

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A MOVIMIENTOS EN MASA MEDIANTE MODELO CONCEPTUAL MULTIVARIADO EN LADERAS DEL CERRO EL SANTO, COMUNA DE TOMÉ, REGIÓN DEL BIOBÍO.

F. Muñoz Acuña¹, C. Arias Tapia² y R. King St-Onge³

RESUMEN

El sector del cerro El Santo, ubicado en la comuna de Tomé, presenta un significativo peligro geológico dada sus características intrínsecas físico-naturales y la significativa intervención humana, lo cual ha provocado condiciones de inestabilidad en algunas de sus laderas. Es por esto, que el objetivo del presente estudio es evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa en las laderas que presentan condiciones potenciales para desencadenar estos tipos de procesos geológicos. Para aquello se realiza un modelo conceptual y un análisis jerárquico multivariado, considerando los factores condicionantes y desencadenantes más incidentes en el área de estudio, identificando de qué forma y magnitud afectan a la estabilidad de las laderas analizadas. Entre los factores de estudio se encuentra la geología y meteorización, geomorfología, meteorología, intervención humana, afectación por incendios forestales y vegetación. Se obtiene como resultado de esto, que las tres laderas de estudio representan zonas potencialmente susceptibles a la generación de movimientos en masa, con grados de susceptibilidad que varían desde bajo a alto. Esto se debe en gran medida, a la presencia de rocas metamórficas con grados variables de meteorización y a la inclinación significativa del terreno, la cual fluctúa entre los 20° y 48°. Los factores desencadenantes son las precipitaciones y la intervención humana. Las principales medidas de mitigación sugeridas consisten en la canalización de escorrentía superficial de aguas lluvias, así como también implementar medidas de prevención y control de incendios forestales para evitar una nueva pérdida de vegetación en el sector. Finalmente, es esencial educar y concientizar a la comunidad sobre los riesgos asociados a los procesos de movimientos en masa.

PALABRAS CLAVES: Movimientos en masa; Riesgos naturales; Análisis Multivariado.

ABSTRACT

The cerro El Santo area, in the community of Tomé, has a significant geological hazard due to its intrinsic physical-natural characteristics and significant human intervention, which has led to unstable conditions on some of its slopes. The objective of this study is to evaluate the susceptibility of landslides on the slopes that present potential conditions to trigger these types of geological processes. For this purpose, a conceptual model and a multivariate hierarchical analysis are carried out, considering the most common conditioning, and triggering factors in the study area, identifying the manner and magnitude in which they affect the stability of the slopes analyzed. Among the factors studied are geology and weathering, geomorphology, meteorology, human intervention, forest fires and vegetation. As a result, the three study slopes studied represent areas potentially susceptible to the generation of landslides, with degrees of susceptibility ranging from low to high. This is largely due to the presence of metamorphic rocks with varying degrees of weathering and the significant slope of the terrain, which fluctuates between 20° and 48°. The triggering factors are precipitation and human intervention. The main mitigation measures suggested consist of channeling surface runoff of rainwater, as well as implementing forest fire prevention and control measures to prevent further loss of vegetation in the sector. Finally, it is essential to educate and raise community awareness of the risks associated with landslide processes.

KEYWORDS: Landslides; Natural Hazards; Multivariate Analysis.

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

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cesar.arias@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha evidenciado que una de las consecuencias del cambio climático corresponde a la alteración de patrones climáticos a nivel mundial, convirtiéndose en uno de los factores que impulsan el riesgo de desastres, en donde los fenómenos meteorológicos extremos se han posicionado como uno de los principales causantes de movimientos en masa (Marín *et al.*, 2021). En el caso particular de Chile, dadas sus características geomorfológicas, se ve frecuentemente afectado por movimientos de esta naturaleza detonados mayoritariamente por eventos de precipitación y por la alta sismicidad que caracteriza al país (Mardones & Rojas, 2012).

Un movimiento en masa se define como el desplazamiento en el sentido de la gravedad de una masa de suelo, roca o mezcla de ambos (Hungry *et al.*, 2014). Entre los principales factores que contribuyen a generar este tipo de procesos, se encuentran las características litológicas-geológicas del lugar; la morfología; las condiciones climatológicas; la sismología; la cobertura de vegetación y las actividades ejercidas por el hombre (Mardones & Vidal, 2001).

Robledo (2023) señala que la comuna de Tomé al igual que en muchas otras localidades del país, presenta una fuerte dinámica de expansión y densificación urbana sobre sus cerros y áreas periféricas, lo cual genera un cambio morfológico urbano (Figura 1a). Por tal razón, se comienza a urbanizar sobre zonas de laderas pronunciadas sin ningún tipo de control y planificación, sin un grado de consideración sobre los factores de riesgo natural, aspectos morfológicos y diseño urbano (López & López, 2004). De este modo, se van generando en el territorio escenarios propensos a desarrollar algún tipo de movimiento en masa, representando un peligro latente para la población que vive en estos lugares.

Durante el mes de febrero de 2023, múltiples incendios forestales afectaron a la región del Biobío, consumiendo miles de hectáreas de bosques, causando cuantiosas pérdidas y una gran cantidad de damnificados. Uno de los sectores que se vio afectado en la comuna de Tomé fue el cerro El Santo, donde gran parte de la ladera sureste fue consumida por las llamas (Figura 1b). Un incendio producto de la eliminación de la cubierta vegetal, vuelve al terreno susceptible a sufrir erosión y facilita la infiltración de agua, lo que conlleva la saturación de este mismo (Caon *et al.*, 2014).



Figura 1: Imágenes comparativas respecto a la afectación por incendio forestal, urbanización e intervención antrópica en las laderas del cerro El Santo. a) Estado de laderas en el año 2013. b) Estado actual de laderas, año 2023. (Imágenes extraídas de Google Earth).

En la evaluación técnica efectuada por Ramírez (2023), cuyo objetivo era evaluar la condición de estabilidad de las laderas del cerro El Santo luego de haber ocurrido el incendio, se constataron una serie de condiciones de inestabilidad en las laderas, generadas en parte por las características físico-naturales propias del sector, tales como laderas con pendientes pronunciadas y una litología metamórfica con grado variable de meteorización. También se evidenció una intervención antrópica significativa en el lugar, ya que existen cortes artificiales para la instalación de viviendas y trazado de caminos, lo que implica deforestación, acumulación de escombros y alteración en el drenaje natural de la ladera. La interacción de estas condiciones puede aumentar la probabilidad de ocurrencia de algún tipo de proceso de movimiento en masa, específicamente en los meses de invierno producto de las precipitaciones.

El área de estudio, correspondiente a las laderas en la mitad sur del cerro El Santo, se encuentra ubicada en la parte occidental de la comuna de Tomé, perteneciente a la región del Biobío (Figura 2a y 2b), ubicada a 30 km al norte de la capital regional, Concepción y a 508 km al sur de la capital del país, Santiago. El área de estudio se divide en tres subáreas, correspondiente a la Ladera Este, Ladera Sureste y Ladera Suroeste (Figura 2c).

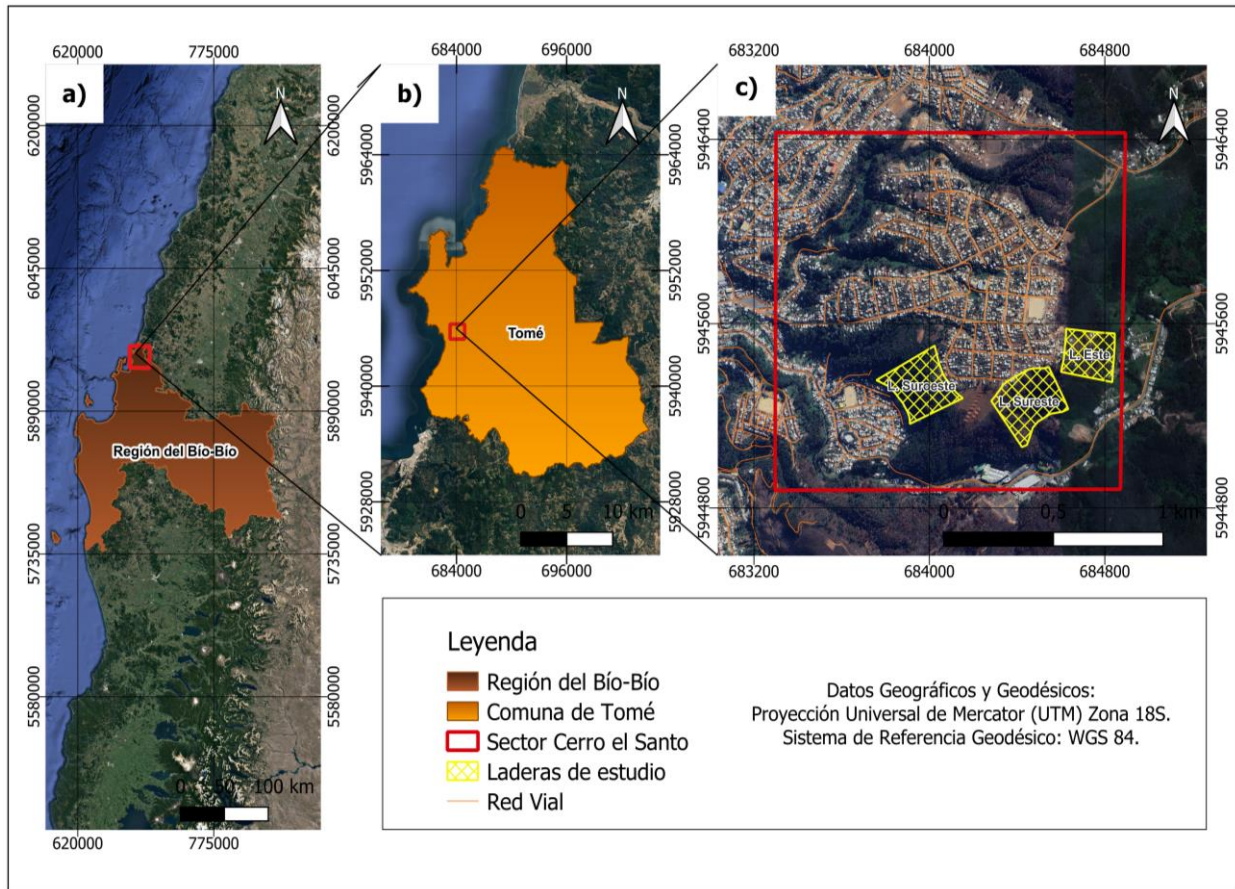


Figura 2: Mapa de ubicación del área de estudio. a) En la región del Biobío. b) En la Comuna de Tomé. c) En el sector cerro El Santo, señalando las subáreas: Ladera Este, Ladera Sureste y Ladera Suroeste. (Elaboración propia).

El objetivo del presente estudio es analizar la susceptibilidad a movimientos en masa mediante un modelo conceptual en las laderas de la mitad sur del cerro El Santo. Para ello, es necesario identificar y caracterizar tanto los factores condicionantes como los factores desencadenantes que inciden en la zona de estudio, mediante investigación bibliográfica y reconocimiento en terreno, y a partir de aquello evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa mediante un proceso de análisis jerárquico multivariado y recomendar principios generales de mitigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos asociados al riesgo

El peligro hace referencia a eventos físicos, procesos naturales, incidentes tecnológicos o humanos que son potencialmente dañinos y pueden generar pérdidas o heridos, daños a la propiedad, alteración social y económica y/o alteración del ambiente de un área determinada en un cierto periodo de tiempo (Ocola, 2005). Es posible estimar el peligro mediante la susceptibilidad y el análisis de los factores desencadenantes del proceso estudiado. La susceptibilidad se define como la predisposición que tiene un lugar o área a experimentar una amenaza, influenciada por factores condicionantes y desencadenantes (Becerra, 2006).

Se consideran factores condicionantes a aquellos que dependen del terreno de estudio, ya sea de su naturaleza, estructura y forma (González de Vallejo, 2002). Por otra parte, se llaman factores desencadenantes a aquellos factores que en un corto plazo entre causa y efecto modifican la estabilidad preexistente del terreno, mediante el rápido aumento de esfuerzos o reduciendo la resistencia del material del terreno (Wieczorek, 1996).

Se denomina vulnerabilidad a las condiciones que aumentan el potencial grado de daños o pérdidas de cierto elemento luego de la ocurrencia de un fenómeno de intensidad determinada. Este depende de las características del elemento y de la intensidad del fenómeno (González de Vallejo, 2002).

Finalmente, el concepto de riesgo corresponde a las pérdidas potenciales de vidas humanas, personas damnificadas, daños a las estructuras, entre otros; en consecuencia, a la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984). Se define como el grado esperado de pérdida en un grupo humano debido a un fenómeno natural particular, en función del peligro y de la vulnerabilidad (Hyndman & Hyndman, 2011).

2.2. Movimientos en masa

2.2.1. Definición

Los movimientos en masa, o también llamados procesos de remoción en masa, son definidos por Hauser (2000), como procesos gravitacionales en los cuales una porción específica del terreno se desplaza con velocidades de extremadamente lento a extremadamente rápido, hacia una cota inferior a la original en el terreno, siendo condicionados y detonados por la combinación de una serie de factores intrínsecos o externos.

2.2.2. Clasificación

Existen una serie de clasificaciones de movimientos en masa presentes en la literatura, en base a diferentes características según sea el propósito de clasificación del autor. La clasificación más utilizada es la propuesta por Cruden & Varnes (1996), llamada clasificación binomial abreviada, la cual utiliza como criterio de clasificación el tipo de movimiento y el tipo de material. El tipo de movimiento se divide en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos (rotacional o traslacional), flujos, y extensiones laterales (Figura 3). Los materiales se agrupan en dos clases: rocas y suelos, estos últimos a su vez subdivididos en detritos y tierra dependiendo si el tamaño de grano predominante en su conformación es grueso o fino, respectivamente.

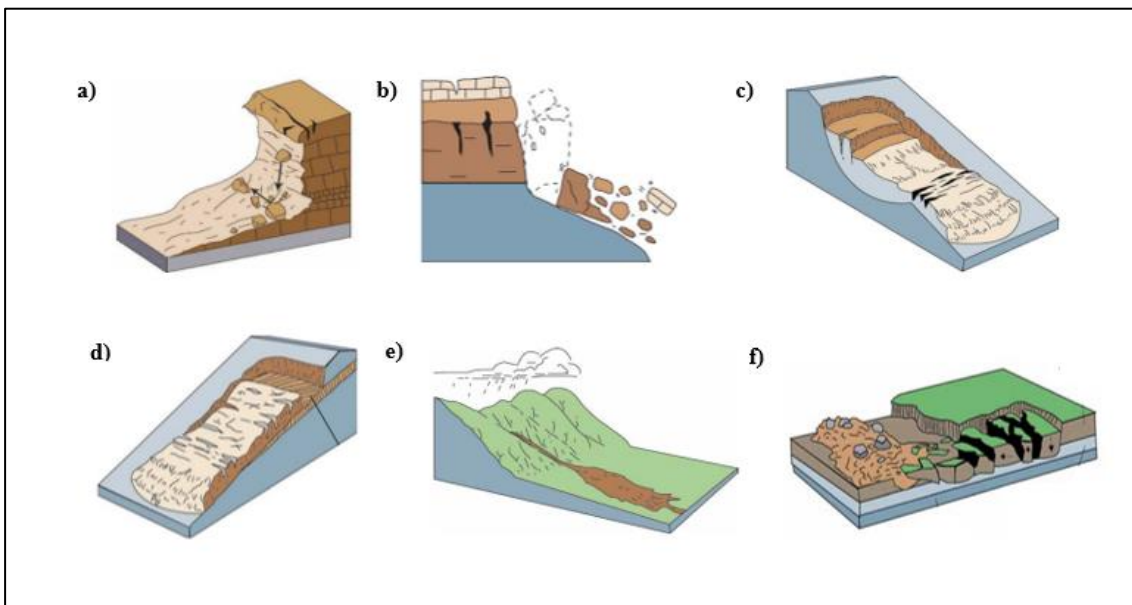


Figura 3: Tipos de movimientos en masa. a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento rotacional, d) Deslizamiento traslacional e) Flujo, f) Extensión lateral. (Modificado de Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3. Modelo conceptual

Un modelo conceptual para movimientos en masa consiste en realizar un análisis descriptivo de un conjunto de factores, tales sean condicionantes y/o desencadenantes que contribuyen a la ocurrencia de este tipo de fenómenos (Arias *et al.*, 2018). Para comprender el comportamiento de un movimiento en masa, resulta esencial conocer las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas, meteorológicas, antrópicas y el grado de cobertura vegetal en el lugar de estudio, ya que cada una de estas características proporciona información relevante para entender y en cierta medida, poder predecir el comportamiento de una ladera o talud.

El aspecto geológico y geotécnico están considerablemente relacionados e influyen en diferente grado en la generación de eventos de movimientos en masa. En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud o ladera. En el caso de macizos rocosos, el principal factor condicionante es la estructura geológica, la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturación (González de Vallejo, 2002).

Los factores hidrológicos, tales como la red de drenaje, variaciones del nivel freático, coeficientes de escorrentías e infiltración, causan cierto efecto producto de la incorporación de agua en suelos y macizos rocosos (Lara & Sepúlveda, 2008). La presencia de agua en la estructura de un suelo puede ocasionar la saturación de éste mismo, presentando una disminución de la resistencia de los materiales que lo componen, debido a la disminución de la tensión efectiva a causa de la generación de presiones de poros (Lambe & Whitman, 1972).

El desencadenamiento de movimientos en masa por causas meteorológicas está estrechamente relacionado con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones en relación con su régimen climático (González de Vallejo, 2002). De tal modo que, precipitaciones intensas durante horas o días pueden desencadenar movimientos superficiales, como deslizamientos, flujos y caídas de bloques rocosos, en cambio los movimientos más profundos, obedecen a periodos de lluvias a largo plazo, durante semanas o meses (González de Vallejo, 2002).

La vegetación es un factor condicionante que debe ser analizado, debido a que puede favorecer la estabilidad de una ladera o talud, como también promover la inestabilidad. La presencia de vegetación reduce el efecto erosivo y contribuye a la estabilidad de las laderas, debido a que sus sistemas radiculares absorben humedad y aportan a la cohesión del terreno (Tarbuck *et al.*, 2005). El efecto contrario ocurre cuando el peso de los árboles favorece la inestabilidad, así como por las fuerzas dinámicas transmitidas por el viento a través de los troncos de los árboles (Marín-Sánchez & Osorio, 2017).

La influencia que ejerce el ser humano sobre el medio ambiente está dada por acciones como las excavaciones, construcciones, rellenos, sobrecargas, deforestación, desequilibrio hídrico y el fenómeno del cambio climático, que alteran el equilibrio de los taludes y laderas, lo que conlleva a un posible movimiento en masa (González de Vallejo, 2002).

2.4. Análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés, *Analytic Hierarchy Process*) desarrollado por Saaty (1980) es un método cuantitativo, utilizado para resolver problemas complejos de criterios múltiples a través de una estructura jerárquica en la cual el objetivo final se encuentra en el nivel más elevado, y los criterios y subcriterios en los niveles inferiores (Yepes, 2018).

Una vez definida la estructura jerárquica, se comparan los criterios de cada grupo mediante un matriz de comparación directa de a pares utilizando una escala fundamental de preferencia (Tabla 1).

Tabla 1: Escala fundamental de preferencia. (Modificado de Saaty, 1980).

Valor	Definición	Comentarios
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy fuerte	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios de los anteriores, cuando es necesario matizar	

Luego de comparar cada uno de los factores y, en consecuencia, asignándole un valor de 1 a 9, se elabora una matriz cuadrada, denominada matriz de decisión (Figura 4), cuyo objetivo es obtener un peso relativo de cada factor para cuantificar su importancia ante la generación de un eventual movimiento en masa. Esta matriz cumple con las propiedades de reciprocidad (si $a_{ij}=x$, entonces $a_{ji}=1/x$), homogeneidad (si i y j son igualmente importantes, $a_{ij}=a_{ji}=1$ y, además, $a_{ii}= 1$ para todo i), y consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada) (Yepes, 2018).

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 4: La matriz de decisión es una matriz A de dimensiones $n \times n$ con elementos a_{ij} , donde a es el valor de cada comparación para cada criterio $i= 1, 2, \dots, n$, y $j= 1, 2, \dots, n$. (Toskano, 2005).

Una vez obtenida la matriz se puede calcular la prioridad de cada criterio de comparación, para ello se debe llevar a cabo un proceso denominado sintetización, el cual en términos matemáticos consiste en calcular valores y vectores característicos (Toskano, 2005). El primer paso es, sumar los valores de cada columna de la matriz de decisión, luego con el objetivo de normalizar dicha matriz, se divide cada elemento entre el total de su columna correspondiente, obteniendo como tal la matriz de decisión normalizada. Por último, se debe calcular el promedio simple de cada fila, obteniendo el vector de peso relativo (Toskano, 2005).

Es importante en términos de calidad de la decisión final conocer la consistencia de los juicios entre las comparaciones pareadas. Para evaluar la consistencia de la matriz, se debe calcular el cociente entre el índice de consistencia (Ci) y el índice de consistencia aleatorio (Rci) representados en las Ecuaciones (1) y (2) respectivamente, obteniendo de esta forma la razón de consistencia (CR) como se muestra en la Ecuación (3).

$$Ci = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \tag{1}$$

Donde $\lambda_{\text{máx}}$ es el máximo valor propio y n es el tamaño de la matriz de decisión.

$$Rci = \frac{1,98 \cdot (n - 2)}{n} \tag{2}$$

$$CR = \frac{Ci}{Rci} \tag{3}$$

Para validar la razón de consistencia de la matriz (CR), se debe verificar si el valor obtenido se encuentra dentro del rango de consistencia indicado en la Tabla 2.

Tabla 2: Porcentajes máximos de la razón de consistencia. (Modificado de Saaty, 1980).

Tamaño de la matriz	Razón de consistencia
3	5%
4	9%
5 o más	10%

Después de haber definido las ponderaciones para cada factor, se procede a elaborar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, mediante la superposición de las capas temáticas reclasificadas considerando los valores obtenidos, aplicando de esta forma la Ecuación 4.

$$Y = C1 * X1 + C2 * X2 + \dots + Cn * Xn \tag{4}$$

2.5. Marco Geológico

Según el mapa geológico realizado por Quinzio *et al.* (2011), en la zona de estudio se identifican unidades geológicas correspondientes al Basamento Metamórfico y a una cobertura sedimentaria no consolidada de origen fluvial y marino. Estas unidades presentan una significativa diferencia de edad, siendo la primera del periodo Devónico-Carbonífero, era del Paleozoico, mientras que los depósitos no consolidados se originan en el Cuaternario, en la era del Cenozoico (Figura 5). El Basamento Metamórfico se extiende aproximadamente entre los 34° y 47° de latitud sur y ha sido dividido en dos series de acuerdo con sus características litológicas, estructurales y grado de metamorfismo, la Serie Oriental y la Serie Occidental (Aguirre *et al.*, 1972).

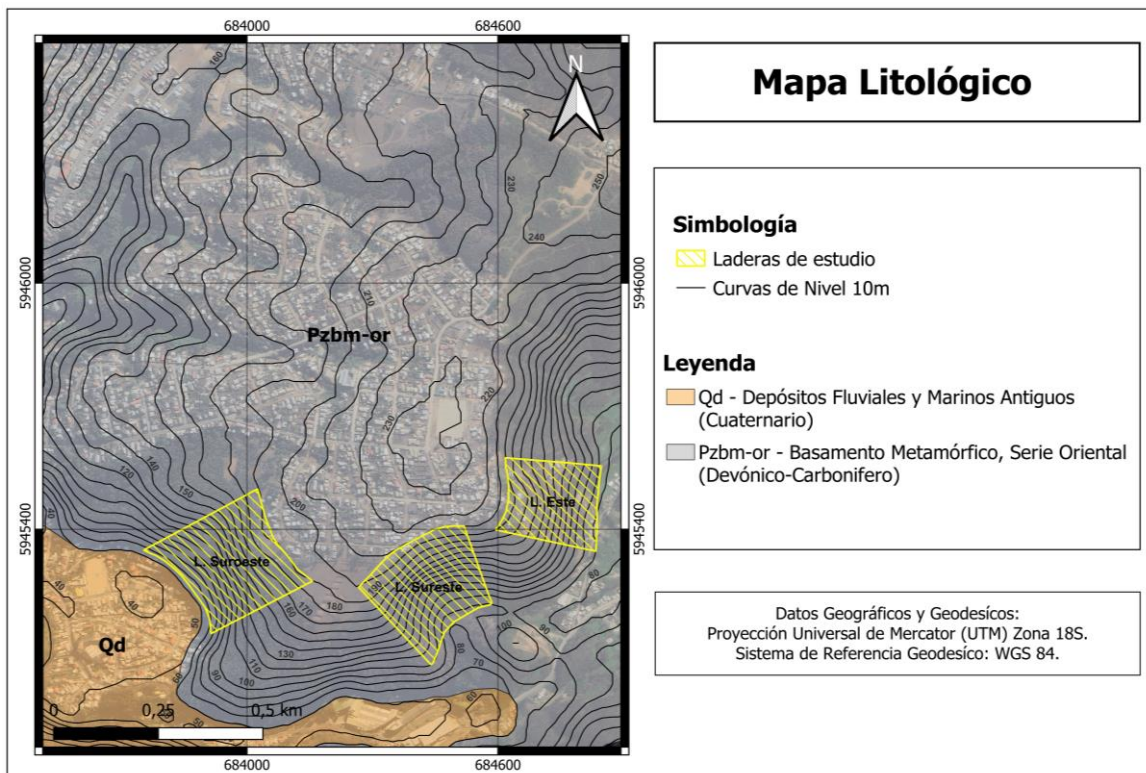


Figura 5: Mapa litológico del área de estudio. Modificado de mapa geológico del área Concepción-Tomé, región del Biobío (Modificado de Quinzio *et al.*, 2011).

En particular, el sector del cerro El Santo se ubica sobre una franja de dirección NS de rocas metamórficas de la Serie Oriental (Figura 5, Pzbn-or) (Quinzio *et al.*, 2011). Esta serie está constituida principalmente por esquistos, filitas y metareniscas (Gajardo, 1980).

En los sectores planos, estas rocas metamórficas se encuentran cubiertas hacia el oeste, por depósitos fluviales y marinos antiguos cuaternarios (Figura 5, Qd), constituidos por arenas de grano grueso a fino, asociados a lechos de ríos, zonas costeras con playa y dunas antiguas (Sepúlveda, 2022).

El proceso de meteorización se produce cuando las rocas en la superficie terrestre son fragmentadas mecánicamente (desintegradas) y/o alteradas químicamente (descompuestas) (Tarbuck *et al.*, 2005). La evaluación del grado de meteorización de las rocas se realiza mediante observación directa del afloramiento y utilizando los índices propuestos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) presentes en la Tabla 3 (González de Vallejo, 2002).

Tabla 3: Evaluación del grado de meteorización según ISRM, 1981. (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

2.6. Marco Geomorfológico

Se observan en la Figura 6 las unidades geomorfológicas de la comuna de Tome, las cuales corresponden a: 1) terrazas y plataformas de abrasión marina desarrolladas en rocas sedimentarias, metamórficas y graníticas, 2) laderas de cordones y plataformas, 3) terrazas y llanuras fluviales locales y 4) acantilado marino activo (Robledo, 2023). Al oriente de la zona costera, donde se ubica el área de estudio, se desarrolla un encadenamiento de cerros, resultando zonas con altas pendientes y con encajonamiento de quebradas y valles, en donde los suelos que se encuentran bajo este sistema presentan un alto grado de fragilidad ante procesos erosivos debido a la fuerte pendiente de sus laderas, convirtiéndose en zonas propensas a desarrollar movimientos en masa (Zelada, 2005).

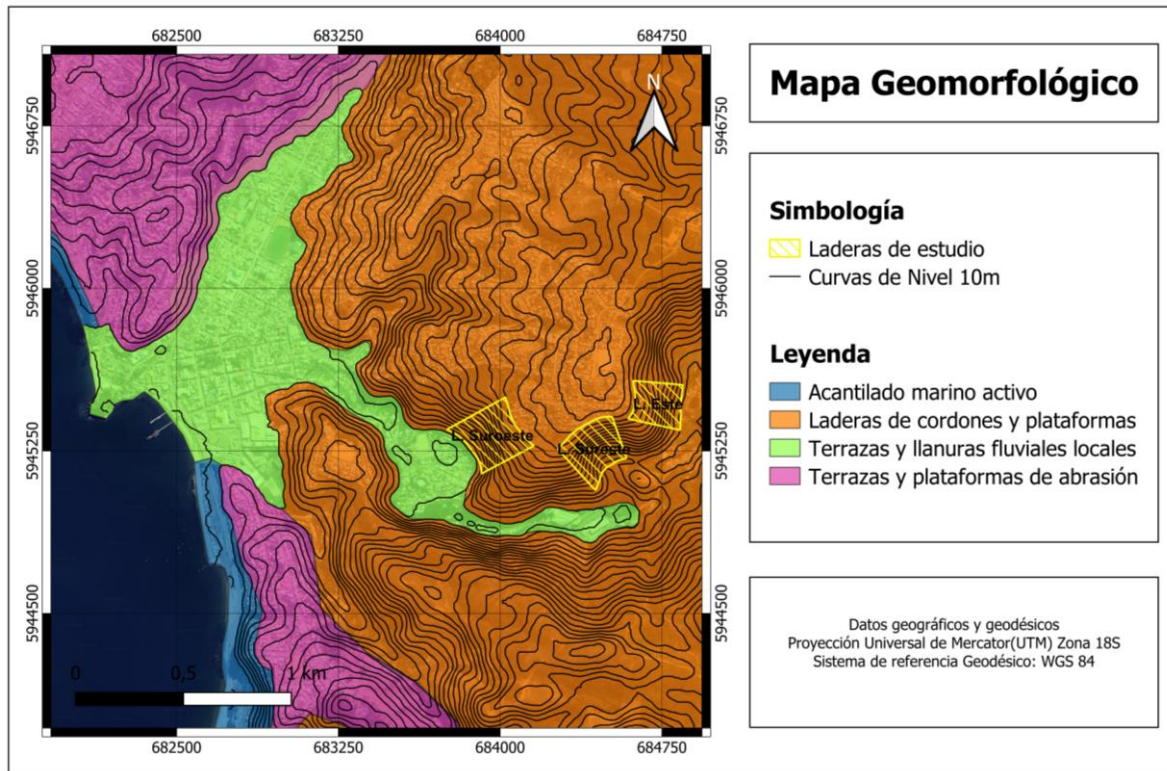


Figura 6: Mapa geomorfológico del área de estudio. (Modificado de Robledo, 2023).

Dentro de los rasgos geomorfológicos considerados como factores condicionantes más incidentes para generar movimientos en masa, se encuentran la pendiente y orientación de las laderas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de los movimientos que puedan originarse, así también, cualquier modificación de ellos puede transformar una ladera estable en inestable y generar movimientos en masa (Popescu, 2002).

La orientación de ladera es un factor geomorfológico relevante en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa, ya que afecta de manera indirecta a la estabilidad del terreno, pues la orientación determina la exposición a la radiación solar y a agentes erosivos, dentro de los cuales las precipitaciones son las que generan mayor erosión en el suelo (Carrara *et al.*, 1991).

En cuanto al relieve en particular del cerro El Santo, Ramírez (2023) indica que corresponde a las serranías de la Cordillera de la Costa con alturas que superan los 210 m s.n.m. en la meseta del cerro, mientras que, al pie de este, las alturas mínimas son cercanas a los 50 m s.n.m., de esta manera se evidencia una diferencia de altitud de 160 m. Presentando las laderas de estudio una abrupta y fuerte pendiente, que varía entre los 20° y 48°. El cerro está rodeado de laderas orientadas desde la dirección este (090°) hasta el noroeste (315°); hacia el norte se une a otros cerros del macizo cordillerano.

2.7. Características Meteorológicas del Área de Estudio

En la región del Biobío se reconoce la transición desde un clima templado seco, predominante en la zona central de Chile, a un clima templado húmedo que prevalece inmediatamente al sur del río Biobío (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017). A lo largo de la franja costera y en los sectores altos y laderas occidentales de la Cordillera de la Costa se presenta un clima templado húmedo, con una humedad constante con precipitaciones que oscilan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales, la mayor parte concentrada entre los meses de mayo y agosto (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017).

Según la clasificación climática de Köppen, la comuna de Tomé corresponde a un clima oceánico mediterráneo de verano cálido y un invierno templado frío (Csb2), en este tipo de clima las estacionalidades se encuentran fuertemente marcadas por la presencia de precipitaciones y temperaturas medias que fluctúan entre los -3°C y 18°C en los meses más fríos y superiores a 10°C en los meses más cálidos (Robledo, 2023).

La dirección del viento predominante anual en la zona de estudio proviene del sur y suroeste, por lo tanto, las laderas orientadas en esa dirección se ven mayormente afectadas por la erosión eólica. Dada la proximidad del área de estudio a la línea de la costa, las precipitaciones tienen mayor incidencia en las laderas orientadas hacia el oeste. En cuanto a la exposición solar, las laderas con dirección hacia el norte y este captan mayor radiación solar.

Es necesario superar ciertos umbrales de precipitaciones de intensidad y duración para el desencadenamiento de movimientos en masa (Wieczorek, 1996). Diversos autores han propuesto diferentes umbrales para la provincia de Concepción, destacando el estudio realizado por Mardones *et al.* (1994) en el cual indica que una precipitación superior a 80 mm en un día y/o la acumulación de tres días seguidos sobre los 100 mm, se saturan los suelos arcillosos facilitando su movimiento gravitacional. Por otro lado, Pradenas (2014) quien estudió taludes de la Ruta CH-152 (Ruta Itata), cercana al área de estudio, propone que el umbral característico de la provincia de Concepción se ve condicionado por las lluvias a largo plazo, específicamente para aquellas superiores a 44 mm en un mes. Por último, Bravo *et al.* (2016) señala que, una precipitación acumulada sobre los 100 mm en un periodo de 10 días eventualmente podría desencadenar movimientos en masa en zonas con pendientes entre los 12° y 43°.

2.8. Afectación por incendios forestales

Los principales factores asociados a causar un potencial incremento de la susceptibilidad de movimientos en masa relacionado con los incendios forestales, corresponden a la formación de niveles impermeables o repelentes, y a la pérdida de cobertura vegetal (Fuenzalida, 2014). La repelencia al agua de los suelos afectados por incendios se debe principalmente por la adición de sustancias hidrofóbicas, derivadas comúnmente de árboles con una cantidad considerable de resinas, ceras, o aceites aromáticos, tales como el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y pino (*Pinus radiata*) (Doerr *et al.*, 2000). La presencia de sustancias hidrofóbicas implica a la vez, una reducción temporal de la capacidad de infiltración, generando un incremento de la escorrentía superficial provocando alta erosionabilidad (Doerr *et al.*, 2000).

2.9. Antecedentes de Movimientos en Masa

Según los diversos informes técnicos realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), en la zona urbana más central de la comuna de Tomé se han registrado eventos de movimientos en masa desde el año 2010 (Figura 7). Durante el reciente año 2022 se registraron la mayor cantidad de este tipo de eventos geológicos, desencadenándose deslizamientos de suelo y roca, cuyos principales factores desencadenante fueron las precipitaciones y, por efecto de la intervención antrópica del lugar (Sepúlveda, 2022).

Según los registros meteorológicos de la estación Punta Parra, durante el mes de julio del 2022, se registró una precipitación acumulada de 205 mm, siendo el mes con mayor precipitación del año. Sepúlveda (2022) indica que en dicho mes se registraron 4 movimientos en masa importantes de tipo deslizamiento de roca y suelo, las cuales afectaron tanto a rutas de acceso como a viviendas en la comuna de Tomé. Las precipitaciones comenzaron el día 9 de julio con 36,3 mm/día, continuando de manera ininterrumpida hasta el día 17 de julio, con un acumulado mensual de 163,3 mm, día en el cual se detonan gran parte de los movimientos en masa anteriormente descritos.

Una característica geológica en común que tienen los diferentes lugares afectados por los movimientos registrados es el grado de meteorización de la roca debajo de la cubierta de suelo, ya que se encuentra en estado de saprolito (muy alterada), desarrollando una matriz limo arcillosa con un alto grado de plasticidad (Sepúlveda, 2022). También, existe un patrón en común relacionado con la orientación de laderas, ya que los eventos registrados han ocurrido mayoritariamente en laderas con dirección suroeste.

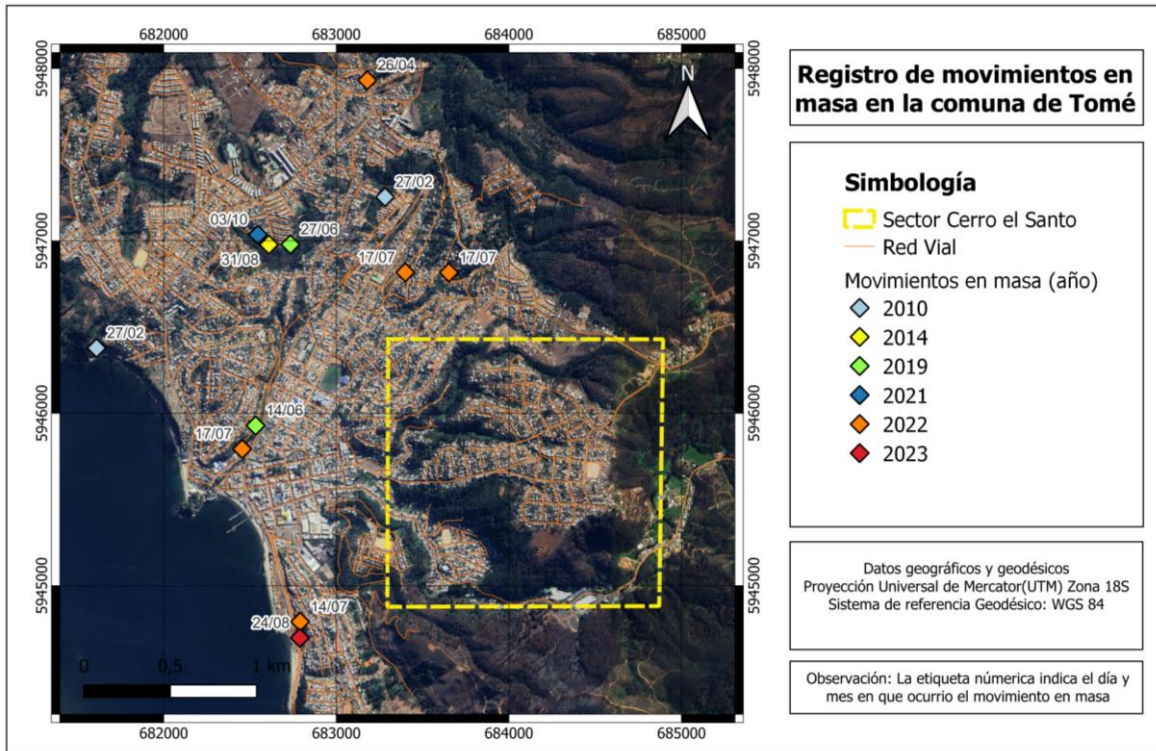


Figura 7: Registro de movimientos en masa por año, periodo temporal 2010-2023.
(Elaboración propia).

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada incluye procesos de tipo cualitativo y semicuantitativo, ya que consta en primer lugar, de un modelo conceptual, en el cual se efectúa un análisis descriptivo de los factores condicionantes y desencadenantes más incidentes en la zona de estudio. Luego a través de un proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) propuesto por Saaty (1980) se desarrolla una jerarquización de los criterios evaluados, otorgando valores cuantitativos a la importancia de cada factor estudiado, basados en la evaluación cualitativa previa. De esta forma a través de una superposición ponderada es factible elaborar un mapa de susceptibilidad, en el cual se identifiquen las zonas más susceptibles a presentar procesos de movimientos en masa y recomendar medidas de mitigación según corresponda. El proceso de trabajo se divide en 3 etapas: trabajo en gabinete, investigación en terreno y análisis mediante software.

3.1. Trabajo en Gabinete

En esta etapa se lleva a cabo una recopilación y revisión de material bibliográfico relacionado a la geología, geomorfología y condiciones meteorológicas de la zona de estudio, basado principalmente en publicaciones oficiales, tales como informes de visitas técnicas del Sernageomin, publicaciones oficiales relacionadas al tema de estudio, mapas geológicos y reportes meteorológicos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Mediante imágenes satelitales, obtenidas a partir del software Google Earth, se observa en macro el sector de estudio, identificando el grado de intervención antrópica y/o deforestación en las laderas a lo largo del tiempo, lo cual es útil para la planificación de la visita en terreno.

Para un análisis más específico del área de estudio, se descarga un modelo digital de elevación del terreno (DEM) desde la página de *Alaska Satellite Facility* (ASF) con una resolución espacial de 12,5 m, mediante el cual es posible obtener información topográfica del sector, tales como el grado de pendientes y la orientación de laderas.

3.2. Investigación en Terreno

Esta etapa consiste en observar y documentar los factores influyentes en el área de estudio, realizando un levantamiento de información relacionado con la litológica, características geomorfológicas, tipo y densidad de vegetación, alteración de laderas producto de la intervención antrópica, grado de erosión del terreno y características geotécnicas presente en el lugar.

3.3. Análisis Mediante Software

En primer lugar, consiste en utilizar el software QGIS 3.22.5 para generar capas ráster del nivel de peligro para cada uno de los factores involucrados en el AHP.

Mediante el software Microsoft Excel, se realiza el (AHP) sobre la matriz de decisión jerarquizada, en la cual se realizan los cálculos respectivos para normalizar dicha matriz y verificar que esté dentro del rango de consistencia aceptable. En consecuencia, se obtienen de manera viable los pesos relativos de cada factor estudiado con relación a la generación de un eventual proceso de movimiento en masa en la zona de estudio. Finalmente, se efectúa el análisis multivariado a partir de una superposición ponderada, la cual consiste en utilizar la calculadora ráster de Qgis 3.22.5 en donde se multiplicará cada capa ráster generada por su respectivo peso relativo, para luego sumarlas entre sí y obtener el mapa final de susceptibilidad.

4. RESULTADOS

4.1. Modelo conceptual

4.1.1. Geología y meteorización

Según lo observado en la visita a terreno, la litología del sector del cerro El Santo está conformado en su totalidad por rocas metamórficas pertenecientes a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, comprobándose la dirección N-S, con buzamientos variando entre 45° y 85°.

Según un estudio de mecánica de suelos realizado por la empresa Terrasonda (2010), el cerro El Santo posee un subsuelo de tipo arcilloso de alta plasticidad, de tonalidad café rojizo, el cual presenta una humedad natural que se sitúa entre media y alta. Según el sistema de clasificación (USCS), dicho suelo se clasifica como CH. En la visita a terreno se pudo identificar este suelo, como una mezcla de formación residual de las rocas metamórficas con aporte de materia orgánica. Cabe recordar que, las unidades litológicas con un alto contenido de arcillas han mostrado ser mucho más susceptibles a desarrollar movimientos en masa en lugares donde ocurren lluvias intensas (Borgomeo *et al.*, 2014).

La roca metamórfica se encuentra en un nivel variable de meteorización, posiblemente relacionada con la potencia de la capa de suelo, presentando planos de foliación subverticales, con una dirección aproximada de N05°E. De esta manera, en los sectores más planos, la roca se encuentra en un grado II de meteorización (Figura 8a), cubierta por hasta 60 cm de suelo (Figura 8b), mientras que, en la Ladera Sureste, con pendientes sobre los 30°, la roca se encuentra en un estado de meteorización más avanzado, en grado IV, presentando una fuerte alteración de sus minerales (Figura 8c), con una capa de suelo mucho más fina (Figura 8d).



Figura 8: a) Roca metamórfica en un grado II de meteorización. b) Horizonte de suelo de 60 cm. c) Roca metamórfica en un grado IV de meteorización. d) Horizonte de suelo de 7 cm. (Elaboración propia).

Se constató también, que la Ladera Este se encuentra cubierta de abundantes depósitos de movimientos en masa antiguos a semirecientes, en forma de brecha semiconsolidada (Figura 9a) a no consolidada (Figura 9b) respectivamente. Los clastos angulosos, presentan un tamaño de hasta 15 cm, con una matriz fina limo-arcillosa rica en óxidos de hierro.

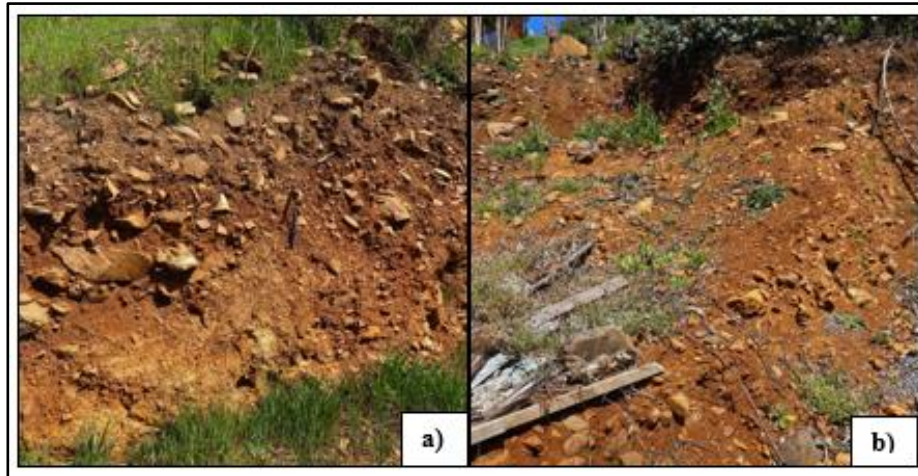


Figura 9: a) Depósito de movimiento en masa antiguo semiconsolidado.
b) Depósito de movimiento en masa semireciente no consolidado.
(Elaboración propia).

4.1.2. Factor Geomorfológico

Dado que el relieve del área de estudio corresponde a las serranías de la Cordillera de la Costa, el área de estudio presenta pendientes que oscilan entre los 0° y los 48° , predominando las pendientes entre 0° y 10° en la meseta del cerro, mientras que las zonas de ladera alcanzan los 48° (Figura 10). Es previsible mencionar que estas últimas son las zonas más propensas a generar algún tipo de movimiento en masa, considerando sus pendientes abruptas, además de que el material es más propenso a ser erosionado por las precipitaciones y por tanto a ser transportado ladera abajo.

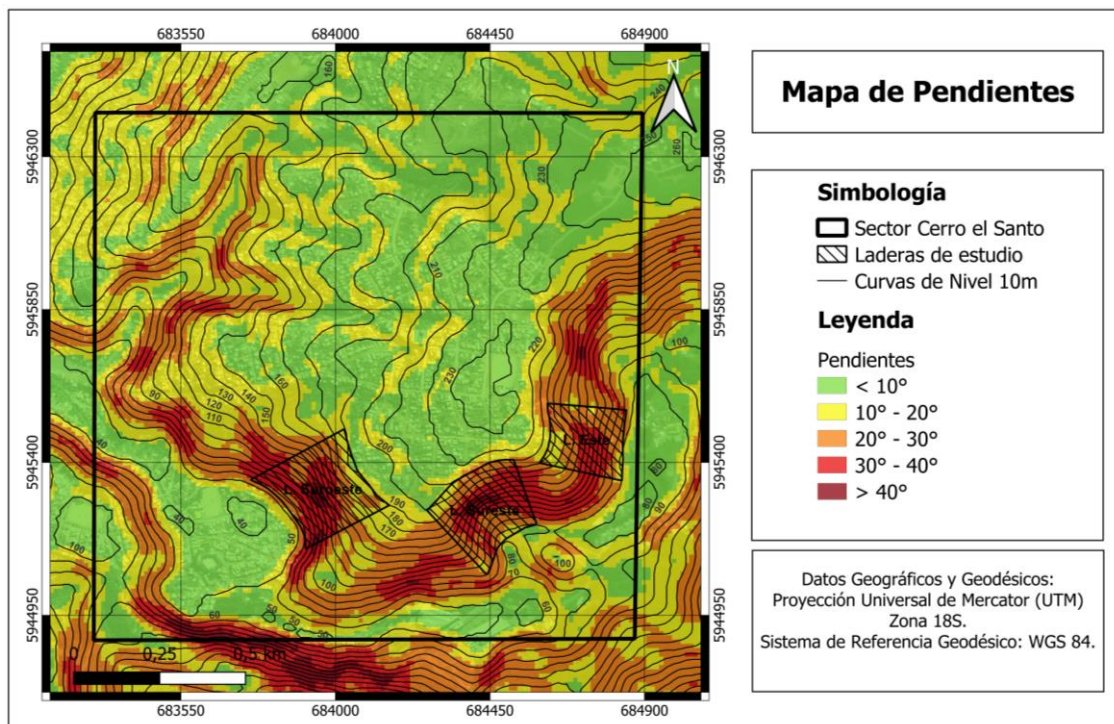


Figura 10: Mapa de pendientes del área de estudio. (Elaboración propia).

El sector de estudio no presenta canalización de aguas superficiales, esta situación favorece el escurrimiento, tanto en las calles como en las laderas, lo cual genera surcos de erosión que podrían afectar las estructuras y fundaciones de las casas emplazadas al borde de la ladera o en la ladera misma (Figura 11).



Figura 11: a) Surco de erosión hídrica en parte superior de la Ladera Este. b) Escurrimiento de agua constante desde sistema de mangueras instaladas. (Elaboración propia).

La orientación de las laderas es esencial para evaluar el impacto de los agentes erosivos y la exposición solar sobre el terreno (Figura 12). En este caso, la Ladera Suroeste y la Ladera Sureste reciben con mayor intensidad la acción erosiva del viento y de las precipitaciones, debido a que el predominio anual del viento en la comuna de Tomé posee mayoritariamente componente sur y las precipitaciones vienen desde la costa, al oeste. En cuanto a la Ladera Este, esta se ve menos expuesta a los agentes antes mencionados. En la visita a terreno se pudo corroborar esto, puesto que las dos primeras laderas presentan una mayor humedad en el terreno, destacándose la Ladera Suroeste por presentar una abundante vegetación, caso contrario la Ladera Este, la cual se evidenció notoriamente más seca.

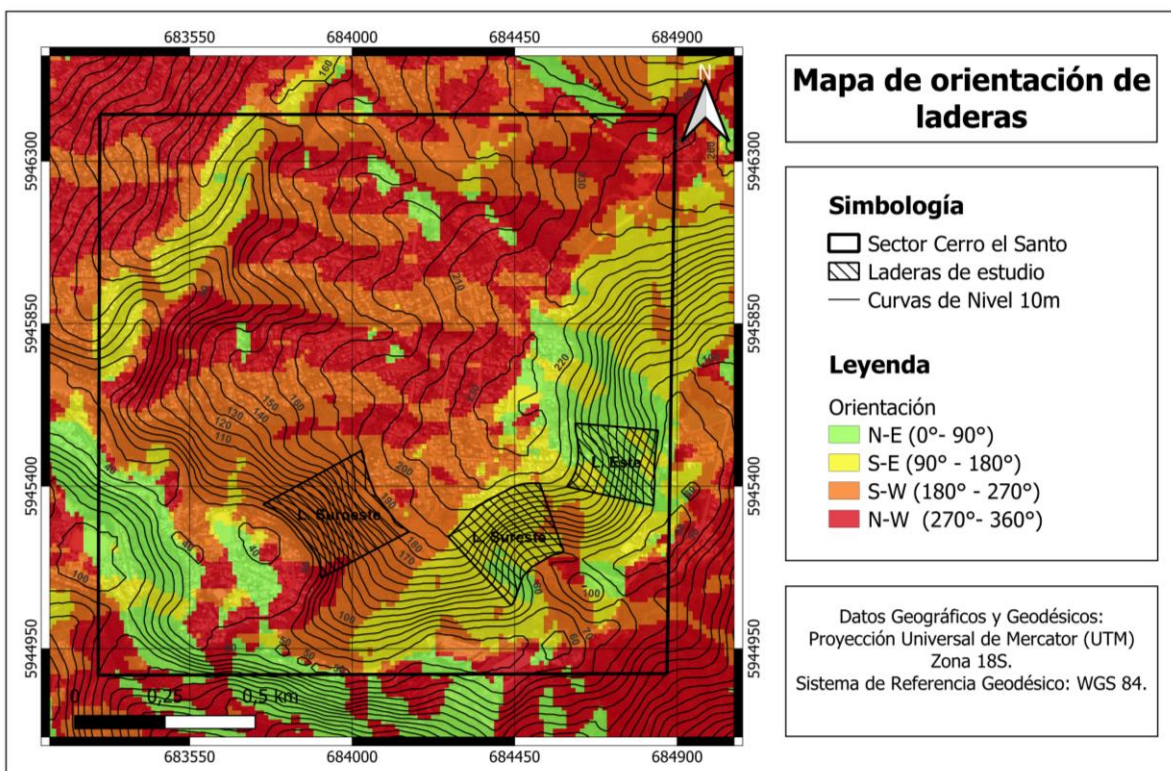


Figura 12: Mapa de orientación de laderas del área de estudio. (Elaboración propia).

4.1.3. Factor Meteorológico

A partir de los registros del INIA, se analizaron los datos de precipitación acumulada mensual entre los años 2010 y 2022 registrados por la estación meteorológica Punta Parra, ubicada a 6,5 km al suroeste del área de estudio. La Figura 13 muestra que los meses que concentran la mayor cantidad de precipitaciones corresponde a los meses de mayo a agosto, en donde se superan los 80 mm acumulados mensual promedio, siendo el mes de junio el más lluvioso alcanzando una media de agua caída de 138 mm.

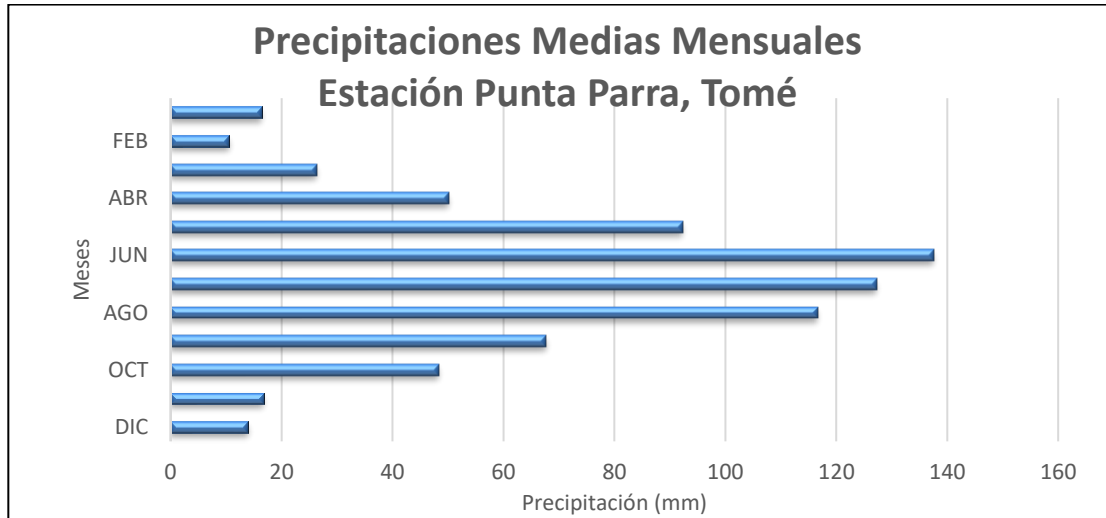


Figura 13: Precipitaciones medias mensuales de la estación Punta Parra, Tomé, durante el periodo 2010-2022. (Elaboración propia).

En el área de estudio, las precipitaciones han jugado un papel relevante en el desencadenamiento de movimientos en masa a nivel comunal. El gráfico de la Figura 14 muestra las precipitaciones diarias entre los días 1 de mayo al 31 de agosto, para el período de años 2018-2022, registrados por la estación Punta Parra, Tomé. Se observa que el máximo registro ocurrió el 27 de junio del año 2019, superando los 100 mm y, además, coincidiendo con el deslizamiento de terreno ocurrido en el conjunto habitacional Lomas de San José, cercano al área de estudio, en la misma fecha. Es importante notar que, en todos los años analizados se superaron los 100 mm acumulados en un periodo de 10 días, por lo que en zonas con pendientes entre los 12° y 43°, el aumento de susceptibilidad a movimientos en masa será significativo. Sumado a eso, en cada uno de los meses en los 5 años analizados se supera con creces el umbral mínimo de 44 mm indicado por Pradenas (2014). Es importante también notar cómo en los dos últimos años graficados (2021 y 2022) la precipitación, en vez de ocurrir de manera constante en la temporada (como pasa con los datos de 2018, 2019 y 2020), tiende a acumularse en eventos de pocos días de duración.

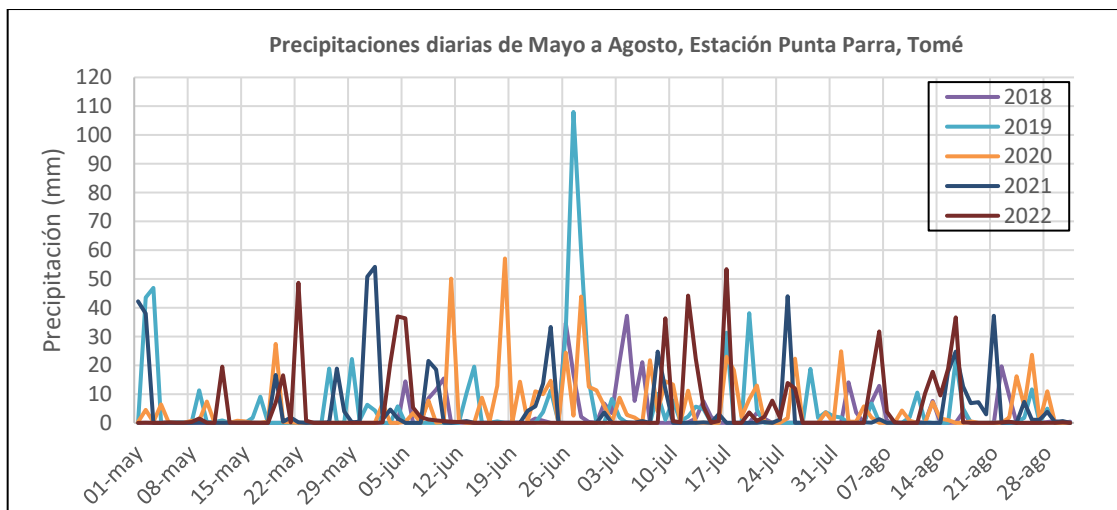


Figura 14: Precipitaciones diarias desde el 1 de Mayo hasta el 31 de Agosto, durante el periodo 2018-2022 registradas en la estación Punta Parra, Tomé. (Elaboración propia).

4.1.4. Vegetación

En el área de estudio existe un predominio de plantaciones forestales, principalmente de pino y eucalipto, y en menor medida presencia de vegetación arbustiva nativa y herbácea. La gran cantidad de plantaciones forestales existentes en las laderas del cerro hace a la zona especialmente susceptible a la ocurrencia de incendios forestales, tal como ya se ha visto afectado en años anteriores y recientemente en el mes de febrero del año 2023. Actualmente la Ladera Sureste, presenta vestigios de la vegetación existente antes del incendio, así como también especies quemadas de tipo forestal que aún siguen en pie y vegetación herbácea dispersa (Figura 15a).

En cuanto a la Ladera Suroeste, se presenta una vegetación abundante y sana, compuesta en su mayoría por plantaciones forestales, vegetación arbustiva nativa y herbácea (Figura 15b).

En la Ladera Este, se presenta una vegetación dispersa compuesta más que nada de árboles de eucalipto y escasa vegetación menor (Figura 15c). Durante la visita a terreno se observó algunos árboles con un cierto grado de curvatura en la parte inferior de sus troncos (Figura 15d, 15e), esta característica podría ser atribuible a una mala formación en el tronco del árbol durante su crecimiento o a un movimiento en masa superficial muy lento, también llamado reptación; la comprobación de esto requiere estudios más detallados.

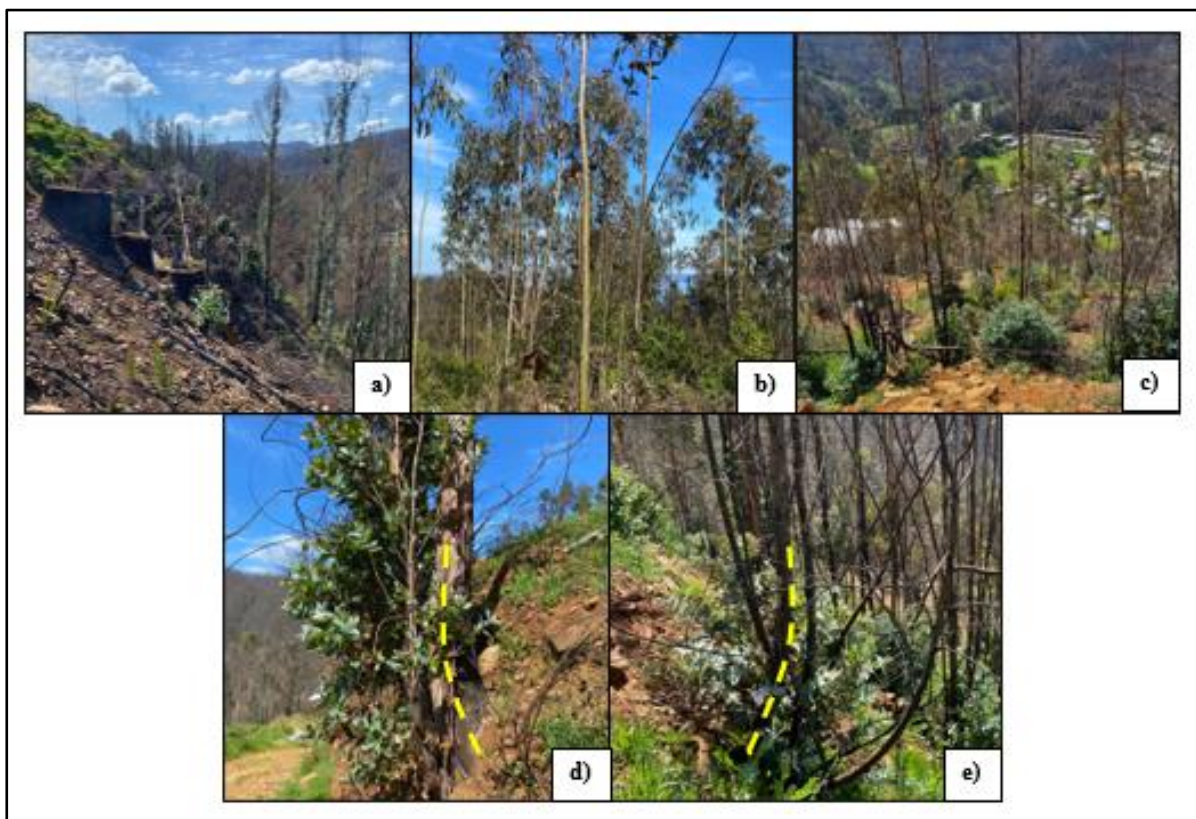


Figura 15: a) Vegetación en Ladera Sureste. b) Vegetación en Ladera Suroeste. c) Vegetación en Ladera Este. d) y e) Árboles que presentan basculamiento en la Ladera Este. (Elaboración propia).

4.1.5. Afectación por incendios forestales

El incendio que tuvo lugar en el mes de febrero de 2023 generó un impacto significativo en la Ladera Sureste (Figura 16), puesto que se incineró una cantidad significativa de árboles de pino, eucaliptos y vegetación menor. Esto deja a la ladera más expuesta a factores que generan meteorización y erosión, especialmente a las precipitaciones, aumentando la infiltración del terreno y, en consecuencia, elevando el nivel freático.

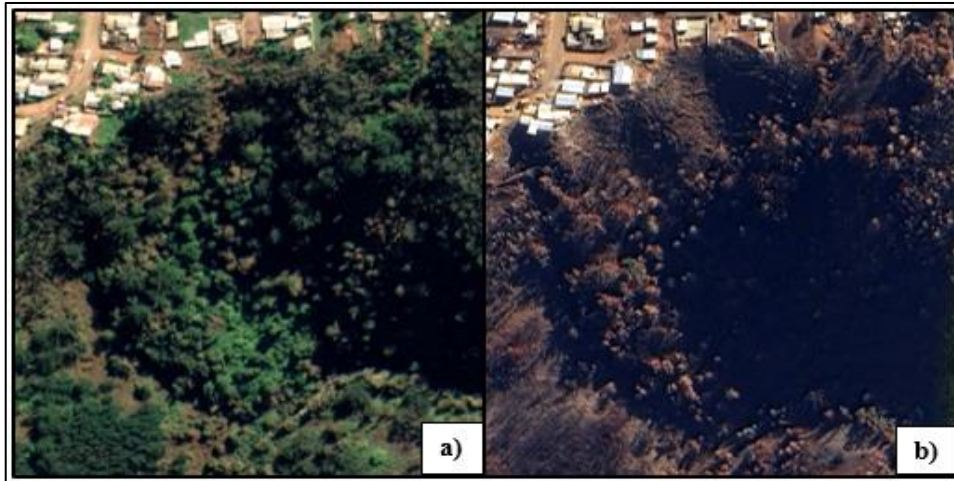


Figura 16: Afectación de incendio forestal en la Ladera Sureste. a) Estado de la ladera en el año 2022. b) Estado actual de la ladera post incendio, año 2023. (Imágenes extraídas de Google Earth).

Según los registros del Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile (SIMEF), la Ladera Suroeste ha sido afectada al menos por tres focos incendiarios de baja intensidad y extensión territorial en los últimos 5 años. En cuanto a la Ladera Este, no cuenta con antecedentes de haber sido afectada por incendios, lo cual presumiblemente se debe a la escasa vegetación que la cubre.

4.1.6. Factor antrópico

En la Ladera Sureste, se encuentran viviendas de autoconstrucción sustentadas en pilotes de madera al borde de la ladera, la cual presenta una inclinación abrupta sobre los 30° (Figura 17a). Además, existe acumulación de basura y escombros próximos a las viviendas. Estos depósitos de basura en sectores con una inclinación pronunciada representan un peligro significativo para la estabilidad de las laderas, ya que obstruyen el drenaje natural del agua, actúan como una sobrecarga adicional al terreno y pueden formar parte de la masa del movimiento (Ramírez, 2023).

Respecto a la Ladera Suroeste, se encuentran viviendas instaladas sobre la ladera y a los pies de ella (Figura 17b). El emplazamiento de estas viviendas implica tanto cortes en la ladera, los cuales pueden contribuir a la desestabilización de esta, como la sobrecarga del terreno.



Figura 17: a) Vivienda construida en pilotes de madera en la Ladera Sureste. b) Viviendas construidas en la Ladera Suroeste. (Elaboración propia).

La Ladera Este presenta un alto grado de intervención antrópica, dado que existen viviendas construidas sobre terrazas excavadas en la misma ladera, lo que conlleva la generación de taludes de suelo y roca con alturas mayores a 2 metros (Figura 18a, 18b). También existe un camino para el tránsito vehicular, el que presenta erosión por escorrentía superficial (Figura 18c). En algunos sectores de la ladera se presentan estructuras de contención artesanales, tales como muros de neumáticos y de mampostería, compuesto por bloques de roca metamórfica extraídos de la misma ladera (Figura 18d, 18e).



Figura 18: Intervención antrópica en la Ladera Este a) Talud con altura de 2m excavado para instalación de vivienda. b) Vivienda construida al pie de ladera y estructura emplazada en terreno en desnivel. c) Camino para tránsito vehicular. d) Construcción de muro con neumáticos e) Construcción de muro de mampostería con bloques de roca metamórfica local. (Elaboración propia).

4.2. Análisis jerárquico multivariado

La construcción de la matriz de decisión se basa en el análisis comparativo de variables específicas e independientes (Tabla 4). La ponderación de cada variable se determina en función de su importancia relativa al compararlas entre sí y su potencial influencia en eventos de movimientos en masa. En este caso las variables analizadas son: geología y meteorización, pendiente, factor antrópico, vegetación, afectación por incendios forestales y orientación de ladera. Por otro lado, para efecto de este estudio, no se consideró el factor meteorológico en el proceso de análisis jerárquico, ya que corresponde al principal factor desencadenante a nivel nacional de movimientos en masa y afecta espacialmente de igual manera en toda el área de estudio, dado que corresponde a una extensión territorial acotada. Cabe mencionar que, esto no debe interpretarse como una exclusión de una variable de estudio, sino más bien como una especificación que favorece el objetivo de la investigación.

Tabla 4: Matriz de decisión. (Elaboración propia).

Variables	Geología y meteorización	Pendiente	Factor antrópico	Vegetación	Afectación por incendios	Orientación
Geología y meteorización	1,00	1,00	2,00	3,00	3,00	4,00
Pendiente	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	4,00
Factor antrópico	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00
Vegetación	0,33	0,50	0,50	1,00	2,00	2,00
Afectación por incendios	0,33	0,33	0,33	0,50	1,00	3,00
Orientación	0,25	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00

En relación con los resultados de la matriz de decisión (Tabla 4), se obtienen los valores propios para cada factor de estudio (Tabla 5).

Tabla 5: Valores propios y pesos obtenidos. (Elaboración propia).

Factores	Valor propio (Wi)	Valor propio normalizado (Ci)	Peso parcial (Pi)	Valorización relativa (li)
Geología y meteorización	2,04	0,29	3,42	0,99
Pendiente	1,91	0,27	3,58	0,97
Factor antrópico	1,20	0,17	6,33	1,08
Vegetación	0,83	0,12	9,00	1,07
Afectación por incendios	0,66	0,09	11,33	1,07
Orientación	0,39	0,06	17,00	0,94
Σ n	7,03			6,12

Luego de obtener los valores propios de cada factor, se comprueba que la matriz presenta una relación de consistencia (CR) menor a 0,1 (Tabla 6), encontrándose dentro del rango adecuado de consistencia. Finalmente, la ponderación para cada uno de los factores se presenta en la Tabla 7.

Tabla 6: Consistencia matriz. (Elaboración propia).

Índice de consistencia (Ci)	0,024
Índice de consistencia aleatorio (Rci)	1,320
Relación de consistencia (CR)	0,018

Tabla 7: Ponderación final de cada factor. (Elaboración propia).

Factores	Geología y meteorización	Pendiente	Factor antrópico	Vegetación	Afectación por incendios	Orientación
Ponderación	29%	27%	17%	12%	9%	6%

4.3. Modelación

En la Tabla 8, se indican el nivel de peligro asociado para cada uno de los factores de estudio.

Tabla 8: Niveles de peligro para cada factor. (Elaboración propia).

Factor	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
Geología y meteorización	La roca presenta foliación no desfavorable y cambios no significativos respecto a su estado original, se rompe con dificultad en trozos más pequeños con el martillo geológico.	Alrededor de la mitad de la roca está desintegrada o fragmentada, presenta foliación desfavorable y se rompe con facilidad en trozos medianos con el martillo geológico.	La roca presenta foliación desfavorable. Se encuentra de alta a completamente meteorizada, fragmentándose fácilmente al tacto. Depósitos semiconsolidados o no consolidados de movimientos en masa antiguos.
Pendiente	Entre 0°-10°	Entre 10°-20°	Mayor de 20°
Factor antrópico	Ladera sin mayor intervención.	Construcción escasa a moderada de viviendas al borde o al pie de la ladera, acumulación de desechos sólidos.	Cortes de taludes de manera artesanal, formación de caminos, emplazamientos significativos de viviendas en la ladera misma.
Vegetación	Ladera con abundante vegetación arbórea y herbácea sana.	Ladera con vegetación arbórea y herbácea moderada.	Ladera con escasa vegetación y/o plantaciones forestales afectadas por incendios.
Afectación por incendios	La ladera no tiene registros de incendios forestales en los últimos 5 años.	La ladera ha sido afectada en áreas menores por incendios forestales ocurridos hace menos de 5 años.	La ladera ha sido afectada en su totalidad por incendios forestales ocurridos hace menos de 1 año.
Orientación	NW a NE	NE a SE	SE a NW

Una vez obtenidos los pesos ponderados y los niveles de peligro, se obtiene la ponderación final para cada ladera de estudio como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Ponderación de peligro para cada ladera de estudio. (Elaboración propia).

Factor		Ladera Este	Ladera Sureste	Ladera Suroeste
Geología y meteorización	Peligro	3	3	2
	Justificación	Depósitos no consolidados	Meteorización avanzada	Meteorización moderada
Pendiente	Peligro	3	3	3
	Justificación	(>20°)	(>20°)	(>20°)
Factor antrópico	Peligro	3	2	2
	Justificación	Cortes de talud y edificación significativa	Edificación escasa y acumulación de escombros	Edificación moderada y acumulación de escombros
Vegetación	Peligro	2	3	1
	Justificación	Moderada	Escasa	Abundante
Afectación por incendios forestales	Peligro	1	3	2
	Justificación	Sin registros	Hace menos de un año	Hace menos de cinco años
Orientación	Peligro	2	3	3
	Justificación	Dirección este	Dirección sureste	Dirección suroeste

En relación con el factor geológico, la Ladera Sureste y Ladera Este han sido categorizadas con un nivel de peligro alto. La Ladera Sureste presenta una roca metamórfica con foliación subvertical y dirección perpendicular a la ladera, en un avanzado estado de meteorización, manifestada en su decoloración y fragmentación. Esta condición ha propiciado el desarrollo de una matriz de suelo residual arcilloso, material fácilmente erosionable y, consecuentemente susceptible a la generación de movimientos en masa. En cuanto a la Ladera Este, se asocia el riesgo alto a la presencia de depósitos antiguos de movimientos en masa, estos depósitos varían en su consolidación desde semiconsolidados hasta no consolidados, lo que los convierte en altamente susceptibles a ser removidos. En cuanto a la Ladera Suroeste, la foliación de la roca es desfavorable a la dirección de la ladera, sin embargo el estado de meteorización de la roca es moderado, por lo que se ha catalogado con un riesgo de nivel medio.

Con respecto al factor de pendiente, las tres laderas estudiadas fueron categorizadas con un nivel de peligro alto, ya que presentan inclinaciones pronunciadas que oscilan entre los 20° y 48°, por lo que las configura como zonas con elevado potencial para el desencadenamiento de procesos gravitacionales.

En cuanto al factor antrópico, se categorizó con peligro alto a la Ladera Este, dado que presenta cortes de taludes realizados de forma artesanal, construcción de camino para tránsito vehicular y una edificación significativa. Estas actividades ejercidas por el hombre alteran el drenaje natural y generan una disminución gradual de la resistencia de los materiales constituyentes de la ladera. Por otro lado, tanto la Ladera Sureste como la Ladera Suroeste, se han catalogado con un peligro medio, ya que presentan una edificación escasa a moderada, junto a la acumulación de residuos y escombros.

Sobre el análisis de vegetación, se le asignó peligro alto a la Ladera Sureste, dado que presenta una cobertura vegetal escasa, por lo que se encuentra considerablemente más expuesta a los efectos de las precipitaciones y erosión. Por otro lado, la Ladera Este se calificó con un nivel de peligro medio, debido a su vegetación moderada. En contraste a las laderas antes mencionadas, la Ladera Suroeste cuenta con una densa y sana cobertura vegetal nativa, lo cual aporta a la estabilidad del terreno, por lo que se le asignó peligro bajo.

En el aspecto de afectación de incendios, la Ladera Sureste fue categorizada con peligro alto, dado que recientemente, en febrero de 2023, fue afectada por un incendio forestal que devastó una cantidad significativa de la vegetación que se encontraban en el lugar, incrementando su susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de movimientos en masa. La Ladera Suroeste fue calificada con un nivel de peligro medio, considerando que ha sido afectada por incendios de baja intensidad y extensión territorial en los últimos 5 años. Por otra parte, la Ladera Este, al no tener registros de afectación por incendios forestales, fue considerada con un nivel de peligro bajo.

Respecto a la orientación de las laderas, se ha categorizado con peligro alto a la Ladera Sureste y Ladera Suroeste, en vista de que reciben con mayor intensidad las acciones erosivas tanto del viento como de las precipitaciones. En contraste, la Ladera Este se ha clasificado con peligro medio, ya que su orientación la hace menos susceptible al viento y precipitaciones, pero se ve mayormente expuesta a la radiación solar, por lo que presenta una menor humedad en el terreno y en consecuencia, un desarrollo moderado de vegetación.

4.4. Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa

En la Figura 19, se presenta el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, elaborado mediante el software QGIS 3.22.5. De acuerdo con los resultados obtenidos, las categorías de susceptibilidad se distribuyen en tres rangos, bajo (color amarillo), medio (color naranja) y alto (color rojo). Las zonas que denotan una susceptibilidad de nivel alto (Ladera Sureste) y de medio a alto (Ladera Este) se caracterizan por tener un sustrato metamórfico intensamente alterado y meteorizado, una foliación desfavorable en relación con la pendiente de la ladera, también por presentar depósitos de movimiento en masa antiguos no consolidados y una vegetación que varía de moderada a mínima, influenciada por la afectación de incendios forestales y actividades antrópicas. Por otra parte, la zona que representan un grado de susceptibilidad de bajo a medio (Ladera Suroeste) se caracteriza por presentar una litología metamórfica con meteorización moderada, foliación desfavorable, una vegetación sana y abundante y, una intervención antrópica de carácter moderado.

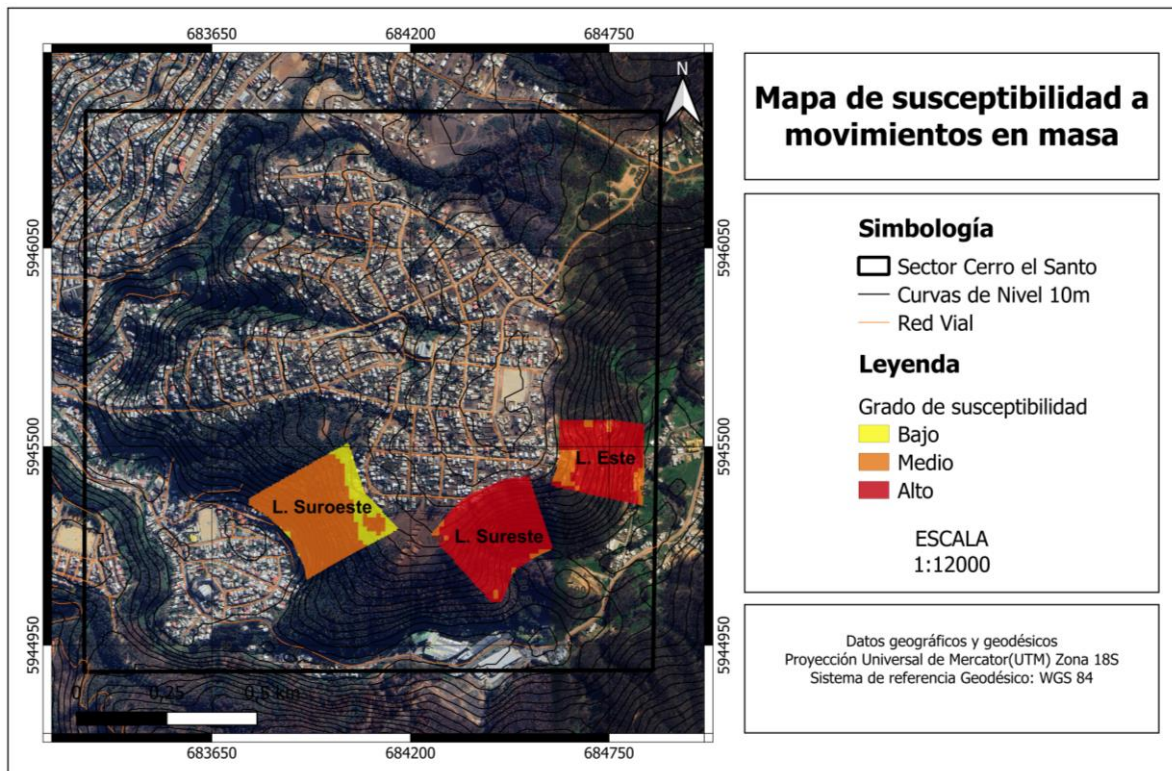


Figura 19: Mapa de susceptibilidad a movimientos en masa en laderas de estudio, cerro El Santo, Tomé. (Elaboración propia).

5. CONCLUSIONES

5.1. Balance de factores condicionantes y desencadenantes

En base al mapa obtenido, se puede concluir que las tres laderas de estudio representan zonas potencialmente susceptibles a la generación de movimientos en masa. Esto se debe en primer lugar, a la geología, ya que el cerro El Santo está conformado por rocas metamórficas, las cuales se encuentran desde ligeramente a altamente meteorizadas, desarrollándose horizontes de suelo residual tipo arcilloso. En segundo lugar, se encuentran las pendientes, las cuales en las tres laderas varían desde los 20° hasta los 48° , otorgando el factor gravitacional necesario para generar algún tipo de movimiento en masa.

Dentro de los factores condicionantes con una ponderación menor a los mencionados anteriormente pero que cumplen un rol diferencial, se encuentra la vegetación y la afectación por incendio forestal, los cuales aportan una mayor peligrosidad a la Ladera Sureste. Ambos factores se potencian entre sí mismos, en virtud de que la pérdida de cobertura vegetal y/o la escasez de esta, vuelve vulnerable al terreno frente a la erosión y propenso a saturarse fácilmente, a causa de las precipitaciones.

Respecto a los factores desencadenantes en este estudio, se pueden identificar dos factores significativos. El primero son las precipitaciones, ya que es el principal factor desencadenante de movimientos en masa tanto a nivel nacional como a nivel comunal, siendo los meses de mayo a agosto más propensos a la ocurrencia de este tipo de procesos geológicos. Vale agregar que, en los últimos 3 años, en vez de la caída constante de lluvia invernal se ha dado una tendencia a eventos episódicos de precipitación más espaciados en el tiempo, pero a su vez más intensos; esto puede dar lugar a la sobresaturación rápida de los terrenos, aumentando la susceptibilidad. En segundo lugar, se encuentra la intervención antrópica, la cual es de carácter media y alta en las tres laderas, destacando la Ladera Este, la cual se encuentra cubierta de abundantes depósitos de movimiento en masa antiguos y semirecientes, pudiendo estos últimos estar asociados a las acciones ejercidas por el ser humano durante el tiempo, que conllevan una alteración en el drenaje natural de la ladera y disminución gradual de la resistencia de los materiales que componen la ladera.

5.2. Recomendaciones de mitigación

El estado actual de las laderas estudiadas y los consecuentes grados de susceptibilidad determinados por este estudio requieren la pronta toma de medidas de mitigación previas a las temporadas invernales por venir.

Se recomienda diseñar obras de evacuación de escorrentía superficial de aguas lluvias en la zona de meseta sobre el área de estudio, mediante tubos de drenaje o canalización, para evitar la saturación del suelo y redirigir el flujo de agua hacia zonas donde no causen un mayor peligro. Así también implementar medidas de prevención y control de incendios forestales, principalmente la creación y mantención de cortafuegos, para así evitar nuevos incendios que consuman la vegetación que aún existe en las laderas.

Es también importante realizar limpieza de forma periódica en las laderas, retirando residuos y escombros. Esto debe ser una iniciativa sostenida en el tiempo en colaboración con los vecinos, para evitar la sobrecarga en la ladera y la acumulación de material susceptible a ser movilizado ante un eventual desencadenamiento de movimiento en masa.

Se sugiere implementar medidas de regulación para establecer una zona de restricción en los sectores aledaños a los bordes de las laderas, prohibiendo cualquier tipo de construcción adicional hacia sectores que no cuentan con condiciones seguras debido a su topografía abrupta. Esto es especialmente imperioso para las viviendas ubicadas en la parte superior de la Ladera Sureste. Se recomienda también monitorear o hacer un estudio detallado respecto al basculamiento que existe en los troncos de los árboles en la Ladera Este, ya que puede ser atribuible a procesos de movimientos en masa muy lentos de tipo reptación.

Finalmente, es esencial educar y concientizar a la comunidad sobre los riesgos asociados a los procesos de movimientos en masa, dando a conocer tanto su naturaleza intrínseca como la influencia de las acciones humanas en sus generaciones. Además de proporcionar directrices sobre la respuesta apropiada ante la eventualidad de uno de estos procesos.

6. REFERENCIAS

- Aguirre, L., Hervé, F., Godoy, E.** (1972). "Distribution of metamorphic facies in Chile, an outline". *Krystalinikum*. Vol. 9: 7-19.
- Arias, C., King, R., Montenegro, J.** (2018). "Modelo conceptual del movimiento en masa del talud ubicado en PK 28+400, ruta 160, comuna de Lota". (Tesis pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción. Departamento de Ingeniería Civil. Concepción, Chile.
- Becerra, C.** (2006). "Análisis de riesgo natural por remociones en masa, carretera El Cobre, División El teniente. Rancagua, Chile". Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).
- Borgomeo, E., Hebditch, K. V., Whittaker, A. C., & Lonergan, L.** (2014). "Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy". *Geomorphology*, 226, 148-161.
- Bravo, C; Caamaño, D & King, R.** (2016). "Umbral de precipitación de procesos de remoción en masa, en la provincia de Concepción" (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.** (2017). "Clima y vegetación Región del Bio Bío, Chile Nuestro País". Recuperado de: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region8/clima.htm>.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P.** (1991). "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard". *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 16: p. 427-445.
- Caon, L., Vallejo, V. R., Ritsema, C. J., & Geissen, V.** (2014). "Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems". *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.
- Cruden, D.; Varnes, D.** (1996). "Landslide 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.

- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D.** (2000). "Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance". *Earth-Science Reviews* 51:33-65.
- Fuenzalida, F.** (2014). "Susceptibilidad de remociones en masa en cuenca las zorras, afectada por catástrofe incendiaria, comuna de Valparaíso, Chile". Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología: 107 pp. Santiago.
- Gajardo, A.** (1980). "Hoja de Concepción-Chillan". Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile N°4, Preliminar. Inst. Invest. Geológicos.
- González de Vallejo, L. I.** (2002). Ingeniería Geológica. Pearson Educación. Madrid, España.
- Hauser, A.** (2000). "Remociones en masa en Chile". Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 59, Versión actualizada 2000, 89p.
- Highland, L.M.; Bobrowsky, P.** (2008). "Manual de derrumbes". Guía para entender todo sobre los derrumbes: Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 129 p.
- Hung, O., Leroueil, S., Picarelli, L.** (2014). "The Varnes classification of landslides types, an update. Landslides" (2014) 11: pp. 167-194.
- Hyndman, D.; Hyndman, D.** (2011). "Natural hazards and Disasters, Third Edition". Brooks-Cole Cengage Learning. Canada.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)** (2023). "Red agrometeorológica de INIA". Recuperado de: <https://agrometeorologia.cl/>.
- Lambe, W.; Whitman, R.** (1972). "Mecánica de suelos". Instituto Tecnológico de Massachusetts, *Editorial Limusa-Wiley S.A.*, 583 p.
- Lara, M.; Sepúlveda, S.** (2008). "Remociones en masa. Apuntes del curso". Universidad de Chile, Departamento de Geología. Inédito.
- López, J.; López, C.** (2004). "El urbanismo de ladera: Un reto ambiental, tecnológico y del ordenamiento territorial". *Revista Bitácora Urbano Territorial*. Universidad Nacional de Colombia. p. 94-102.
- 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.
- Mardones, M.; Vidal, C.** (2001). "La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción". *Eure-revista Latinoamericana De Estudios Urbano Regionales – EURE* 27 (81): 97-122.
- Mardones, M; Rojas, J.** (2012). "Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región de Biobío, Chile". *Revista geográfica Norte Grande*, 53: 57-54.
- Marín-Sánchez, R., & Osorio, J.** (2017). "Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: Una revisión". *Revista Politécnica*, 13(24), 113-126.
- Marín, M., Neira, H., Garrido, N., Báez, F.** (2021). "Visor territorial de fallecidos por remoción en masa en Chile en los últimos 90 años". Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), Chile.
- Ocola, L.** (2005). "Peligro, vulnerabilidad, riesgo y posibilidad de desastres sísmicos en Perú". *Revista Geofísica*. No. 61, enero 2005, pp. 81-125.
- Pradenas, M.** (2014). "Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción". Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Concepción.
- Popescu, M.E.** (2002). "Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options". Keynote Lecture, Proceedings 3rd *International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures, Singapore*, p. 61-81.

- Quinzio, L.A., Bonilla, R., González, A., González, L.** (2011). “Geología del sector costero de la provincia de Concepción”. Poster in Geowissenschaften, 22nd *International Colloquium on Latin American Earth Sciences*.
- Ramírez, P.** (2023). “Visita técnica por condición de estabilidad de laderas en cerro El Santo y ruta 126, comuna de Tomé, región del Biobío”. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 17 p. Santiago.
- Robledo, D.** (2023). “Susceptibilidad por remoción en masa y análisis de vulnerabilidad por exposición de la población, en las comunas de Penco y Tomé”. (Tesis de pregrado). Universidad de Concepción, Chile.
- Saaty, T. L.** (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co.
- Sepúlveda, N.** (2022). “Visita técnica a sectores de la comuna de Tomé región del Biobío, afectados por remociones en masa durante Julio del 2022”. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 19 p. Concepción.
- Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile (SIMEF)** (Julio de 2023). Ministerio de Agricultura. <https://simef.minagri.gob.cl/>.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D.** (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología física*. Pearson Educación. España.
- Terrasonda.** (2010). Estudio de mecánica de suelos. Informe EMS 060-2010/01. Proyecto: Saneamiento sanitario sector cerro El Santo, Tomé. Región del Biobío, Chile. Recuperado de: <https://1library.com/>.
- Toskano, G.** (2005). “El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores” (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Varnes, D.J.** (1984). Landslides hazard zonation: “A review of principles and practice, natural hazard”. UNESCO, 63 p.
- Yepes, V.** (2018). Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process, AHP*). “El blog de Víctor Yepes”. Universidad Politécnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/saaty/>.
- Wieczorek, G. F.** (1996). “Landslide Triggering Mechanisms in Landslides”. *Investigations and Mitigation. Special Report 247*. A. K. Turner y R. L. Schuster, Editores. Transportation Research Board. National Research Council, National Academic Press, Washington, DC, USA, p.76-90.
- Zelada, A.** (2005). “Estudio diagnóstico y elaboración del plan regulador comunal de Tomé”. Memoria explicativa del estudio. Concepción.