos.



**Figura 7:** Vista satelital de la zona de interés

### 3.1 Etapa pre terreno

La etapa pre – terreno estuvo compuesta de tres partes:

#### 3.1.1 Primera etapa pre terreno

Durante la *primera etapa* se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva de metodologías existentes para la elaboración de mapas de susceptibilidad de RM, teniendo en cuenta los factores condicionantes. El criterio utilizado para evaluar los distintos factores se basó en el estudio previo de diversos autores y/o softwares (Tabla 6), los cuales se presentan a continuación:

**Tabla 6:** Factores intrínsecos y autores contribuyentes para evaluar la susceptibilidad de RM

Parámetro	Factor	Criterio
Geomorfología	Pendiente	Baéz, (2020), Hauser (2000), Keefer (2002), López (2013), Muñoz (2013)
	Orientación	Brignardello (1997), Lara (2007)
	Red hídrica	Polígonos de redes hídricas en SIG aportados por Ministerio de Obras Públicas
	Altura	Lara & Sepúlveda (2006), Pierson (1990)
Geología	Litología	(Valenzuela, Bonilla, & Soto, 2005)
Vegetación	Vegetación	Imagen Landsat 5
Antecedentes	Antecedentes históricos	Google Earth Pro

El análisis que se llevó a cabo para evaluar cada parámetro se detalla a continuación:

- **Geomorfología:** La *geomorfología* de la zona se evaluó en base a un modelo de elevación digital (DEM) 5x5, para la generación de mapas de pendiente y orientación, utilizando herramientas de análisis provenientes de SIG. El mapa de altura se obtuvo mediante la realización de polígonos shape en el software ArcGIS Pro, utilizando como base las curvas de nivel generadas por DEM en SIG otorgadas por empresa privada de rubro forestal, y Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- **Geología:** La litología de la zona fue obtenida mediante Valenzuela et al., (2005), la cual se digitalizó a través de la georreferenciación de mapas cartográficos mediante herramientas otorgadas por SIG.
- **Catastro histórico:** El *catastro histórico de RM* se obtuvo analizando imágenes satelitales históricas de Google Earth Pro, principalmente entre los meses junio y diciembre del periodo comprendido entre los 2000 y 2020, permitiendo registrar además su ubicación y tamaño. Gran parte de la información recopilada en este catastro fueron corroborados por el registro de puntos entregado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y Municipalidad de San Pedro de la Paz.
- **Vegetación:** La vegetación se estudió en base a imágenes satelitales extraídas de Landsat 5 para el año 2006.

Durante esta primera etapa además, se reclasificó cada factor según el rango de susceptibilidad, siendo el valor 1 de contribución absoluta a la susceptibilidad, y 4 de contribución mínima, asignándosele un color para facilitar la interpretación de datos en el mapa de susceptibilidad (Tabla 7). Se calculó el peso relativo para las condiciones o rango específicos de cada factor, teniendo en cuenta su influencia en la generación de remociones en masa (Tabla 8).

**Tabla 7:** Clasificación para rango de susceptibilidad

Valor	Clasificación	Color	Descripción
1	Muy alto		El elemento contribuye absolutamente en la susceptibilidad
2	Alto		El elemento contribuye fuertemente en la susceptibilidad
3	Medio		El elemento contribuye ligeramente en la susceptibilidad
4	Bajo		El elemento contribuye mínimamente en la susceptibilidad

**Tabla 8:** Reclasificación de factores condicionantes asociados a su peso relativo

Parámetro	Factor			
Geomorfología	<b>Pendiente</b>			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	[40-90[	1	A partir de la generación SIG de un modelo de elevación digital (DEM) de resolución 5x5, otorgado por empresa privada de rubro forestal.
	Alto	[25-40[	2	
	Medio	[15-25[	3	
	Bajo	[0-15[	4	
	<b>Orientación</b>			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	[0-45[, [270-360[	1	SIG de un DEM con resolución 5x5, otorgado por empresa privada de rubro forestal; evaluando la posición con respecto al Norte. Se modifico en base a la información entregada por Brignardello (1997) y Lara (2007).
	Alto	[45-90[, [225-270[	2	
	Medio	[90-135[, [180-225[	3	
	Bajo	[90-135[, [180-225[	4	
	<b>Red Hídrica</b>			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	Presenta	1	Shapefile de red hídrica otorgado por MOP 2023; se verificó mediante fotointerpretación utilizando imágenes satelitales.
	Bajo	No presenta	4	
	<b>Altura</b>			
Clasificación	Rango	Peso	Detalle	
Muy alto	[25-120[	1	Se delimitó un polígono en SIG, de manera manual para la clasificación altimétrica designada, considerando las curvas de nivel extraídas del DEM 5x5, otorgado por empresa privada de rubro forestal. Se modifico en base a la información entregada por Lara (2007) y Pierson (1990).	
Alto	[15-25[	2		
Medio	[7.5-15[	3		
Bajo	[0-7.5[	4		
Geología	<b>Litología</b>			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	Depósitos no consolidados y semi-consolidados	1	Obtenida Valenzuela et al., (2005); la cual fue georreferenciada para su utilización
	Alto	Sedimentaria	2	
	Medio	Volcánica – Volcanosedimentaria	3	
Bajo	Ígnea – Metamórfica	4		

Vegetación*	Vegetación			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	[0.4-0.45[	1	Imagen satelital Landsat 5 con bandas NDVI para la evaluación de calidad de la vegetación. Dada la antigüedad de la imagen Landsat, se ajustaron los rangos de NDVI en base a la información entregada por Weier & Herring (2000).
	Alto	[0.45-0.5[	2	
	Medio	[0.5-0.55[	3	
Bajo	[0.55-0.8[	4		
Antecedentes	Antecedentes históricos			
	Clasificación	Rango	Peso	Detalle
	Muy alto	Presenta	1	Registro de imágenes histórico de RM desde el año 2000 a 2020 en Google Earth pro, trazado en polígonos .kml
	Bajo	No presenta	4	

### 3.1.2 Segunda etapa pre terreno

Durante la segunda etapa, se utilizaron técnicas para evaluar la contribución a la inestabilidad de los factores condicionantes en terreno, determinando el peso ponderado de cada factor, otorgándole importancia relativa a la matriz realizada en Excel (Tabla 9). La información obtenida se corroboró al combinar los mapas individuales de cada factor en SIG, y observar cómo afectaban la zona, considerando además, la metodología propuesta tanto por González de Vallejo et al., (2002), Lara (2007), López (2013) y Muñoz (2013). El cálculo de razón de consistencia fue de 0.0982, valor menor a 0.1, por lo que es válido, haciendo consistentes los valores de ponderación de los factores.

**Tabla 9:** Factores condicionantes en matriz AHP para la zona de estudio

FACTORES	Pendiente	Litología	Orientación	Vegetación	Altura	Antecedentes	Red hídrica
Pendiente	1	1	5	4	3	2	4
Litología	1.0	1	2	3	2	2	4
Orientación	0.2	0.7	1	4	4	2	3
Vegetación	0.3	0.4	0.3	1	2	4	2
Altura	0.4	0.7	0.3	0.7	1	2	2
Antecedentes	0.7	0.5	0.5	0.3	0.7	1	2
Red hídrica	0.3	0.3	0.4	0.7	0.7	0.6	1

Tras este procedimiento se obtuvieron las ponderaciones necesarias para obtener el *mapa de susceptibilidad* mediante SIG, el cual permitió designar los puntos de mayor interés, y evaluarlos así durante la salida a terreno.

### 3.1.3 Tercera etapa pre terreno

A lo largo de la tercera etapa se consideraron los factores extrínsecos, de precipitación y área siniestrada por incendios forestales para determinar el nivel de peligrosidad.

En el *primer caso* se reclasificaron los umbrales de precipitación, adaptando la información propuesta por Lumb y, Hauser; con datos tanto de precipitaciones acumuladas como el promedio para el periodo de Abril, Marzo, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre correspondientes desde el año 2000 a 2020; los datos de precipitación diarios fueron obtenidos de las estaciones “Las Pataguas”, “Andalien”, “Concepción Edif MOP”, “Concepción DGA”, “Río Bio bío desembocadura”, “Estero Hualqui desembocadura”, “Laja” y “Carampangue”, recopilados a través de la Dirección General de Aguas

(DGA), además de la información pluviométrica mensual adquirida de la estación meteorológica “Carriel Sur”, ubicada en la provincia de Concepción.

Durante la recopilación de datos de precipitación se obtuvieron vacíos de información, ya sea falta de valores diarios o mensuales e incluso semestrales para algunas estaciones, a los cuales no se les hizo relleno por correlación de Pearson utilizando las otras estaciones. La definición de umbrales de precipitación se obtuvo por la relación de intensidad y duración de la lluvia, propuesto por Lumb (1975), y cómo se relaciona con la ocurrencia de RM. Este análisis de recurrencia histórica permitió identificar la relación entre el nivel de precipitaciones y los eventos desencadenados en el pasado.

Para el *segundo caso*, se tuvo en cuenta la superficie siniestrada para la zona de interés, información adquirida del servidor habilitado por el sitio web de NASA (2023), el que permitió observar los eventos puntuales ocurridos mes a mes desde noviembre del año 2000 hasta diciembre del año 2020. El área quemada se obtuvo por la relación intensidad y duración del incendio, asociando los puntos a polígonos shapefile en SIG.

### 3.2 Etapa de terreno

Esta etapa consiste en el reconocimiento del área de estudio, utilizando la información generada mediante el mapa en SIG; si bien el estudio se realizó para la ruta de la Madera, se determinaron únicamente tres puntos de interés a lo largo de esta, registrados en coordenadas UTM para el huso WGS 84 / UTM zone 18S (Tabla 10), designados como más relevantes, los que se registraron en un GPS portátil para su posterior evaluación en terreno.

*Tabla 10: Lugares de interés para la evaluación de peligrosidad en terreno*

Punto	Localización		ESTADO DE MOVIMIENTO
	ESTE	NORTE	
1	677983.76 m E	5905718.59 m S	Activo
2	679215.11 m E	5905496.47 m S	Activo
3	679901.18 m E	5905465.93 m S	Activo

Dos salidas a terreno se realizaron en condiciones climáticas óptimas (sin precipitación) los días 18 y 28 de noviembre de 2023, con el fin de validar la información recopilada y generada durante la etapa previa y, además, efectuar la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR) para la evaluación de peligro mediante la toma de nuevos datos (Figura 8 (a), (b), (c), (d), (e), (f)).



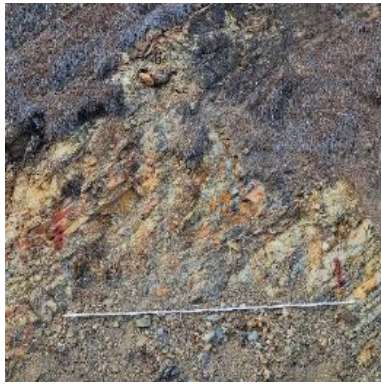
(a)



(c)



(e)



(b)



(d)



(f)

*Figura 8: Estaciones geomecánicas, con sistemas de clasificación de Bieniawski para la Estación 1 (a, b), Estación 2 (c, d), Estación 3 (e, f). Fotografías tomadas en 2023 para la evaluación de terreno.*

### 3.3 Etapa post terreno

Los índices de calidad de macizos rocos se relacionaron con sus parámetros geotécnicos, teniendo en cuenta la norma ISRM (1978) para el índice de resistencia de la roca; este procesamiento de datos se llevó a cabo con la clasificación geomecánica de Bieniawski, mediante un análisis realizado en Excel. Se obtuvo el grado de peligrosidad para los puntos designados.

## 4 RESULTADOS

Los resultados se interpretaron siguiendo la clasificación presentada anteriormente, procesos que se detallan a continuación:

### 4.1 Etapa pre terreno

Los resultados de la etapa pre terreno se conforman por tres partes:

#### 4.1.1 Primera etapa pre terreno

Se definieron 4 parámetros, con 7 factores condicionantes (Tabla 11), los parámetros más relevantes según la clasificación AHP fueron geomorfología y geología, con un 60% y 21% de ponderancia en el estudio respectivamente. Los factores con mayor incidencia en la susceptibilidad son pendiente y litología, con ponderaciones de 28% y 21% respectivamente.

*Tabla 11: Parámetros y factores condicionantes con sus ponderaciones máximas sobre la influencia en la susceptibilidad de la zona*

Parámetro	Factor	Porcentaje máximo
Geomorfología	Pendiente	28%
	Orientación	17%
	Redes hídricas (F <sub>3</sub> )	6%
	Altura (F <sub>4</sub> )	9%
Geología	Litología (F <sub>5</sub> )	21%
Vegetación	Vegetación (F <sub>6</sub> )	11%
Antecedentes	Antecedentes históricos (F <sub>7</sub> )	8%
Sumatoria		100%

La *pendiente* es uno de los factores más importantes a considerar, donde las vertientes de grados más altos fueron determinantes durante la evaluación de la generación de RM, las que, potenciadas por intervención antrópica aportaron a la inestabilidad. Las pendientes de mayor influencia, es decir, aquellas entre 40° – 90° abarcan un total de 1,027 km<sup>2</sup>, aproximadamente un 10% la zona de interés (Tabla 12).

**Tabla 12:** Superficie afectada y su porcentaje relativo clasificado por rangos de pendiente

Rango (°)	Peso	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
[40-90[	1	102,728	1,027	10
[25-40[	2	447,991	4,480	42
[15-25[	3	244,347	2,443	23
[0-15[	4	266,093	2,661	25
<b>Total</b>		<b>1,061,159</b>	<b>10,612</b>	<b>100</b>

El grado de exposición al sol está fuertemente ligado a la *orientación*, lo que significa acción erosiva y meteorización. Este aspecto influye en las condiciones de humedad, vegetación y condiciones de permeabilidad del suelo. Se tiene un total de 2,039 km<sup>2</sup> de superficie orientada principalmente al Norte, en la zona de interés, significando un 23% del área de la zona de interés sometida a alta susceptibilidad (Tabla 13).

**Tabla 13:** Superficie afectada y su porcentaje relativo clasificado según rangos de orientación con respecto a la exposición solar

Rango (°)	Peso	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
[0-45[, [270-360[	1	203,880	2,039	23
[45-90[, [225-270[	2	237,233	2,372	26
[90-135[, [180-225[	3	254,668	2,547	28
[90-135[, [180-225[	4	201,076	2,011	22
<b>Total</b>		<b>896,858</b>	<b>8,969</b>	<b>100</b>

El principal *sistema fluvial* del área de estudio corresponde al río Bio bío, que limita la ciudad de Concepción por el SW, con un drenaje que proviene del SE (Quezada, 1996). La escorrentía generada por la red hídrica puede transportar agua proveniente de precipitaciones; esta red forma un 9.4% de la zona de interés (Tabla 14).

**Tabla 14:** Superficie afectada y su porcentaje relativo según la presencia de redes de escorrentía

Rango	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
Con redes	91,060	911	9.4
Sin redes	970,099	9,701	90.6

Considerar la *altura* de una ladera o talud tiene gran relevancia para entender la potencialidad de desequilibrio para la generación de una RM. En la zona de interés, es decir, para zonas aledañas a la ruta de la Madera se obtuvieron 2,759 km<sup>2</sup> de superficie que estaba entre 25 m y 120 m sobre el nivel de la carretera, representando más de la mitad del trayecto de la zona de interés (Tabla 15).

**Tabla 15:** Superficie afectada y su porcentaje relativo clasificado por rangos de altura

Rango (m)	Peso	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
[25-120[	1	275,944	2,759	55
[15-25[	2	40,523	405	8
[7.5-15[	3	40,609	406	8
[0-7.5[	4	148,915	1,489	29
<b>Total</b>		<b>505,991</b>	<b>5,060</b>	<b>100</b>

La *litología* de la zona estudiada se considera como un factor determinante, al tener una gran influencia para la generación de eventos de remoción en masa. Los depósitos no consolidados y semi consolidados aportan absolutamente a la inestabilidad del talud, conformando un 22% del área del área total (Tabla 16). Si bien las rocas metamórficas e ígneas contribuyen mínimamente a la inestabilidad, la evaluación en terreno permitió reconocer el muy alto grado de alteración y meteorización, además de estar bajo una capa de suelo conformado por derrubios y vegetación baja

**Tabla 16:** Superficie afectada y su porcentaje relativo clasificado según litología

	Rango (°)	Peso	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
Depósitos no consolidados y semi-consolidados		1	258,183	2,582	22
Ígnea – Metamórfica		4	929,210	9,292	78
<b>Total</b>			<b>1,187,393</b>	<b>11,874</b>	<b>100</b>

Se designaron las zonas con menor calidad de *vegetación* como áreas de mayor susceptibilidad a sufrir eventos de remoción en masa. Las superficies de menor calidad de vegetación para las fechas previas a eventos de RM ocurridas entre los años 2006 y 2007, denotan 1,008 km<sup>2</sup>, es decir, el 10% del área se encuentra con mayor exposición a susceptibilidad (Tabla 17).

**Tabla 17:** Superficie afectada y su porcentaje relativo clasificado según la calidad de la vegetación

Rango (°)	Peso	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
[0.4-0.45[	1	100,800	1,008	10
[0.45-0.5[	2	122,220	1,222	13
[0.5-0.55[	3	147,870	1,479	15
[0.55-0.8[	4	590,224	5,902	61
<b>Total</b>		<b>961,115</b>	<b>9,611</b>	<b>100</b>

Los *antecedentes históricos* registrados de eventos de remoción en masa se obtuvieron desde el data set histórico de imágenes satelitales de Google Earth Pro. Entre los años 2002 y 2023 se registraron un total de 49 eventos de RM para la zona de estudio, donde 35 ocurrieron entre 2006 y 2007. De estos últimos, la superficie aparente movilizada en promedio es de 1,843 m<sup>2</sup> durante las RM ocurridas entre 2006 y 2007, además, el registro de la mayor superficie movilizada en este rango de fecha fue de 6,789 m<sup>2</sup> y la menor de 45 m<sup>2</sup>. La suma total del área datada para los 35 eventos es de 81,101 m<sup>2</sup> (Tabla 18).

**Tabla 18:** Superficie afectada y su porcentaje relativo para 35 eventos de RM ocurridos en la zona de interés entre 2006 y 2007

Eventos	Estadísticas	Área (m <sup>2</sup> )
35 eventos de RM ocurridos en la zona de interés entre 2006 y 2007	Sumatoria	81,101
	Promedio	1,843
	Máx.	6,789
	Mín.	45
	Desv. Est.	1,791

#### 4.1.2 Segunda etapa pre terreno

Se elaboró un *mapa de susceptibilidad* de la zona de estudio en la ruta de la Madera (Figura 9), considerando todos los factores condicionantes y sus ponderaciones obtenidas de la matriz AHP. Con ello, se escogieron tres puntos a evaluar en terreno, simplificando el estudio para la evaluación de peligrosidad:

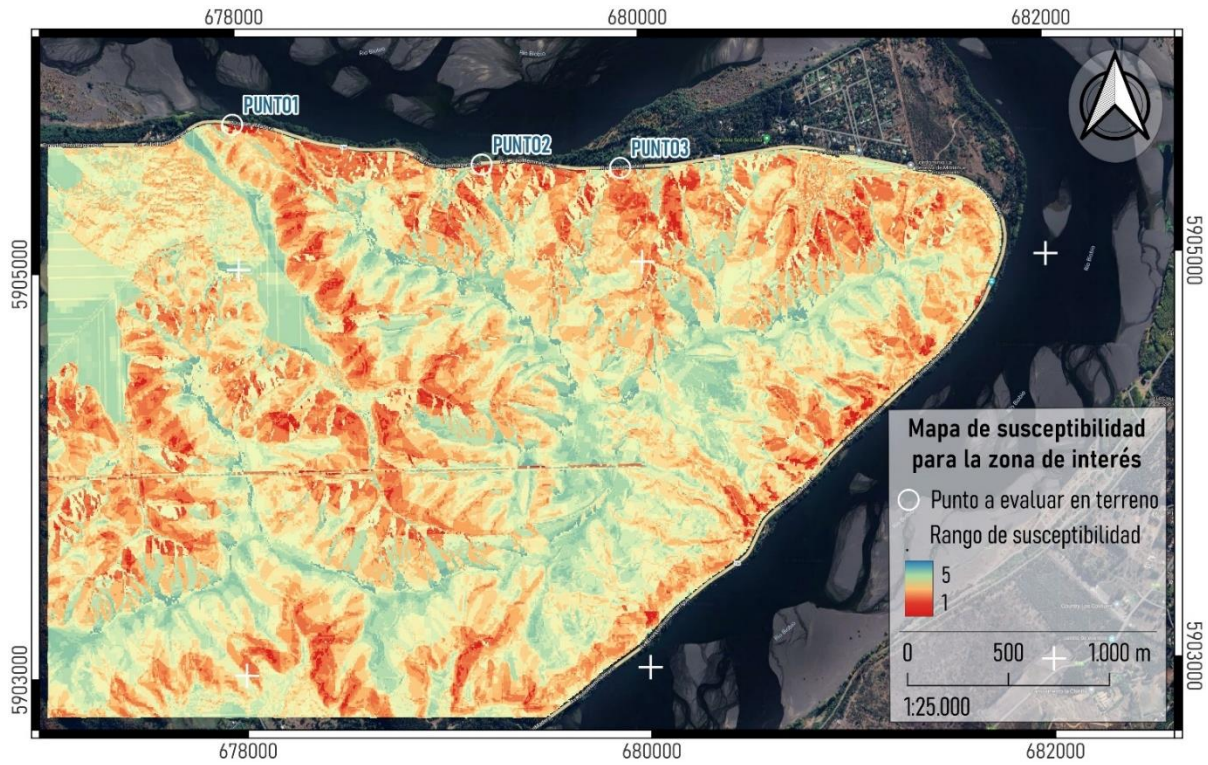


Figura 9: Mapa de susceptibilidad de la zona de interés

### 4.1.3 Tercera etapa pre terreno

Para el estudio de *factores desencadenantes*, se realizó un análisis histórico de las distintas *estaciones pluviométricas*, tomando el promedio de 2 meses a la vez entre abril y septiembre, desde el año 2000 hasta 2020. Se destaca que durante el año 2006 y, 2014 se alcanzó un valor máximo durante los meses junio – julio, superando la media para el resto de los años (Figura 10).

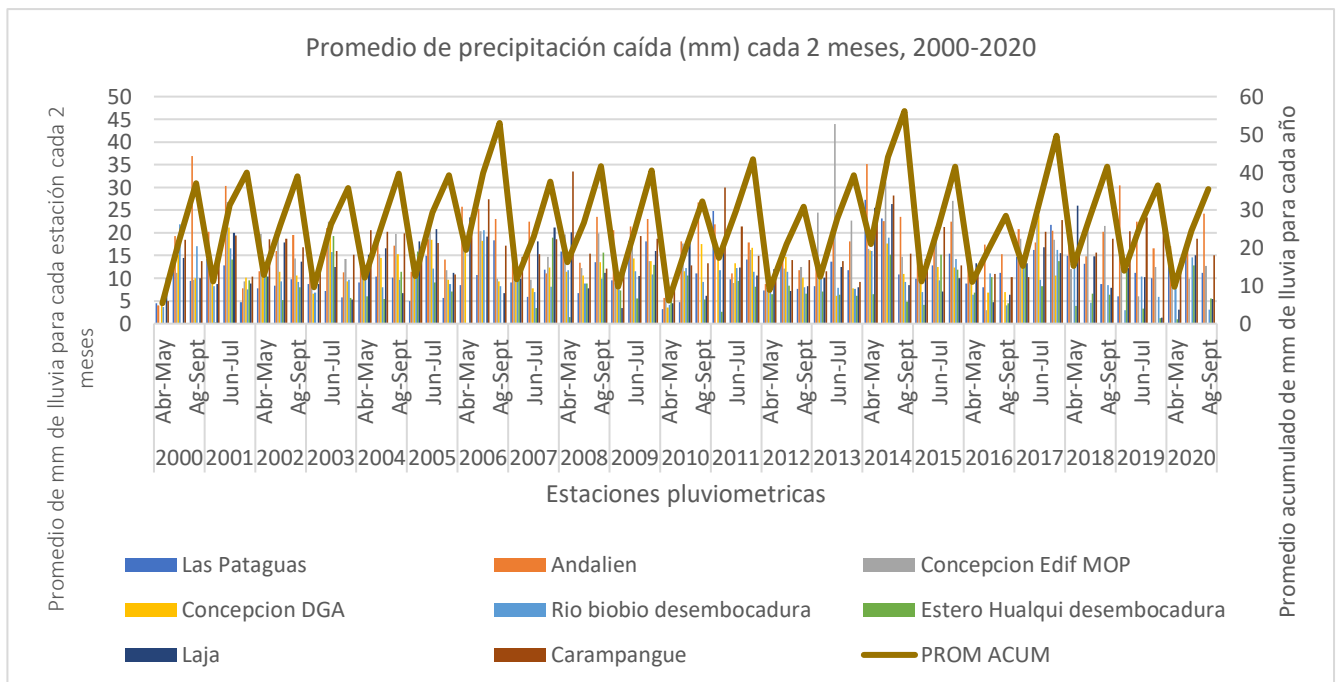


Figura 10: Promedio de precipitación caída en milímetro cada dos meses entre el año 2000 a 2020

Se calculó el promedio mensual para los meses Abril, Mayo, Junio y Julio, por estación entre los años 2000 y 2020 (Tabla 19), omitiendo celdas sin información. Se tiene que la mayor concentración de lluvia

para cada estación se da en su gran mayoría durante el mes de Junio a lo largo del promedio de 20 años, y en una tasa menor para Julio.

**Tabla 19:** Promedio mensual de precipitaciones por estación entre los años 2000 a 2020

ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS	2000-2020				Promedio
	Abril	Mayo	Junio	Julio	
Las Pataguas	9.8	12.2	13.8	10.3	11.5
Andalién	15.7	18.7	20.3	17.9	18.2
Concepción Edif MOP	9.9	17.7	17.4	19.3	16.1
Concepción DGA	9.3	12.6	15.1	13.6	12.6
Rio Bio bío desembocadura	8.6	9.7	13.7	10.5	10.6
Estero Hualqui desembocadura	5.1	7.8	8.8	9.8	7.9
Laja	11.9	14.7	14.7	14.3	13.9
Carampangue	15.8	18.0	19.0	18.4	17.8
Promedio	10.8	13.9	15.3	14.3	13.6

El año 2006 tiene valores sobresalientes de mm de precipitación en 24 horas, según la información de datos pluviométricos diarios, se destaca el mes de abril, junio y julio, siendo en este último donde se alcanzaron valores extraordinarios en un periodo corto de tiempo. Se registraron valores mayores a 100 mm de agua caída en 24 horas durante el 10 de julio, 2006 (Tabla 20).

**Tabla 20:** Valores atípicos de mm de precipitación intensa en 24 horas ocurridos durante el año 2006

Fecha	Las Pataguas	Concepción Andalien	Concepción MOP	Concepción DGA	Laja	Carampangue	PP promedio
18, abr,06	70.0	64.0	70.9	60.3	50.0	45.0	60.0
06, jun,06	-	69.0	-	69.3	88.0	50.0	69.1
10, jul,06	61.0	140.0	-	112.5	59.0	40.0	82.5

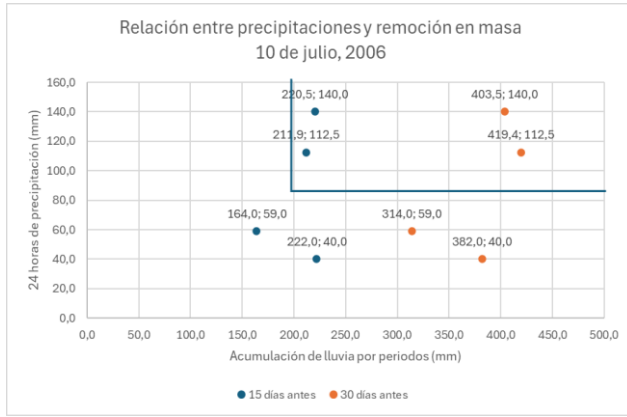
Siguiendo con la metodología de Lumb, se tiene que la precipitación media máxima acumulada durante los 15 días previos a la fecha (10 de julio, 2006) es de 204.6 mm de lluvia (Tabla 21, Figura 11 (a)), y de 255.9 mm de precipitación acumulada durante los 18 días previos (Tabla 22, Figura 11 (b)), la lluvia antecedente media de 30 días se aproxima a 380 mm. Para este análisis se consideraron únicamente aquellas estaciones sin falta de datos.

**Tabla 21:** mm de precipitación en 24 horas para el 10 de julio, 2006, 15 y 30 días previos

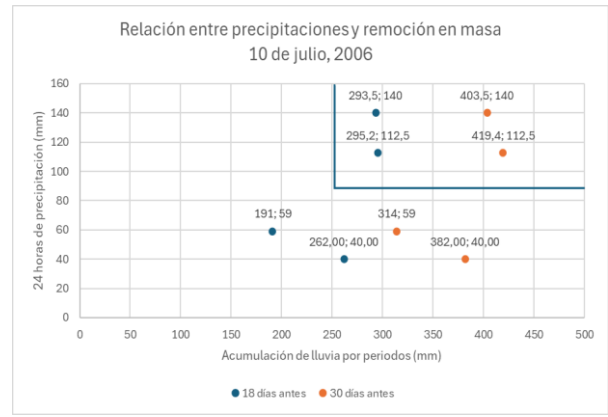
	Andalién	Concepción DGA	Laja	Carampangue	Promedio
24 horas	140.0	112.5	59.0	40.0	87.9
15 días antes	220.5	211.9	164.0	222.0	204.6
30 días antes	403.5	419.4	314.0	382.0	379.7

**Tabla 22:** mm de precipitación en 24 horas para el 10 de julio, 2006, 18 y 30 días previos

	Andalién	Concepción DGA	Laja	Carampangue	Promedio
24 horas	140.0	112.5	59.0	40.0	87.9
17 días antes	293.5	295.2	191.0	262.0	255.9
30 días antes	403.5	419.4	314.0	382.0	379.7



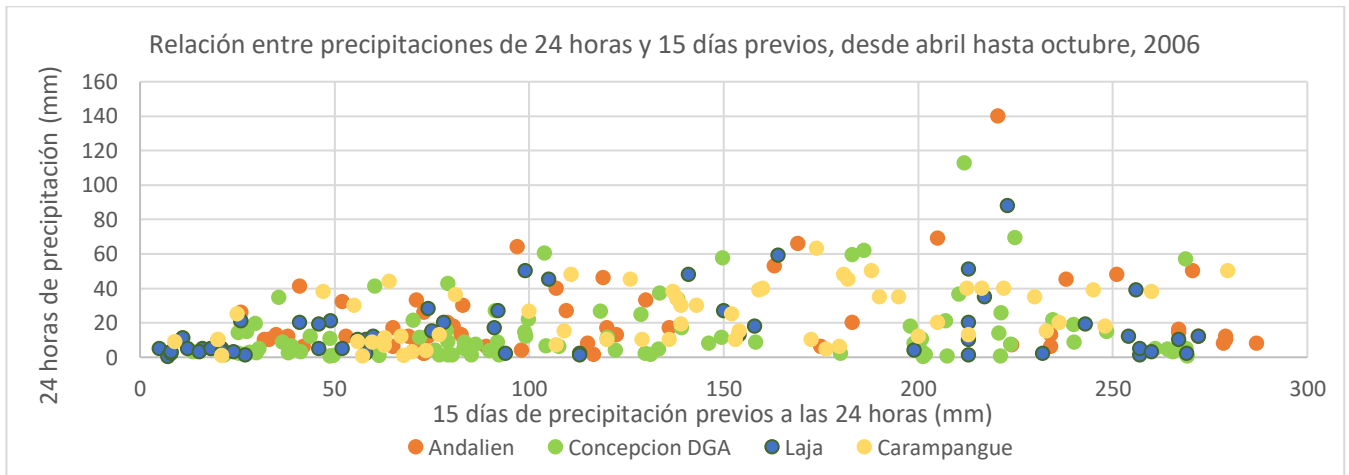
(a)



(b)

**Figura 11:** Estimación de la relación entre mm de precipitación en 24 horas con respecto a su acumulación previa para (a) 15 y 30 días previos, (b) 18 y 30 días previos

La relación entre 24 horas de precipitación y los 15 días previos para el periodo entre abril y octubre del año 2006, teniendo en cuenta distintas estaciones (Figura 12). La media de valores de precipitación para las estaciones no supera los 80 mm en 24 horas, por otro lado, la acumulación de mm de lluvia durante los 15 días previos no muestra tendencia.

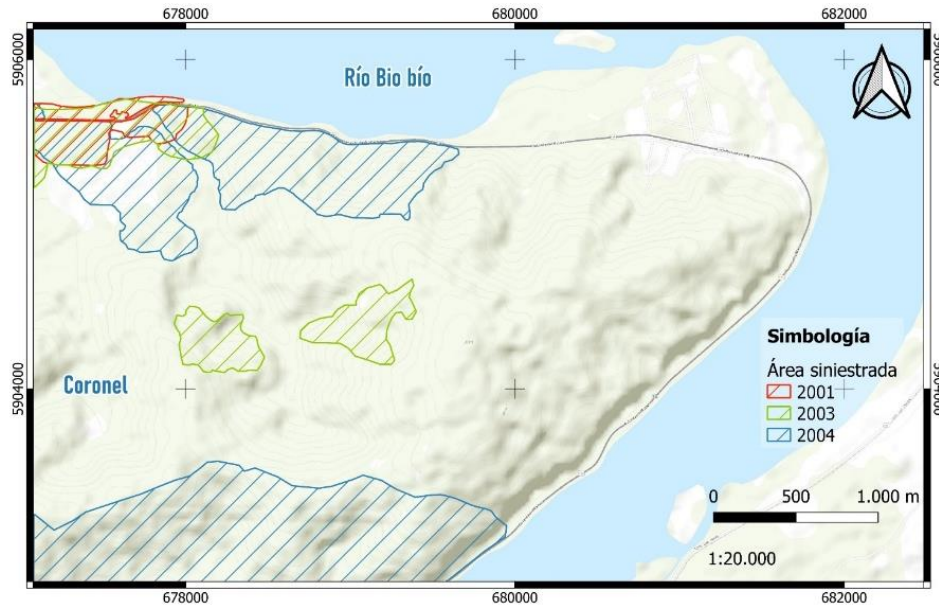


**Figura 12:** Relación entre precipitaciones de 24 horas y sus 15 días previos, entre abril y octubre del año 2006 para estimar umbrales de generación de RM

Se estima que 3,656 km<sup>2</sup> de superficie fueron siniestradas como consecuencia de un *incendio forestal* en la zona de interés, previos a las RM ocurridas entre 2006 y 2007 (Tabla 23), esto durante el año 2001 y 2004. El incendio de mayor magnitud ocurrió durante el año 2004, donde se incineró el 75% del área de interés (Figura 13). Estos incendios cambiaron la morfología de la zona, consumiendo la vegetación y dando paso a material suelto poco permeable.

**Tabla 23:** Superficie afectada y su porcentaje relativo en el área de interés para zonas siniestradas por incendio forestal previo a RM datados en 2006 - 2007

Año	Área (ha)	Área (km <sup>2</sup> )	%
2001	25,458	255	7
2003	67,286	673	18
2004	272,859	2,729	75
Total	365,602	3,656	100



**Figura 13:** Mapa representativo del alcance de incendios forestales durante los años 2001, 2003 y 2004 para la zona de estudio

#### 4.2 Etapa post terreno

Los puntos de evaluación Rock Mass Rating (RMR) evaluados en terreno corresponden a macizos rocosos compuestos de roca metamórfica con varios grados de fracturamiento. La predominancia de roca observada es de esquistos micáceos, además de feldespatos, y en menor proporción cuarzos. La calidad de los macizos rocosos en los puntos evaluados es de regular a mala.

El “Punto 1” posee un grado de meteorización alto, y con ello un grado de fracturación desfavorable, alta rugosidad y con contenido de humedad. El “Punto 2” evaluado en terreno posee un RMR regular, indicando que el macizo rocoso tiene una calidad moderada en términos de estabilidad y resistencia, alto contenido de suelo suelto, y húmedo. El “Punto 3” posee un RMR malo, compuesta en gran parte por roca descompuesta o desintegrada en suelo residual, indicando alteración muy alta; presenta flujo de agua goteando (Tabla 24).

**Tabla 24:** Resultados de evaluación RMR en terreno

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Valor RMR	39	41	30
Clase	IV	III	IV
Clasificación	Malo	Regular	Malo

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zona de estudio posee taludes de mala calidad, inestables y poco seguros como consecuencia de factores propios del suelo que favorecen la ocurrencia de movimiento de material. Sin embargo, el principal factor desencadenante de estos eventos son las precipitaciones, sobre todo en zonas de mayor pendiente, con alto grado de meteorización, escasa vegetación y alta exposición solar.

La metodología propuesta por Lumb permitió analizar las precipitaciones ocurridas el 10 de julio, 2006, donde se considera un umbral medio de 87.9 mm de precipitación en 24 horas para las estaciones evaluadas, 204.6 mm de lluvia previa de 15 días, o bien 255.9 mm de lluvia previa para 18 días, además de 379.7 mm para 30 días anteriores. Se estima que posterior a esta fecha y a causa de la sobresaturación del suelo tras el periodo de precipitaciones acumuladas, se desencadenaron 35 eventos de remoción en masa en la zona de interés. A su vez, se estiman un total de 81,101 metros cuadrados de superficie afectada tras estos eventos.

La relación entre el área siniestrada por incendios forestales y el mapa de susceptibilidad, utilizando la metodología de polígonos en base a puntos expuestos en el servidor de NASA, no demostró tener gran correlación. Sin embargo, se recomienda encarecidamente la generación de un modelo predictivo de incendios forestales, a través de la identificación y delimitación de incendios, con el uso de teledetección para el índice de calcinación normalizada (NBR).

Tras verificar la mala calidad geomecánica de los 3 puntos designados al estudio con RMR, se avala la potencialidad de generación de movimientos en masa. Esto a causa de la mala cohesión del material por la meteorización, litología y pequeños tamaños de bloques. Los tipos de procesos morfogénicos predominantes para la movilización de material inestable en los puntos seleccionados de la ruta corresponden tanto a procesos mixtos, como a deslizamiento rotacional, además de caída de roca y detritos.

Se sugiere altamente la verificación in situ para las zonas de alto rango de susceptibilidad expuestas en la Figura 9, mediante sistemas de clasificación geomecánicos en terreno. Para la mejor gestión de peligro de RM son necesarios más estudios y análisis detallados de precipitaciones, con la determinación de umbrales de precipitación máxima en horas, y su probabilidad de desencadenar eventos en áreas que fueron siniestradas.

El uso de técnicas de teledetección para la obtención de datos asociados a la peligrosidad ya sea en terrenos de difícil acceso o como un estudio preliminar, otorga variados beneficios. Entre ellos la cobertura de grandes áreas para mapeo de forma digital, optimizando la gestión de recursos monetarios y tiempo del estudio a ejecutar, y precisión de la ubicación de los datos a evaluar. Sin embargo, aunque la teledetección ofrece una visión valiosa del terreno, es necesaria la validación de datos en terreno.

Esta investigación consideró 20 años de información bibliográfica, con enfoque para el año 2006 tras registrarse una mayor cantidad de eventos de RM, los cuales siguen reactivándose incluso hoy en día (2024).

**AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios, por bendecirme cada día. A mis padres Tatiana y César, y a mis hermanos César y Romina, por su eterno apoyo incondicional durante mi formación universitaria, aún de manera remota. A Miguel Ángel por coincidir conmigo todos estos años de experiencia universitaria.

A los amigos que hice en el camino, que siguen presentes en mi vida y a aquellos ausentes, fueron parte fundamental de esta travesía. A mi profesor guía, y a los profesores apasionados por la enseñanza, a todas las personas de las que pude aprender, muchas gracias. Al apoyo, colaboración y confianza depositados en mi por el equipo de Dirección de Investigación, UCSC.

El presente artículo se enmarca en la tesis de pregrado “Evaluación de peligrosidad de remoción en masa tras incendios forestales y su exposición a precipitaciones en la Ruta de la Madera, región de Bio bío, Chile” para optar al título de Ingeniera Civil Geóloga.

## 6. BIBLIOGRAFÍA:

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods*. 2nd edition, John Wiley & Sons, INC.
- Anderson, S., & Sitar, N. (1995). Analysis of rainfall induced debris flows. En J. G. Engrg.. Members, ASCE.
- Araya Parra, S. (2014). *Análisis de Susceptibilidad por Remoción en masa en el valle Las Trancas y Termas de Chillán. Criterios para el manejo del riesgo*. Concepción: Universidad de Concepción, Dirección de Postgrado.
- Azimi, S., Nikraz, H., & Yazdani-Chamzini, A. (2018). Landslide Risk Assessment by using a New Combination Model based on a Fuzzy Inference System Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 4263-4271.
- Baéz Carvajal, F. (2020). *Evaluación y zonificación del peligro de remociones en masa en ruta G-25 camino al volcán, San José de Maipo, región Metropolitana*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Bangar, K. (2020). *Principals of Engineering Geology*. India: Standard Publishers Distributors.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and pretroleum engineering*. The Pennsylvania state university: A Wiley-Interscience publication.
- Brignardello, L. (1997). Proposición metodológica para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. *Revista de Geografía Norte Grande 24 : 91 - 102*, Instituto de geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Campo-II. (2009). *Mapa geológico del sector costero de provincia de Concepción*. Concepción: Universidad de Concepción.
- CONAF. (2016). *Incendios Forestales en Chile*. Ministerio de agricultura - Gobierno de Chile .
- CR2, C. f. (2020). *Incendios en Chile: causas, impactos y resiliencia*. Articles in scientific journals.
- Cruden. (1991). A SIMPLE DEFINITION OF LANDSLIDE. *Bulletin of the International Association of ENGINEERING GEOLOGY*, 1-3.
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. *Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 36-75.
- EM-DAT. (1 de 1 de 2008). *EM-DAT*. Obtenido de <https://www.emdat.be>
- Figuroa, G. (2020). *Caracterización hidrogeológica de Talcahuano entre los 36°44' - 36°49's y 73°00' - 73°08'w, Región del Bio bío, Chile*. Concepción: Universidad de Concepción.
- González de Vallejo et al. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: PEARSON Prentice Hall.
- González de Vallejo, L. (2002). Taludes. En *Ingeniería geológica* (págs. 430-487). PEARSON Prentice Hall.
- González et al. (2020). *Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia*. Santiago: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.
- Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. California: John Wiley & Sons.
- Goodman, R., & Bray, J. (1976). Toppling of Rock Slopes. *Proceedings of the Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, 2, 201-234.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Universidad de Zaragoza: Pearson Educación, S. A. .
- Hauser. (1993). *Remociones en masa en Chile*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hauser. (2000). *Remociones en masa en Chile (Versión Actualizada)*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Havenith, H. B., & Bourdeau, C. (2010). *Earthquake-induced landslide hazards in mountain regions: A review of case histories from Central Asia*. *Geologica Belgica*, 13, 137-152.

- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Geological Survey of Canada: USGS science for a changing world.
- Highland, L., & Brobowski, P. (2008). *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. Geological Survey of Canada.
- Inostroza, D. (2017). *Aplicación del modelo conceptual para procesos de remoción en masa a un talud de la ruta Ch-160, Lota, región del Bio bío*. Concepción: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humbolt [IAvH]. (2006). Los sistemas de información geográfica. Universidad de los Andes, San Cristobal, Venezuela: Journal Article SR Electronic.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). (2011). *Manual de estimación del riesgo ante movimientos en masa en laderas, Cuaderno técnico*. Perú.
- Keefer, D. K. (2002). *Investigating landslides caused by earthquakes - A historical review*. U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Road MS 977, Menlo Park, CA 94025, USA.
- Lacasse, S., Nadim, F., & Kalsnes, B. (2010). Living with Landslide Risk. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 41 No.4*, 1-13.
- Lara, M. (2007). *Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicaciones en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, región Metropolitana*. Universidad de Chile.
- Lara, M., & Sepúlveda, S. (2006). *Remociones en masa*. Santiago: Universidad de Chile.
- Lopez Filun, P. (2013). *Evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, región de Biobío (Chile)*. Concepción: ResearchGate.
- López, E., Posada, C., & Moreno, J. (1998). Los sistemas de información geográfica. Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones : Asociación Andaluza de Ciencia Regional: Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional.
- Lumb, P. (1975). Slope failures in Hong Kong. Department of Civil Engineering, University of Hong Kong.
- Moreno, J. (2002). *El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Universidad de Zaragoza: Dpto. Métodos Estadísticos. Facultad de Económicas.
- Muñoz, E. (2013). *Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas. Estudio de caso en Viña del Mar, V Región*. Universidad de Chile. Departamento de geología.
- Napoli, M. D., Marsiglia, P., Martire, D. D., Ramondini, M., Ullo, S. L., & Calcaterra, D. (2020). *Landslide susceptibility assessment of wildfire burnt areas through earth-observation techniques and a machine learning-based approach*. [www.mdpi.com/journal/remotesensing](http://www.mdpi.com/journal/remotesensing) : remote sensing MDPI.
- NASA. (2023). *Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. Obtenido de NASA FIRMS: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@0.0,0.0,3.0z>
- National Weather Service. (2015). *Post wildfire flash flood and debris flow guide*. Los Angeles/Oxnard: National oceanic and atmospheric administration, U.S. Department of commerce/ Weather-Ready Nation.
- ONEMI. (2017). *Plan específico de emergencia por variable de riesgo: Remoción en masa*.
- Ortigao, J. A., & Sayao, A. S. (2004). *Handbook of slope stabilisation*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07680-4>.
- Pierson, L. (1990). *Rockfall Hazard Rating System*. Committee on Engineering Geology.
- Quezada, J., Cecione, A., Esterio, H., & Pineda, V. (1997). *Geología Urbana de Talcahuano*. Antofagasta: Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

- Ramos, D. (2019). *Combinación de bandas en imágenes de satélite Landsat y Sentinel*. Obtenido de MappingGIS, Formación que impulsa tu perfil GIS. Certificado por QGIS: [https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/#Indice\\_de\\_Vegetacion\\_de\\_Diferencia\\_Normalizada\\_NDVI](https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/#Indice_de_Vegetacion_de_Diferencia_Normalizada_NDVI)
- Ray, R., & Jacobs, J. (2007). *Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events*. Nat Hazards, Springer Science+Business Media B.V.
- Rengers, F. K., McGuire, L. A., Oakley, N. S., Kean, J. W., Staley, D. M., & Tang, H. (2020). *Landslides after wildfire: initiation, magnitude, and mobility*. Landslides, Technical note.
- Rivera, J., & Varela, F. (2018). *Análisis de viabilidad de la Ruta 156 de la Madera. Planificación y gestión de infraestructuras*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, J., & Olivella, R. (2009). *Introducción a los sistemas de información geográfica*. Barcelona, España: Universidad Oberta de Catalunya (UOC).
- Rodríguez, M. J. (2009). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos. Doctoral dissertation, Universidad de Alcalá*.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co.
- Sarkar, S. (2018). *Landslide Risk Assessment in Parts of the Darjeeling Himalayas, India. In Integrating Disaster Science and Management: Global Case Studies in Mitigation and Recovery*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Sepúlveda, S. (1998). *METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN AMBIENTES MONTAÑOSOS: APLICACIÓN EN LA QUEBRADA LO CAÑAS, REGIÓN METROPOLITANA*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.
- Sergieieva, K. (2022). *EOS Data Analytics*. Obtenido de Índices De Vegetación En La Agricultura Digital: <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>
- SERNAGEOMIN. (2022). *Guía de contenidos exigidos en estudios de peligro de remociones en masa evaluados por SERNAGEOMIN, en el contexto de permisos municipales*. Gobierno de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Sykas, D. (2020). *Spectral Indices with multispectral satellite data*. Obtenido de Geo University (GU): <https://www.geo.university/pages/blog?p=spectral-indices-with-multispectral-satellite-data>
- Universidad de Concepción. (2009). *MAPA GEOLÓGICO DEL SECTOR COSTERO PROVINCIA DE CONCEPCIÓN. Geología de Campo II*. Concepción: Universidad de Concepción.
- USGS. (2023). *Landsat Normalized Difference Vegetation Index*. Obtenido de Landsat Missions. Science for a changing world: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>
- USGS. (2023). *Science for a changing world*. Obtenido de Natural Hazards | U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/science/faqs/natural-hazards>
- Varnes, D. J. (1978). Landslides, Analysis and Control. En *Slope Movement Types and Processes* (págs. Chapter 2, p. 11 - 33). Transportation Research Board.
- Westen, C. V. (1993). *GISSIZ: training package for Geographic Information System in slope instability zonation*. ITC. Publication. Vol. 1 N° 15: 245 pp. Enschede.
- Wiekzorek, G. (1996). Landslide triggering mechanisms. En G. Wiekzorek, *Landslide Triggering Mechanisms in Landslides* (págs. Chapter 4, p. 76 - 90). Washington, DC: A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores.
- Wyllie, D. (2017). *Rock Slope Engineering: civil applications*. Boca Ratón, Estados Unidos: Taylor & Francis,.