

Universidad de Concepción
Facultad de Arquitectura Urbanismo y Geografía.
Departamento de Geografía.



MEMORIA DE TITULO

**ANÁLISIS DE MULTIAMENAZAS; REMOCIONES EN MASA E
INCENDIOS FORESTALES. LOCALIDAD DE PUNTA LAVAPIE,
COMUNA DE ARAUCO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE GEÓGRAFA

Estudiante: Javiera Libertad Vásquez Yáñez
Profesora Guía: Edilia Jaque Castillo
Dr. (c) Francisco Castro Venegas

Ciudad Universitaria, Concepción, agosto 2025

Agradecimientos	8
Resumen.	9
I. Introducción.....	10
1.1 Problemática de Investigación	11
1.2 Preguntas de investigación	15
1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
II. MARCO TEORICO	17
2.1. Riesgo de desastres.....	17
2.1.1. Amenazas.....	17
2.2 Multiamenazas	18
2.2.1 Remociones en masa.....	20
2.2.1.1Tipos de remociones en masa.....	20
2.2.2.1 Factores condicionantes.....	21
2.2.2.2 Factores desencadenantes	22
Susceptibilidad ante remociones en masa	22
2.2.1 Incendios Forestales y la perdida de suelo	23
2.3 Peligro de incendios forestales.....	25
III. MATERIALES Y METODOS	27
3.1 Área de estudio	27
3.1 Marco metodológico de modelación FR para remociones en masa e incendios forestales	30
3.1.1. Inventario de remociones en masa.....	30
3.1.2 Inventario incendios forestales	31
3.1.2 Material topográfico digital.....	32
3.2 Método estadístico “Frequency Ratio”	32
3.3 Factores considerados.....	35
3.3.1 Remociones en masa.....	36
3.3.1.1 Curvatura.....	36

3.3.1.2 Pendiente	37
3.3.1.3 Orientación de laderas	37
3.3.1.4 NDVI y Land Cover.....	38
3.3.1.5 Geomorfología.....	39
3.3.1.6 Unidades geológicas	39
3.3.1.7 Distancia a cursos fluviales	40
3.3.1.8 Distancia a red vial	40
3.3.2 Incendios forestales.....	41
3.3.2.1. Tipo de combustible	41
3.2.1.2 Duración del combustible	42
3.1.1.3. NDVI:.....	43
3.1.1.4 Cubrimiento horizontal.....	43
3.1.1.5 NDII (Contenido de humedad).....	43
3.1.2.6 Velocidad del viento	44
3.1.2.8 Distancia a red vial	44
3.1.2.9 Altitud	45
3.4 Validación del modelo	45
3.5 Mapa de multiamenazas.....	45
IV RESULTADOS	46
4.1 Remociones en masa	46
4.1.1 Inventario de remociones en masa.....	46
4.1.2 Factores considerados para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa....	49
4.1.2.1 Pendiente	51
4.1.2.2 Orientación de laderas	52
4.1.2.3 Curvatura.....	52
4.1.2.4 Geomorfología.....	53
4.1.2.5 Geología.....	54
4.1.2.6 Distancia a redes fluviales.....	55
4.1.2.7 Distancia a red vial	56
4.1.2.8 NDVI.....	56
4.1.3 Mapa de susceptibilidad a Remociones en Masa	57
4.1.4 Validación de mapa de susceptibilidad ante remociones en masa.....	59
4.2 Incendios forestales	61
4.2.1 Inventario eventos por incendio forestal	61
4.2.2 Factores considerados para incendio forestal	62

4.2.2.1	Altitud	63
4.2.2.2	FVC cubrimiento horizontal	63
4.2.2.3	Velocidad del viento	64
4.2.2.4	Grado de pendiente.....	65
4.2.2.5	Distancia a red vial	66
4.2.2.6	NDII	67
4.2.2.7	Duración del combustible	67
4.2.2.8	tipo de combustible.....	68
4.2.2.9	NDVI	68
4.2.3	Mapas de susceptibilidad ante incendios forestales.....	70
4.2.4	Validación Mapa de susceptibilidad ante Incendios forestales	71
	Interpretación técnica	71
4.3	Mapa de susceptibilidad Multiamenazas	73
4.3.1	Validación mapa de susceptibilidad a multiamenazas.....	76
V.	Discusión de los resultados	77
VI.	Limitaciones	82
VII.	Conclusiones	83
VIII.	Referencias	85
IX.	Anexos.....	92

INDICE DE FIGURAS

Figura1.	Relación incendios forestales y superficie afectada, N° de incendios - superficie afectada, Comuna de Arauco.	12
Figura 2.	Remociones en masa identificadas por SERNAGEOMIN en 2023 ..	13
Figura 3.	Remoción en masa identificada en la localidad de Punta Lavapié por SERNAGEOMIN.	14
Figura 4.	Clasificación de remociones en masa.....	21
Figura 5.	Localización del área de estudio.....	27

Figura 6. Gráfico crecimiento de población	29
Figura 7. Gráfico de población, comuna de Arauco 1982-2024	29
Figura 8. Diagrama explicativo de la metodología Frequency ratio	33
Figura 9. cartografía inventario remociones en masa	47
Figura 10. Remocion en masa 64 (RM64)	48
Figura 11. Remoción en masa 62 y 26 (RM62, RM26)	49
Figura 12. Cartografías factores considerados para remoción en masa.....	50
Figura 13. Gráfico de Clases y Valores FR del factor Pendiente.....	51
Figura 14. Gráfico de Clases y Valores FR del factor orientación de laderas	52
Figura 15. Gráfico de Clases y Valores FR del factor curvatura.....	53
Figura 16. Gráfico de Clases y Valores FR del factor geomorfología	54
Figura 17. Gráfico y Valores FR del factor Geología.....	54
Figura 18. Gráfico y Valores FR del factor distancia a ríos	55
Figura 19. Gráfico y Valores FR del factor red vial.....	56
Figura 20. Gráfico y Valores FR del factor NDVI – Land cover	57
Figura 21. Mapa de susceptibilidad ante remociones en masa	58
Figura 22. Gráfico ROC Y AUC, para susceptibilidad ante remociones en masa	60
Figura 23. Inventario de incendios forestales.....	61
Figura 24. Cartografía factores considerados para incendio forestal.....	62
Figura 25. Gráfico clases y Valores FR del factor altitud (incendio forestal) .	63
Figura 26. Gráfico clases y Valores FR del factor FVC – Cubrimiento horizontal (incendio forestal)	64
Figura 27. Gráfico clases y Valores FR del factor Velocidad del viento (incendio forestal)	64

Figura 28. Gráfico clases y Valores FR del factor pendiente (incendio forestal)	65
Figura 29. Gráfico clases y Valores FR del factor distancia a red vial (incendio forestal)	66
Figura 30. Gráfico clases y Valores FR vs factor NDII (incendio forestal)	67
Figura 31. Gráfico clases y Valores FR factor duración del combustible (incendio forestal)	67
Figura 32. Gráfico clases y Valores FR factor tipo de combustible (incendio forestal)	68
Figura 33. Gráfico clases y Valores FR factor tipo de combustible (incendio forestal)	69
Figura 34. Susceptibilidad a incendios forestales	70
Figura 35. Gráfico ROC y AUC, para modelo de susceptibilidad ante incendios	71
Figura 36. Mapa de susceptibilidad a multiamenazas	73
Figura 37. Mapa de coincidencia RM-IF	75
Figura 38. Curva ROC para multiamenazas	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores condicionantes	35
Tabla 2. Tipo de cobertura vegetal, adecuada a la definición de Paramo (2007)	41
Tabla 3. Clasificación por tipo de cobertura y combustible	42
Tabla 4. Clasificación por tipo de cobertura y la duración en horas de ignición del combustible	43

Tabla 5. Pixeles por clase de susceptibilidad ante remoción en masa y su % en área	58
Tabla 6. susceptibilidad ante incendios forestales, pixeles por clase y su porcentaje de área.....	71
Tabla 7. Distribución de pixeles y área por clase en el mapa de multiamenazas.	74
Tabla 8. Clase con valores FR altos y bajo para las clases de Remociones en masa	78
Tabla 9. Clase con valores FR altos y bajo para las clases de Remociones en masa	79
Tabla 10. Coincidencia RM e IF, pixeles por clase y área (%)	80
Anexo 1. Inventario remociones en masa	92
Anexo 2. Inventario incendios forestales	94
Anexo 3. Resultados FR remociones en masa	95
Anexo 4. Resultados FR incendios forestales	96



Esta memoria de título se realizó en el marco del Grupo de investigación “Multiamenazas, Vulnerabilidades y Cambio Global.

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a mi profesora guía, Dra. Edilia Jaque, por su orientación rigurosa y apoyo constante a lo largo de esta investigación. Extiendo mi gratitud al Dr. (c) Francisco Castro por su paciencia y disposición para atender mis inquietudes. Agradezco también al Grupo de Estudios Multiamenazas Biobío por el acompañamiento metodológico y el apoyo brindado tanto en terreno como en gabinete.

A mis amistades, gracias por sus consejos oportunos y por la contención en los momentos difíciles. Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo y amor incondicional durante mi formación universitaria y, especialmente, en el cierre de este ciclo: a mi mamá, mi papá y mis hermanos menores; sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

Resumen.

La investigación analizó la susceptibilidad a remociones en masa (RM) e incendios forestales (IF) en Punta Lavapié, Arauco, mediante inventarios específicos, verificación en terreno y modelación con el método Frequency Ratio (FR). Se elaboraron mapas de susceptibilidad validados con curvas ROC/AUC, identificando que las RM están condicionadas por pendientes de 40°–45°, curvaturas convexas y acantilados costeros activos vinculados a la Formación Trihueco, mientras que los IF se relacionan con la proximidad a la red vial, la presencia de pastizales y la duración del combustible, reflejando la influencia del uso del suelo y la interfaz urbano-forestal.

La integración de resultados permitió construir un mapa multiamenazas que muestra un 24 % del área con coincidencia en alta y muy alta susceptibilidad, lo que señala zonas críticas donde los incendios pueden favorecer procesos de remoción. En conjunto, se evidencia que los escenarios de riesgo derivan de la interacción entre factores climáticos, topográficos, geológicos, de cobertura vegetal y antrópicos, generando patrones que se potencian espacialmente. El mapa integrado constituye un aporte a la planificación territorial y la gestión del riesgo, reforzando la necesidad de avanzar hacia políticas territoriales integradas y sostenibles.

Palabras clave: Multiamenazas, Remoción en masa, Incendios Forestales, Susceptibilidad, Frequency Ratio (Tasa de Frecuencia)

I. Introducción

Los riesgos naturales, entendidos como fenómenos o eventos derivados de procesos propios de la naturaleza que pueden generar impactos en la población, la infraestructura, la economía y el medio ambiente, son gestionados en Chile mediante una amplia gama de mecanismos y estrategias orientadas a su reducción y control. Según el "Informe sobre Desarrollo Humano 2019" del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), estos riesgos se definen como "amenazas de eventos naturales que pueden causar daño o destrucción" (PNUD, 2019).

La gestión de riesgos en Chile abarca una serie de estrategias y medidas para mitigar los efectos de eventos adversos. El "Marco para la reducción del riesgo de desastres en Chile 2016-2030", elaborado por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), establece que esta gestión se centra en la prevención, preparación, respuesta y recuperación ante desastres naturales y antropogénicos (ONEMI, 2016).

Entre los riesgos más relevantes en Chile se encuentran los sísmicos y volcánicos debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico. Estos riesgos son preocupantes debido a la probabilidad de terremotos y erupciones volcánicas en la región (Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, s.f.). La combinación de estos eventos puede desencadenar remociones en masa, como deslizamientos de tierra y avalanchas, que representan una amenaza adicional para las comunidades cercanas a áreas montañosas o volcánicas.

Los procesos de remoción en masa corresponden a fenómenos geológicos de movimiento descendente de materiales, que pueden originarse por causas naturales o actividades humanas (Lara et al., 2008). Por otro lado, los incendios forestales representan un riesgo relevante en Chile, especialmente en verano, cuando las condiciones secas y ventosas favorecen su ocurrencia, pudiendo además detonar remociones en masa en áreas afectadas (Corporación Nacional Forestal de Chile, s.f.).

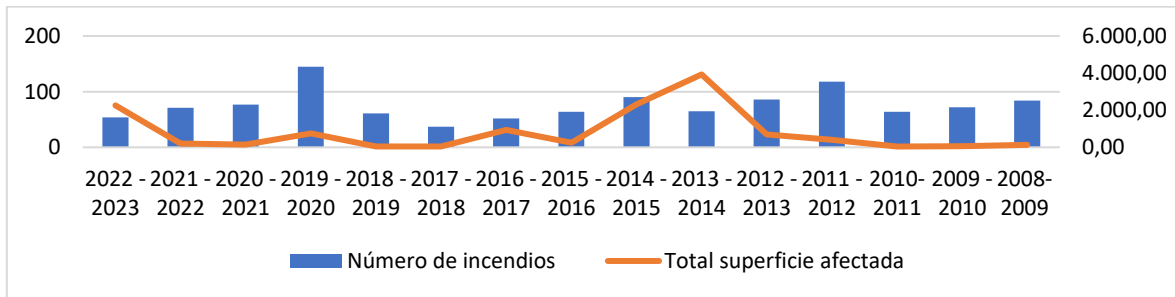
En los últimos años, ambos fenómenos han aumentado debido al cambio climático. El IPCC ha señalado que este intensifica los eventos extremos, incluyendo remociones en masa e incendios forestales (PNUD, 2019; IPCC, 2019). El alza de temperaturas y las alteraciones en la precipitación, con periodos de lluvias intensas y sequías prolongadas, contribuyen directamente a su mayor frecuencia e intensidad.

En los últimos años, los incendios forestales y las remociones en masa han aumentado debido al cambio climático. El IPCC advierte que el cambio climático intensifica los eventos extremos a nivel global, incluidos ambos procesos (PNUD, 2019; IPCC, 2019). El alza de temperaturas, junto con variaciones en la precipitación, como lluvias intensas y sequías prolongadas, incrementa su frecuencia e intensidad. En este contexto, el cambio climático se reconoce como un factor clave en la exacerbación de incendios forestales (Ciocca et al., 2023) y remociones en masa en la región de Arauco, debido a condiciones extremas como altas temperaturas, sequías prolongadas y eventos climáticos severos.

1.1 Problemática de Investigación

En las últimas décadas, los incendios forestales han mostrado un incremento sostenido en la zona centro-sur de Chile, afectando principalmente territorios caracterizados por la expansión de plantaciones forestales y la fragmentación de ecosistemas nativos, frecuentemente invadidos por especies exóticas. La región del Biobío concentra aproximadamente el 40 % de la superficie nacional de plantaciones, registrando más de 20.000 hectáreas establecidas durante las temporadas 1998-1999 y 2006-2007 (González et al., 2011). A ello se suma la aplicación de una silvicultura intensiva, que incrementa la disponibilidad de combustible vegetal, y la creciente interacción urbano-forestal, que ha favorecido el aumento de incendios en la interfaz urbano-rural (Peña-Fernández, s.f.). Estos factores, en conjunto, configuran un escenario de alta vulnerabilidad frente a incendios forestales en la región.

Figura1. Relación incendios forestales y superficie afectada, N° de incendios - superficie afectada, Comuna de Arauco.



Fuente: Estadísticas forestales CONAF 2021. Elaboración propia

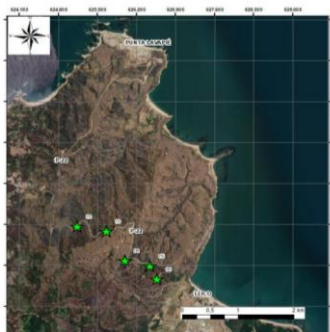
Paralelamente, la región del Biobío presenta una significativa exposición a procesos de remoción en masa, favorecida por su emplazamiento geográfico en un ambiente litoral y su topografía marcada por valles y laderas escarpadas. En el contexto nacional, se reconocen como principales factores desencadenantes de estos fenómenos las precipitaciones, los sismos y la intervención antrópica (Arias et al., 2018). La ocurrencia de incendios forestales acentúa este riesgo, ya que la pérdida de cobertura vegetal y hojarasca tras el fuego altera el comportamiento hidrogeomorfológico del suelo, aumentando la escorrentía y la erosión, lo que favorece la activación de remociones en masa. En zonas semiáridas con pendientes pronunciadas, litologías blandas, suelos degradados y vegetación compuesta por coníferas o matorrales, estos efectos pueden extenderse por largos periodos, generando incluso flujos repentinos o *flash floods* (León et al., s.f.).

La comuna de Arauco constituye un ejemplo crítico de esta problemática, ya que un 58 % de su superficie corresponde a plantaciones forestales, principalmente de pino y eucalipto, especies reconocidas por su alta inflamabilidad (Censo, 2007). Dentro de esta comuna, la localidad de Punta Lavapié presenta condiciones de particular vulnerabilidad. Se trata de un asentamiento costero emplazado en un sector acantilado de fuertes pendientes abiertas hacia el norte, con laderas moderadas al oeste y abruptas al este y norte, justo donde se ubica la principal ruta de acceso (Ramírez, 2023). La comunidad depende de una única vía terrestre, la ruta P-22, la cual se encuentra rodeada de monocultivos forestales y expuesta a la escasez

hídrica, condiciones que incrementan su riesgo frente a incendios y remociones en masa.

El incendio forestal ocurrido en febrero de 2023 constituye un punto de inflexión para la localidad. En este evento, las llamas interrumpieron el camino de acceso y obligaron a evacuar a la población por vía marítima mediante el uso de botes, dejando un saldo de 63 viviendas destruidas (Torres y Bastías, 2024). Posteriormente, se constataron condiciones de inestabilidad de laderas producto de la pérdida de cobertura vegetal, lo que favoreció la ocurrencia de remociones en masa en la misma ruta P-22 (Figura 2) durante los meses de agosto y septiembre de ese año (Sepúlveda, 2023).

Figura 2. Remociones en masa identificadas por SERNAGEOMIN en 2023



Fuente: Extraído de Ramírez, P. (2023)

Esta situación se suma a las evidencias de daño estructural en viviendas y caminos producto del terremoto de 2010, donde se identificaron grietas que podrían condicionar la reactivación de remociones por lluvias o sismos (Ramírez, 2023). Cabe señalar que el único antecedente oficial en los registros de SERNAGEOMIN para Punta Lavapié corresponde a una caída de rocas ocurrida en 2012 (figura 3) en el sector de Puerto Bravo (Fonseca, 2012), lo que da cuenta de la escasa información histórica disponible sobre este tipo de procesos en la zona.

Figura 3. Remoción en masa identificada en la localidad de Punta Lavapié por SERNAGEOMIN.



Fuente: Portal Geomin Beta de SERNAGEOMIN, catastro de procesos de remoción en masa.

De este modo, la localidad de Punta Lavapié enfrenta un escenario multiamenazas en el que confluyen incendios forestales, procesos de remoción en masa, eventos sísmicos y condiciones meteorológicas extremas. Todo ello se ve intensificado por el cambio climático, que aumenta la recurrencia de sequías, olas de calor y precipitaciones extremas, configurando un escenario de mayor probabilidad de incendios y deslizamientos asociados (Abdollahi et al., 2024). Estas amenazas interrelacionadas representan no solo un riesgo para la seguridad de la comunidad, sino también para el medio ambiente circundante y la infraestructura vital que sostiene su funcionamiento.

Ante esta situación, se vuelve necesario abordar la problemática desde un enfoque multiamenazas que permita comprender cómo la interacción entre incendios forestales y remociones en masa genera un escenario de riesgo complejo en Punta Lavapié. La pendiente de las laderas, la pérdida de cobertura vegetal, la composición de los suelos y la ocurrencia de eventos climáticos extremos configuran un conjunto de factores que, al combinarse, potencian la susceptibilidad de este territorio. Así, la investigación se orienta a documentar la ocurrencia de procesos de remoción en masa posteriores a los incendios forestales y a analizar las condiciones que explican la vulnerabilidad de la localidad, con el fin de avanzar hacia una comprensión integral de la dinámica multiamenazas en el área de estudio.

1.2 Preguntas de investigación

A partir de la problemática planteada, la investigación busca responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Existe una correspondencia espacial entre las zonas de alta susceptibilidad a incendios forestales y aquellas con susceptibilidad a procesos de remoción en masa?
2. ¿Es posible establecer una relación directa entre la ocurrencia de remociones en masa y las áreas previamente afectadas por incendios forestales?
3. ¿Qué aportes ofrece el desarrollo de análisis integrados bajo un enfoque de Multiamenazas para la comprensión y gestión del riesgo en la localidad de Punta Lavapié?

1.3 Hipótesis

Se plantea como hipótesis que la interacción de factores topográficos, ambientales y climáticos, acentuada por los impactos de los incendios forestales, incrementa la susceptibilidad de la localidad de Punta Lavapié a procesos de remoción en masa. Bajo esta premisa, la evaluación integrada desde una perspectiva multiamenazas permite comprender con mayor profundidad las dinámicas de riesgo y las áreas de mayor exposición.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la susceptibilidad a incendios forestales y procesos de remoción en masa en la localidad costera de Punta Lavapié, identificando las posibles relaciones de causa-efecto que condicionan la ocurrencia de estos eventos, desde un enfoque multiamenazas.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar un inventario de amenazas relacionadas con incendios forestales y procesos de remoción en masa en la localidad costera de Punta Lavapié.

2. Evaluar la susceptibilidad a incendios forestales en el área de estudio, considerando sus condicionantes biofísicos y antrópicos.
3. Evaluar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la localidad, a partir de las características geográficas del territorio.
4. Contrastar espacialmente las áreas de alta susceptibilidad a incendios forestales y remociones en masa, identificando coincidencias y diferencias.
5. Integrar los resultados de susceptibilidad bajo un enfoque multiamenazas, orientado a la comprensión del riesgo y la planificación territorial.

II. MARCO TEORICO

2.1. Riesgo de desastres

El riesgo es definido como la probabilidad de experimentar daños y pérdidas económicas, ambientales, sociales y de vidas humanas en una zona específica producto y a consecuencia de la activación de una amenaza y la vulnerabilidad que exista (ONEMI, 2017). Un riesgo puede considerarse como una idea compleja debido a que está compuesto por aspectos como consecuencia, eventualidad y contexto (Villar et al., 2016).

Donde un desastre es entendido como la materialización del riesgo el cual se puede analizar desde un enfoque donde se define que el riesgo de desastres es una construcción social, debido a que son las comunidades y las relaciones sociales que se desarrollan a consecuencia de las amenazas las que constituyen la materialización de este (Vera y Albarracín, 2017). El riesgo de desastre comprende la existencia de un contexto y proceso social complejo cuando se desencadena un fenómeno físico de origen natural, antropogénico o socio-natural que genera un impacto directo en la población y sus medios de vida, que como resultado producen graves alteraciones en el funcionamiento y desarrollo de la cotidianidad de la población afectada (Lavell, 2007).

2.1.1. Amenazas

Las amenazas son definidas como un factor externo de riesgo (Pérez et al., 2016) lo cual implica la posibilidad de que ocurra un fenómeno determinado el cual puede causar potencialmente algún tipo de daño en la sociedad (Lavell, 2001) estas pueden ser consideradas como un fenómeno de origen natural, antrópico o biológico el cual puede generar pérdidas o daños, trastornos a la población, infraestructura, servicios, medios de vida o medio ambiente (ONEMI, 2016)

Estas pueden ser clasificadas en tres categorías:

Natural: Las cuales se refieren a aquellas amenazas que ocurren como parte de procesos naturales del planeta tierra, propias de las dinámicas geomorfológicas y geológicas, tales deslizamientos de tierra, tsunamis, huracanes, entre otras (Lavell, 2001).

Socio-natural: Son aquellas causadas directa o indirectamente por acción de la actividad humana, definidas por Lavell (2001) como “*resultado de la intersección o relación del mundo natural con las prácticas sociales, ampliando las condiciones de amenaza*” las cuales generan diversos tipos de amenazas como inundaciones producto de la expansión urbana, deforestación, por intensos cambios de uso de suelo, por ejemplo.

Antropogénicas: Son aquellas amenazas que son producidas por la actividad humana sobre el medio natural o la población, tales como contaminación atmosférica, explosiones, derrame de materiales tóxicos entre otros (Lavell, 2001).

Es importante destacar que las amenazas son potencialmente destructivas cuando esta se desarrolla bajo condiciones de vulnerabilidad existiendo una debilidad, determinando así la magnitud de esta (Chaparro Avila et al., 2005)

Según Lavell (2001) las amenazas son producto de una construcción social donde, un fenómeno físico es definido como amenaza solo cuando este genera un daño en la sociedad. Por ende, no cualquier fenómeno natural es visto como una amenaza, sino que debe estar expuesta la población y ser propensa a ocasionarse un daño en esta.

2.2 Multiamenazas

“Una situación multiamenaza se refiere a la coexistencia de múltiples amenazas que podrían afectar una misma zona, ya sea en forma independiente o conjunta, y que deben ser consideradas al evaluar el riesgo y planificar medidas de reducción” (UNDRR, 2017).

Las multiamenazas se refieren a la interacción espacio temporal de diferentes tipos de amenazas naturales y antrópicas las cuales convergen en un mismo espacio

geográfico, y su comprensión facilita la toma de decisiones integrales en la planificación socioambiental (Valenzuela, 2018).

Esta multiplicidad de riesgos que se desarrollan en una región no está necesariamente interrelacionada ni son producto o responde a una sola causa. En el caso de las causas conjuntas la producción de una amenaza desencadena la otra generando interrelaciones de amenazas en los territorios (Lavell, 2007).

En el contexto contemporáneo, el concepto al que nos referimos se entiende como la presencia de múltiples peligros individuales que afectan una región específica, y sus interrelaciones (Šakić Trogrlić et al., 2024).

La relevancia de las multiamenazas se acentúa porque la mayoría de las ciudades y áreas geográficas están expuestas a más de un tipo de peligro (Araya-Muñoz et al., 2017). Asimismo, la frecuencia, el alcance y el impacto económico de los principales riesgos ambientales están en aumento a nivel global (Miller, 2025):

“La gestión de riesgos de peligros múltiples es la práctica de tener un enfoque único y consistente para el monitoreo, la detección y la colaboración de respuesta a los peligros naturales que se puede emplear frente a lo que la Madre Naturaleza le depara. El enfoque de peligros múltiples fomenta un enfoque general sobre cómo las empresas y las comunidades pueden anticipar los riesgos y trabajar juntas para convertir los datos en acción cuando más cuentan” (Miller, 2025)

Cada vez se reconoce más que estos peligros y/o sus impactos a menudo se superponen en el espacio y el tiempo, lo que requiere un enfoque de gestión de riesgos que aborde los peligros múltiples y los riesgos de peligros múltiples resultantes (Šakić Trogrlić et al., 2024; Šakić Trogrlić et al., 2022, Ward et al., 2022, Hochrainer-Stigler et al., 2023, Kreibich et al., 2022).

La gestión moderna del riesgo de desastres reconoce la importancia de contar con sistemas eficaces de alerta temprana como una herramienta fundamental para reducir la exposición y la vulnerabilidad de las comunidades frente a múltiples amenazas (UNDRR, 2015). En este contexto, la Oficina de las Naciones Unidas

para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) promueve el desarrollo e implementación de los Sistemas de Alerta Temprana Multiamenaza (MHEWS, por sus siglas en inglés), como parte integral del cumplimiento del Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030.

La consideración de las multiamenazas es fundamental para la toma de decisiones, ya que proporciona una visión integral de la dinámica natural y la influencia humana sobre ella. De esta manera, se convierte en una medida no estructural basada en el conocimiento, con el objetivo de prevenir o, al menos, minimizar los impactos de los desastres en el medio ambiente, la economía y la sociedad (Valenzuela, 2018).

2.2.1 Remociones en masa

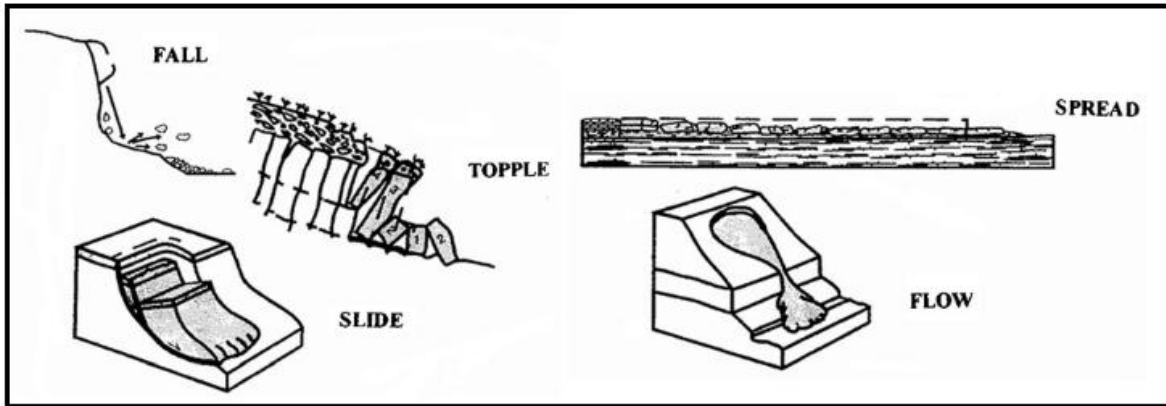
Se define como una “remoción en masa” a todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, detritos o suelos por efecto de la gravedad (Cruden, 1991). Según Hauser (1993), corresponden a movimientos gravitacionales donde se considera una porción específica del terreno que se desplaza hacia un nivel inferior al que estaba posicionado originalmente, donde se evidencian movimientos internos y externos, estos se generan a partir de la combinación de diferentes factores condicionantes que pueden tener un origen geológico, geotécnico, morfológico, físico químico, meteorológico, biológico y/o antrópico (Cruden y Varnes, 1996).

Las remociones en masa son desencadenadas por diversos factores, donde los fenómenos principales son los sismos y las lluvias intensas, ambos capaces de generar todo tipo de remociones en masa (Lara et al, 2008).

2.2.1.1 Tipos de remociones en masa

Dentro de las clasificaciones que existen para diferenciar los tipos de remociones en masa una de las más aceptadas es la que elaboran Cruden y Varnes (1996), donde se determina su clasificación según tipo de movimiento y material, los cuales pueden ser roca o detritos la cual define 5 tipos de procesos, caída, volcamiento, deslizamiento, flujo y extensión lateral ilustrados en la Figura 4.

Figura 4. Clasificación de remociones en masa.



Extraído de Hungr et al. (2013). Adaptado de Cruden y Varnes (1996).

2.2.2.1 Factores condicionantes

Los factores condicionantes representan aquellos elementos estructurales y geográficos que definen el grado de susceptibilidad de un territorio a la ocurrencia de remociones en masa. Estos no son, por sí mismos, responsables del inicio del fenómeno, pero sí configuran un escenario propicio para su desarrollo al disminuir la estabilidad del terreno. Entre los más relevantes destacan las características litológicas, geomorfológicas, topográficas y de cobertura vegetal.

Según Lara y Sepúlveda (2008), la geomorfología, geología y vegetación de un lugar son factores que, en conjunto, generan una situación potencialmente inestable. La presencia de pendientes pronunciadas, la orientación de laderas, la forma del relieve (curvatura), así como el tipo y estado de la cobertura vegetal, configuran una base territorial que puede favorecer o inhibir la ocurrencia de deslizamientos. De esta forma, se entiende que áreas con suelos degradados, vegetación escasa o relieves abruptos presentan una mayor susceptibilidad a estos procesos (León Solar et al., 2023).

En la localidad de Punta Lavapié, estos factores se hacen evidentes: el predominio de acantilados activos, la presencia de terrazas marinas y formaciones geológicas con litologías blandas generan un entorno con alta propensión a remociones,

especialmente tras perturbaciones externas como incendios o lluvias intensas (Ramírez, 2023).

2.2.2.2 Factores desencadenantes

A diferencia de los condicionantes, los factores desencadenantes actúan como elementos catalizadores que, al intervenir sobre un terreno previamente inestable, provocan el colapso de masas de suelo o roca. En el contexto chileno, los principales detonantes reconocidos son las precipitaciones intensas, los sismos y, en los últimos años, el impacto creciente de los incendios forestales (Arias et al., 2018; León Solar et al., 2023).

En particular, las lluvias juegan un rol preponderante al aumentar la saturación hídrica del suelo, reduciendo su cohesión y generando presión intersticial que facilita la movilización de los materiales. De forma similar, los movimientos telúricos pueden desencadenar inestabilidad al fracturar macizos rocosos o reactivar antiguos deslizamientos.

En la zona de estudio, se evidenció que eventos de remoción en masa ocurridos en 2023 fueron precedidos por precipitaciones concentradas en un corto periodo, justo después de un gran incendio forestal que afectó significativamente la cobertura vegetal (Sepúlveda, 2023). Este fenómeno dejó al descubierto las laderas y alteró su estructura superficial, facilitando la acción erosiva del agua sobre un terreno ya debilitado por la pérdida de vegetación y la acción térmica del fuego (Shakesby, 2011).

Susceptibilidad ante remociones en masa

La Susceptibilidad es definida por Sepúlveda (1998) como *“la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado”*. se utiliza para referirse a que áreas son propensas a experimentar un determinado fenómeno (deslizamientos, inundaciones, etc.) sin

considerar cuándo ocurrirá dicho evento, el cual depende de los factores detonantes de los fenómenos que se desarrollen (SERNAGEOMIN, 2012).

En esta misma línea, Villacorta et al. (2012) señala que la susceptibilidad corresponde a la tendencia de una zona a ser afectada por la influencia de un proceso determinado, en este caso, las remociones en masa. El término comenzó a emplearse en la década de 1970 por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), constituyendo la base conceptual para los posteriores desarrollos en la cartografía de amenazas naturales (Chacón 2008).

Chacón (2008) amplía esta visión al señalar que la susceptibilidad se basa en la delimitación espacial de los factores condicionantes de la inestabilidad, con el propósito de identificar y zonificar áreas propensas a movimientos de ladera, sin que ello implique necesariamente un componente temporal. No obstante, advierte que en determinados casos la susceptibilidad ha sido interpretada como una forma de peligrosidad relativa, ya que un mayor grado de susceptibilidad tiende a asociarse con una mayor probabilidad o frecuencia de ocurrencia de los procesos.

2.2.1 Incendios Forestales y la pérdida de suelo

Los incendios naturales durante épocas prehistóricas han sido ampliamente documentados (Simmons, 1989). Donde el fuego como agente modelador del paisaje ha estado presente en el planeta tierra hace millones de años, siendo parte importante del cómo evoluciona, equilibran y regulan los distintos ecosistemas que se desarrollan.

Esta estabilidad a sufrido cambios importantes a consecuencia de la acción humana en la intervención que este ha ejercido sobre los ecosistemas haciendo uso de los recursos renovables y no renovables, siendo la acción humana uno de los factores principales en la causa de incendios forestales (Castillo et al, 2003). Los cuales se producen a consecuencia de la acción de agentes “de ignición, de origen humano o natural, y su interacción con factores ambientales favorables a la combustión y propagación.” (Garrido et al, 2018).

El humano al modificar el espacio ha alterado el ciclo natural de incendios, y en ocasiones adquiere dimensiones dramáticas al afectar económicamente su patrimonio. (Michalijo et al, 2013)

Dentro de los factores que influyen en la ocurrencia de incendios forestales se identifican el tipo y estado de la cubierta vegetal, las condiciones climáticas generales y la topografía del terreno. Estos factores no actúan de forma aislada, sino que se integran de manera compleja, incrementando las situaciones de riesgo. Por ejemplo, altas temperaturas y baja humedad del aire aumentan el riesgo de ignición, especialmente en áreas con vegetación altamente inflamable y en laderas expuestas (Chuvieco, 2003).

Los incendios forestales son responsables de la eliminación de materia orgánica y nutrientes de los suelos, siendo uno de los principales agentes responsables de la erosión del suelo y degradación de la tierra, el cual es un componente principal del ecosistema (Mataix-solera y Guerrero, 1999). Para Shakesby, R.A. (2011) los incendios forestales son considerados en algunos lugares como el agente más importante de cambio geomorfológico.

En las últimas décadas la recurrencia e intensidad de los incendios forestales se ha acentuado, este aumento se relaciona con el cambio climático y prácticas humanas como la fragmentación del paisaje, plantaciones exóticas inflamables y abandono de tierras.

“Varios estudios muestran que estas transformaciones climáticas, combinadas con ciertas prácticas de uso del suelo que afectan la distribución del combustible, contribuyen al aumento en la ocurrencia e intensidad de los incendios forestales, especialmente en climas mediterráneos” (Ciocca et al., 2023)

La Zona Centro-Sur de Chile (ZCCh) (32°–39,5° S), en la cual se sitúa la zona de estudio es un ejemplo crítico, afectada por una mega sequía, acumulación de combustible y alta concentración de plantaciones forestales (Ciocca et al., 2023).

Las proyecciones climáticas para el siglo XXI indican un aumento en la temperatura anual y una disminución en la precipitación en todo Chile (Ciocca et al., 2023).

2.3 Peligro de incendios forestales

Las investigaciones que evalúan el peligro de incendios forestales se desarrollan desde distintas perspectivas. En este sentido, Jaque Castillo et al (2021) plantea una metodología para evaluar el riesgo de incendios forestales en el área metropolitana de Concepción, donde el enfoque es la combinación de datos multivariados que aportan en la creación de un modelo de aprendizaje automático.

Dicho enfoque se desarrolla a través del uso de datos geoespaciales e imágenes satelitales que aportan en la generación de factores de análisis tanto antrópicos, ambientales y topográficos como agentes desencadenantes de incendios forestales.

El modelo desarrolla un esquema de clasificación supervisado destinado a definir la probabilidad de recurrencia de incendios en toda el área de estudio. A través de la aplicación de técnicas estadísticas PCA (análisis de componentes principales) y la reclasificación a través de un mapa de red SOM definido por Kohonen, red que desarrolla aprendizaje no supervisado competitivo, en dos escenarios distintos, el primero considerando toda el área no urbana cubierta por plantaciones nativas, el segundo, considera toda el área no urbana cubierta de plantaciones forestales, en ambos casos se genera una categorización del riesgo en la zona de estudio, mediante la definición de 5 clases: cerca de 0, bajo, moderado, alto y muy alto.

Desde otra perspectiva, Etxeberria et al (2002) evalúa el peligro de incendios forestales mediante una metodología que combina sistemas de información geográfica y modelos de propagación. La cual se desarrolla mediante tres fases;

- a) Mapa de peligro de inicio, calculado con un modelo cualitativo que pondera inflamabilidad de la vegetación, actividades humanas, insolación y altitud; lo que permite zonificar el área de estudio mediante la clasificación en niveles de peligrosidad definiendo las zonas con mayor exposición

Posterior a esto se debe definir la capacidad de propagación de fuego de cada píxel

- b) Mapa de capacidad de propagación, estimado con el modelo BEHAVE calculando la velocidad de propagación del fuego mediante vegetación, pendiente y viento.
- c) Simulaciones de propagación: múltiples escenarios con focos aleatorios, integrando los mapas previos como superficies de fricción, para obtener la probabilidad de áreas quemadas

El objetivo de la metodología es la zonificación de un territorio en relación con su probabilidad de resultar quemado por algún incendio. A través de la creación de los mapas antes descritos que deriva en la generación de simulaciones de incendios.

Desde una perspectiva institucional IDEAM (2011) genera un protocolo metodológico para zonificar el riesgo a incendios forestales a través de la evaluación de los factores amenaza y vulnerabilidad. A través de la recopilación de datos espaciales que aportan en el desarrollo de una metodología multivariable que pondera y les da una clasificación y valor secuencial a los distintos factores de amenaza y vulnerabilidad.

El análisis de amenaza se compone por el desarrollo de las variables de susceptibilidad de la vegetación (tipo, carga, duración y humedad de combustibles), factores climáticos, factores del relieve, accesibilidad y frecuencia histórica de incendios.

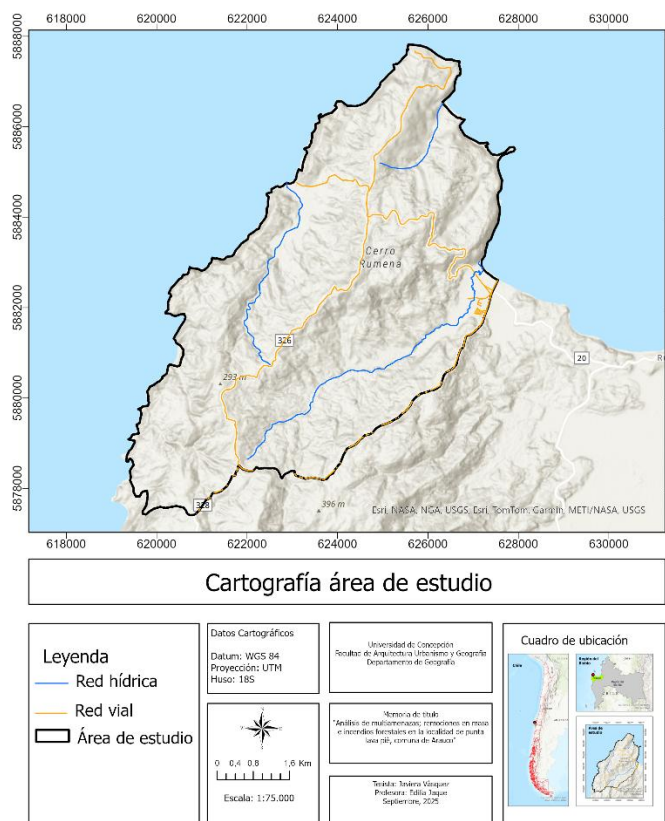
Por otro lado, el análisis de vulnerabilidad está compuesto por el desarrollo de las variables de vulnerabilidad económica, vulnerabilidad institucional, vulnerabilidad de la infraestructura, vulnerabilidad territorial, vulnerabilidad poblacional, vulnerabilidad patrimonial.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Área de estudio

El área de estudio se localiza en el extremo occidental de la península de Arauco, comuna de Arauco, Región del Biobío, Chile, entre las latitudes 37°14'69" y 37°24'22" S y las longitudes 73°64'62" y 73°55'73" W. El límite suroriental corresponde a la ruta P-338, desde el inicio en la localidad de Llico hasta alcanzar, por el poniente, el sector de caleta Los Piures. Hacia el norte, el área se encuentra delimitada por la localidad de Punta Lavapié (Figura 5).

Figura 5. Localización del área de estudio.



Elaboración propia, ArcGis Pro.

Desde el punto de vista tectónico, la zona se emplaza en una cuenca de antearco activa vinculada a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana. Este régimen ha generado deformación en las unidades sedimentarias, fracturación de materiales y, en consecuencia, condiciones propicias para la inestabilidad

estructural de depósitos blandos (Encinas et al., 2008; Melnick et al., 2009). Estratigráficamente, el área de estudio refleja la configuración típica de un margen convergente activo del sur de Chile. En ella afloran unidades del Grupo Lebu principalmente las formaciones Milongue y Boca Lebu, ambas de edad eocena que conforman la base del relleno sedimentario de la cuenca de Arauco. Estas unidades se encuentran recubiertas discordantemente por depósitos marinos del Mioceno y, en la superficie, por acumulaciones cuaternarias recientes.

Desde una perspectiva geomorfológica, Punta Lavapié y su entorno inmediato presenta una estructura litoral compleja, resultado de la interacción de procesos costeros, tectónicos y sedimentarios. Estos han modelado un relieve dominado por terrazas marinas, acantilados y llanuras de abrasión, que interactúan con pequeñas cuencas fluviales y la dinámica tectónica regional (CIREN & SIT Rural, 2024).

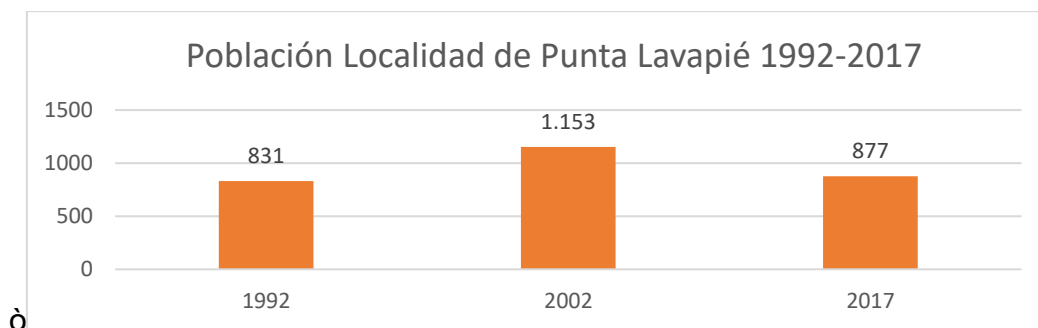
Los acantilados costeros del área, especialmente en Punta Lavapié, están constituidos por areniscas finas a medias con intercalaciones arcillosas, sometidas a intensa erosión marina y meteorización superficial. Algunos de estos acantilados superan los 30 m de altura y presentan pendientes mayores a 45°, lo que configura zonas altamente predisuestas a la inestabilidad del terreno, en particular luego de precipitaciones intensas o de la pérdida de cobertura vegetal (Ramírez, 2023; SERNAGEOMIN, 2012).

El área de estudio se inserta en un clima mediterráneo costero, caracterizado por precipitaciones concentradas en los meses de invierno y veranos secos, con un promedio anual cercano a los 1.200 mm. Esta dinámica pluvial, sumada a la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos asociados al cambio climático, potencia los procesos de inestabilidad en laderas, especialmente tras la ocurrencia de incendios forestales. En cuanto a la cobertura vegetal, la localidad de Punta Lavapié presenta un mosaico compuesto por remanentes de bosque nativo, plantaciones forestales de especies exóticas y áreas degradadas por la recurrencia de incendios, lo que incide directamente en la susceptibilidad de los suelos a la erosión y a procesos de remoción en masa.

A nivel socioespacial, Punta Lavapié corresponde a una localidad costera de carácter pesquero-artesanal, con asentamientos emplazados en un entorno de relieve abrupto y alta exposición a amenazas naturales. La interacción entre condiciones biofísicas, transformaciones del uso de suelo y presencia de comunidades costeras configura un escenario en el que los riesgos asociados a incendios forestales y remociones en masa adquieren una relevancia crítica, justificando la necesidad de un análisis integrado bajo el enfoque de multiamenazas.

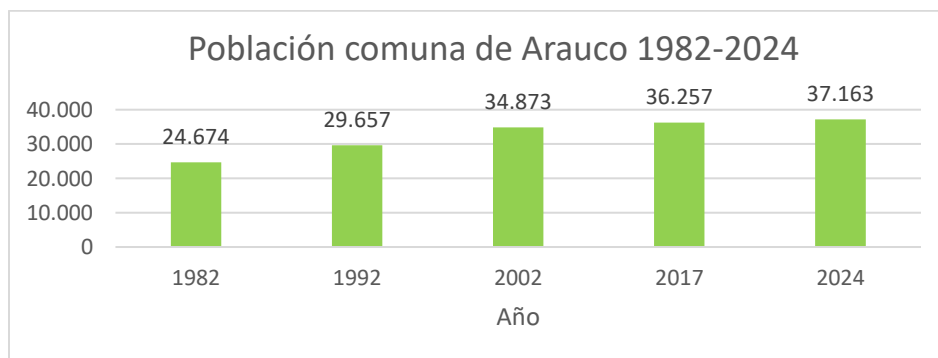
Los patrones demográficos refuerzan este diagnóstico: en la localidad de Punta Lavapié se observa una oscilación poblacional en la Figura 6, con crecimiento entre 1992 y 2002 (de 831 habitantes en 1992 a 1.153 en 2002; +38,7%) y una contracción entre 2002 y 2017 (de 1.153 a 877; -23,9%). En contraste, la comuna de Arauco (Figura 7) evidencia una tendencia de crecimiento sostenido de largo plazo entre 1982 y 2024 (de 24.674 a 37.163; +50,6%).

Figura 6. Gráfico crecimiento de población



Fuente: Ciudades, pueblos, aldeas y caseríos. 1993,2005,2019.

Figura 7. Gráfico de población, comuna de Arauco 1982-2024



Fuente: INE

3.1 Marco metodológico de modelación FR para remociones en masa e incendios forestales

Para el desarrollo de la investigación se implementará una metodología orientada, por un lado, al análisis de la susceptibilidad a la ocurrencia de remociones en masa y, por otro, a la evaluación de la amenaza de incendios forestales. El propósito de este enfoque es actualizar el inventario de multiamenazas de la región, integrando los datos obtenidos a partir de la revisión de imágenes satelitales y de las visitas en terreno, las cuales permiten comprender el contexto territorial y su situación actual. Con ello, se busca avanzar hacia una comprensión más profunda de cómo interactúan las distintas amenazas presentes en la localidad y de qué manera estas se manifiestan y evolucionan.

La metodología para evaluar la susceptibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa y amenaza de incendios forestales en la localidad de Punta Lavapié será a través de un método cuantitativo determinístico “Frequency ratio” el cual se basa en el desarrollo de técnicas de frecuencia relativa y análisis de tasa de predicción. Modelo metodológico utilizado en Nepal por investigadores que realizaron estudios donde aplicaron modelos de factor de certeza, índice de entropía y regresión logística en SIG y compararon los resultados de susceptibilidad a remociones en masa utilizando 321 deslizamientos de tierra y 12 factores condicionantes para determinar la susceptibilidad de ocurrencia de estos procesos en la zona (Acharya y Lee, 2019)

3.1.1. Inventario de remociones en masa

Para la ejecución de la investigación, es fundamental una comprensión espacial detallada de los factores condicionantes y del fenómeno de las remociones en masa. Para ello, es necesario recopilar información geoespacial sobre los puntos de activación de estos procesos. En este sentido, la elaboración de un inventario de remociones en masa resulta crucial para el mapeo y análisis de su distribución y recurrencia (Du et al., 2017).

Dicho inventario se construyó mediante la aplicación de diversos métodos complementarios: observación in situ, revisión bibliográfica y análisis de imágenes

satelitales. En primera instancia se recolectó información bibliográfica registrada en prensa, pero principalmente a través de los informes técnicos emitidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en el cual se pudieron extraer 4 informes donde se indican puntos de remociones en masa registradas en la zona de estudio, puntos que posteriormente con el apoyo del visualizador Google Earth Pro y visitas en terreno fueron confirmados.

Para la recolección de datos en terreno, en conjunto con “Grupo de estudio Multiamenazas Biobío” se realizó una visita al área de estudio durante agosto de 2024, donde se pudieron recabar datos del terreno para obtener una visión más clara del lugar. Se mapearon 13 puntos observados en terreno mediante la utilización de GPS y dron para la determinación de ubicación y la toma de fotografías aéreas de las remociones en masa observables.

Para la elaboración del inventario, cada remoción registrada fue identificada mediante un código (ID), detallado en el Anexo 1, que va desde RM1 hasta RM64. Para cada caso se especifica el tipo de punto (entrenamiento o prueba), las coordenadas correspondientes, ubicación, fecha, tipo de movimiento, la fuente de información y el nivel de confiabilidad asociado.

3.1.2 Inventario incendios forestales

Para el desarrollo de la investigación es necesario generar un inventario de los puntos donde se han generado incendios forestales. Se obtuvieron 26 puntos extraídos desde la base de datos de IDE-CONAF durante los periodos 2010-2023, se debe indicar que corresponden a las coordenadas del punto de ignición de cada incendio, capturadas por GPS con errores de medición entre 5 y 10 metros por el organismo antes mencionado.

Para la elaboración del inventario, cada incendio forestal registrado fue identificado mediante un código (ID), detallado en el Anexo 2, que va desde IF1 hasta IF26. Para cada caso se especifica el tipo de punto (entrenamiento o prueba), las coordenadas correspondientes, ubicación, fecha, causa, la fuente de información y el nivel de confiabilidad asociado.

3.1.2 Material topográfico digital

Para el desarrollo de la investigación se requiere un Modelo Digital de Elevación definido con las siglas DEM, por su traducción en inglés, el cual es una representación 3D del terreno, material topográfico relevante para analizar los factores incidentes en el análisis de riesgo de remociones en masa por la representación digital del terreno que representa (Van Western, et al., 2008).

Con el desarrollo del DEM es posible “generar muchos mapas derivados a partir de MDE utilizando operaciones SIG bastante sencillas “(Moore et al., 2001). El material geomorfológico que se puede derivar del uso de esta herramienta resulta necesario para cartografiar la susceptibilidad a remociones en masa (Acharya y Lee., 2019). Para este caso se obtendrán de forma directa factores condicionantes topográficos como el grado de pendiente, orientación de pendiente, curvatura y elevación, esto a través del tratamiento de estos datos en el programa ArcGis Pro. (Baltierra F., 2023)

para que este trabajo se pueda desarrollar se utilizó un DEM de ALOS PALSAR con una resolución de 12.5 m. extraído de forma gratuita desde los servicios web de Alaska Satellite Facility (ASF).

3.2 Método estadístico “Frequency Ratio”

Para la realización del marco metodológico que evalúa la susceptibilidad de ocurrencia de remociones en masa y amenaza de incendios forestales se requiere una metodología sólida, donde el método a utilizar es el “Frequency Ratio” el cual se erige como una herramienta analítica fundamental.

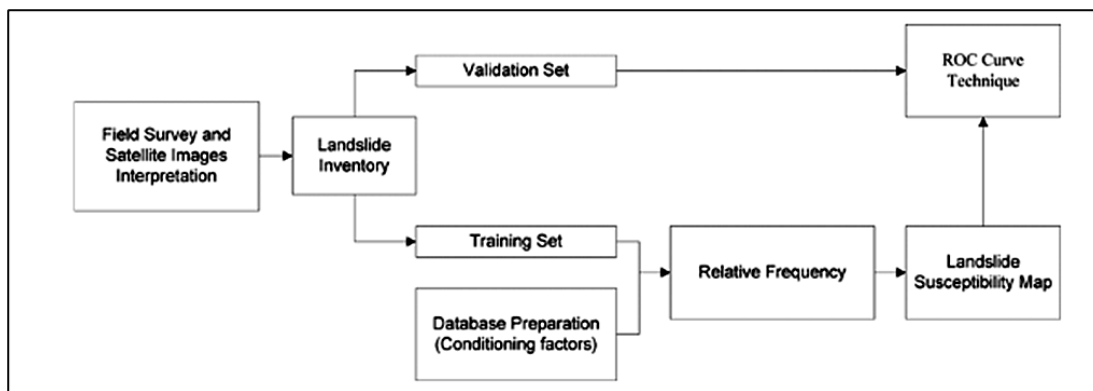
“Frequency Ratio” es un método estadístico bivariado que se emplea para evaluar la relación espacial entre la ocurrencia de un evento específico en este caso remociones en masa e incendios forestales (cada uno por separado) y diversos factores ambientales (Van Westen et al., 2008) que se desarrollan en una zona de estudio.

El método “Frequency ratio” se fundamenta en la correlación espacial entre eventos históricos ocurridos y las condiciones geográficas o ambientales que los favorecieron, permitiendo así estimar la probabilidad de recurrencia futura en función de dichas asociaciones. Esta metodología cuantitativa (figura 8) busca identificar la influencia relativa de distintos factores condicionantes sobre la ocurrencia del fenómeno analizado, mediante el cálculo de la razón entre la proporción de eventos presentes en una clase específica de un factor y la proporción de dicha clase en la totalidad del área de estudio (Van Westen et al., 2008).

En el caso particular por ejemplo del análisis de la primera amenaza a investigar, susceptibilidad a remociones en masa, la aplicación del modelo implica la superposición de un inventario georreferenciado de remociones con capas temáticas que representan variables físicas o antrópicas relevantes como pendiente, orientación, uso de suelo o geología, lo que permite determinar con precisión el peso estadístico de cada clase o categoría dentro de los factores evaluados. Este procedimiento permite jerarquizar la contribución de cada variable, asignando valores de susceptibilidad relativa que son útiles para delimitar zonas con distintos niveles de exposición potencial.

Este enfoque parte del supuesto de que existe una relación conocida y constante entre los deslizamientos y los parámetros que los condicionan, lo cual permite construir modelos predictivos sobre la base de datos históricos observables (Dai et al., 2001).

Figura 8. Diagrama explicativo de la metodología Frequency ratio



Fuente: Acharya y Lee, 2019.

Especificaciones del modelo

$$FR = \frac{N_{pix}(LX_i) / \sum_{i=1}^m N_{pix}(LX_i)}{(N_{pix}(X_j) / \sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j))}$$

FR es la relación de frecuencia de la clase i del parámetro j . $N_{pix}(LX_i)$ es el número de píxeles con deslizamientos dentro de la clase i contenidos en el parámetro X . $N_{pix}(X_i)$ es el número de píxeles dentro de la variable (parámetro) X_j . m es el número de clase en la variable X_i y n es el número de parámetros en el área de estudio (Acharya et al., 2019; Regmi et al., 2014).

Para el siguiente paso FR se normalizan en el rango de valores de probabilidad (0,1) pasando a ser *Relative Frequency* (RF), RF de cada clase se calcula utilizando la siguiente ecuación (Acharya y Lee, 2019):

$$RF = \frac{FR_{ij}}{(\sum_{i=1}^m FR_{ij})}$$

Luego de la normalización de la ecuación RF, esta considera con el mismo peso todos los factores condicionantes lo cual genera un problema, para solucionarlo se debe calcular la Tasa de Predicción -*Prediction rate*- (PR) para así calificar cada factor con el conjunto de datos de entrenamiento como:

$$PR = \frac{(RF_{\max} - RF_{\min})}{[(RF_{\max} - RF_{\min})_{\min}]}$$

Para finalizar es necesario calcular el LSI (*Landslide Susceptibility Index*) el cual se calcula mediante la suma del producto de PR de cada factor y el RF de cada clase como se expresa a continuación:

$$LSI = \sum (PR * RF)$$

Con los valores obtenidos de la ecuación que calcula el LSI se genera el mapa de susceptibilidad ante remociones en masa y amenaza de incendios forestales

3.3 Factores considerados

Para la clasificación de los parámetros considerados para el desarrollo de la metodología se definen tres categorías planteadas por (Akgut et al., 2007), geológico, topográfico y de condicionamiento ambiental.

Tabla 1. Factores condicionantes

Factor condicionante	Amenaza	Fuente	Resolución espacial o escala	Fecha de adquisición/producción
Curvatura	RM	DEM de ALOS PALSAR	12.5 m/píxel	Diciembre 2024
Pendiente	RM / IF			Diciembre 2024
Orientación de pendiente	RM			Diciembre 2024
NDVI – Land Cover	RM / IF	Calculado en Google Enginee mediante MSI Sentinel-2, instrumento multiespectral, conjunto de datos de nivel 2A	10 m/píxel	Marzo 2024
Geomorfología	RM	Grupo de estudios multiamenazas	12.5 m/píxel	Agosto 2024
Distancia red hídrica	RM/IF	BCN	Escala nacional	Diciembre 2024
Distancia red vial	RM	BCN	Escala nacional	Diciembre 2024
Geología	RM	Volosky, M		Marzo 2024
Contenido de humedad (NDII)	IF	Calculado en Google Enginee mediante satélite Landsat 8 OLI/TIRS	12.5 m/píxel	Marzo 2024
Velocidad del viento	IF	Atlas global del viento	12.5 m/píxel	Marzo 2024
Tipo de combustible	IF	Calculado en Google Enginee mediante MSI Sentinel-2, instrumento multiespectral, conjunto de datos de nivel 2A	12.5 m/píxel	Marzo 2024
Duración del combustible	IF	Calculado en Google Enginee mediante MSI Sentinel-2, instrumento	12.5 m/píxel	Marzo 2024

		multiespectral, conjunto de datos de nivel 2A		
FVC cobrimiento horizontal	– IF	MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Terra	250 m	Marzo 2024
Altitud	RM	DEM de ALOS PALSAR	12.5 m/pixel	Marzo 2024

Fuente: creación propia

3.3.1 Remociones en masa

3.3.1.1 Curvatura

la curvatura se define como el cambio en la pendiente a lo largo de un pequeño arco de la curva (Dou et al., 2015), la cual describe la forma de la superficie terrestre y su influencia en los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos.

Para el caso del análisis de remociones en masa en este estudio se realiza combinando la curvatura de perfil y la curvatura plana (Castro-Venegas et al, 2025). Las curvaturas positivas representan relieves convexos, la curvatura cero representa plana y las curvaturas negativas representan relieves cóncavos. (Lee y Pradhan, 2007) cuanto más negativo es el valor, mayor es la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra según Addis., 2023. donde la pendiente es más o menos constante; y Curvatura negativa (relieve cóncavo), donde la pendiente aumenta con la distancia (Troch et al., 2002).

Van Westen et al. (2008) enfatizan el uso de derivados de DEM como la convexidad en las evaluaciones de susceptibilidad a deslizamientos de tierra. Comprender la curvatura es esencial para identificar áreas propensas a la escorrentía concentrada y la erosión.

Para el cálculo de esta variable se utilizó el DEM anteriormente mencionado, a través de la utilización de la herramienta *Curvature* del *Spatial Analyst Toolbox* en ArcGis Pro.

3.3.1.2 Pendiente

El ángulo de la pendiente es un impulsor principal de la remoción en masa, que influye directamente en las fuerzas gravitacionales en una ladera, este es una característica topográfica y factor condicionante importante a la hora de evaluar susceptibilidad a deslizamientos (Akgun et al., 2007). Las pendientes más pronunciadas generalmente experimentan mayores tensiones de corte, lo que aumenta la probabilidad de falla. (Van Westen et al., 2008).

Para este trabajo, el mapa de elevación es creado con el DEM de ALOS PALSAR de 12.5 reclasificando sus valores, según lo trabajado por Castro-Venegas et al. (2025).

3.3.1.3 Orientación de laderas

La orientación de laderas influye en el microclima, la distribución de la vegetación y la humedad del suelo. Esta variable representa la dirección en la cual la pendiente se orienta, la cual tiene una directa relación en como la pendiente interactúa con la erosión, la evapotranspiración, la meteorización superficial, la desertificación y la radiación solar los cuales influyen directamente en la ocurrencia de remociones en masa (Lee y Pradhan, 2007).

Este factor juega un papel importante en la susceptibilidad a remociones en masa ya que puede influir directamente en la exposición de las laderas a radiación solar y a las precipitaciones que se desencadenen en el terreno, condicionando el crecimiento de la vegetación y la humedad del suelo (Catani, et al., 2013).

Las laderas que poseen una orientación hacia el sur tienen una mayor capacidad de retención de humedad, mientras que aquellas con una orientación norte son más proclives a recibir mayor luz solar, tornándose más secas. (Castro-Venegas et al., 2025; Méndez-Toribio et al., 2016; Pham et al., 2017).

Para el cálculo de esta variable se utilizó el DEM anteriormente mencionado, a través de la utilización de la herramienta *Aspect* del *Spatial Analyst Toolbox* en ArcGis Pro.

3.3.1.4 NDVI y Land Cover

El índice normalizado de vegetación diferenciado (Normalized Difference Vegetation Index) resulta importante al momento de evaluar la susceptibilidad ante remociones en masa de un área de estudio debido a que el NDVI aporta información en torno al estado de la vegetación, lo cual es un factor condicionante que afecta significativamente la estabilización de laderas, ya que la baja cobertura vegetal puede crear condiciones propicias para la ocurrencia de deslizamientos (Doan V. et al., 2023). Aquellos valores más altos de NDVI sugieren una mayor densidad vegetal lo cual representa una mayor cohesión del suelo lo cual reduce el riesgo ante deslizamientos de suelo, a la inversa, valores bajos revela una cobertura vegetal escasa o suelos expuestos, lo cual aumenta la inestabilidad de laderas (Castro-Venegas et al., 2025; Varnes, 1984; Doan et al., 2023). Aquellos suelos desprovistos de vegetación antes mencionados, presentan una mayor susceptibilidad a deslizamientos en comparación con ecosistemas boscosos o praderas que exhiben valores elevados de NDVI. Asimismo, el NDVI facilita la identificación y exclusión de cuerpos de agua, donde los deslizamientos de tierra no ocurren (Acharya y Lee, 2019).

Para la construcción de esta variable, se recogen datos desde Google Earth Engine (GEE), plataforma desde la cual se elabora un mapa que define el Índice normalizado de vegetación diferenciado (Normalized Difference Vegetation Index) para el área de estudio, El procedimiento de clasificación se basó en datos del radar de apertura sintética Sentinel-1, con una resolución global de 10 m (Zanaga et al., 2022). se obtienen imágenes en el intervalo de tiempo de 01 de enero de 2023 al 31 de diciembre de 2023.

Cabe señalar que el sensor incluye 12 bandas espectrales con resoluciones que van de 10 m a 60 m. Castro-Venegas et al., 2025 propone utilizar las bandas rojas y del infrarrojo cercano (10 m) para obtener el NDVI usando la siguiente ecuación:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) = (\text{B8} - \text{B4}) / (\text{B8} + \text{B4})$$

3.3.1.5 Geomorfología

La geomorfología, como disciplina científica, se ha dedicado a analizar de manera sistemática las formas del relieve, considerando tanto su origen como los procesos que las generan y las formas que resultan de estos (Canchola et al., 2016; Ortiz, 2013). La geomorfología está directamente relacionada con las remociones en masa debido a que como disciplina geológica analiza los procesos dinámicos que se desarrollan en la superficie terrestres, desde la morfodinámica, la cual integra una serie de procesos que cambian la estructura de la tierra y condicionan en desarrollo de procesos dinámicos en la corteza (Forero-Esquiop y Duarte-Delgado, 2019).

El desarrollo de esta variable fue dado a través del trabajo realizado por el grupo de estudios Multiamenazas Biobío, la cual fue trabajada como ráster en el software ArcGIS Pro.

3.3.1.6 Unidades geológicas

La importancia de la litología en los estudios de susceptibilidad a remociones en masa está suficientemente bien documentada (Abbas, 2021), fundamentalmente porque las distintas unidades geológicas presentan diferentes grados de propensión a desencadenar procesos geomorfológicos. Por ejemplo, los suelos de grano fino, como las arcillas, poseen una elevada cohesión, pero al saturarse de agua, su resistencia al corte disminuye, creando condiciones favorables para superficies de deslizamiento (Lara y Sepúlveda, 2008). En efecto los mapas geológicos representan un elemento esencial en los enfoques heurísticos y estadísticos utilizados para evaluar el riesgo de deslizamientos (Van Westen, 2008).

Para desarrollar esta variable se utilizó de guía el material elaborado por Andrade (2025), mapa geológico elaborado a partir de la información de Volosky (2021). Material en formato Shapefile, que se trabajó para ajustarse al área de estudio mediante el software ArcGis Pro.

3.3.1.7 Distancia a cursos fluviales

La distancia a cursos fluviales incrementa el riesgo de deslizamientos en las laderas, ya que el flujo de agua puede socavarlas y los niveles altos de aguas subterráneas afectan su estabilidad. Además, la distancia a los ríos influye en la erosión, la saturación del suelo y la firmeza de las riberas. (Castro-Venegas et al, 2025), por lo cual aquellas zonas más aledañas a los cursos fluviales tienen más susceptibilidad a remociones en masa (Castro-Venegas et al, 2025; Pham et al., 2017).

Considerando su influencia en la inestabilidad de las laderas, la distancia a los ríos se calculó utilizando la distancia euclidiana como base (Acharya y Lee, 2019).

Puesto que la literatura no presenta un acuerdo sobre la clasificación de las distancias a los ríos, los estudiosos han empleado diversas distancias en función de la cercanía al elemento topográfico (Aykut et al., 2007) en este caso se realizó a través de la utilización de la herramienta *“Euclidian Distance”* del *“Spatial Analyst Toolbox”* en ArcGis Pro, a partir de la capa vectorial de red hidrográfica extraída de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN).

3.3.1.8 Distancia a red vial

Los cortes y rellenos artificiales de las carreteras provocan inestabilidad en las pendientes (Tien Bui et al., 2011). Esto significa que la construcción de carreteras, que involucra la excavación de montañas, disminuye la estabilidad de suelos y rocas, dejando las laderas más susceptibles a deslizamientos, especialmente durante lluvias intensas (Wu et al., 2023).

Considerando su influencia en la inestabilidad de las laderas, la distancia a la red vial se calculó utilizando la distancia euclidiana como base (Acharya y Lee, 2019).

En este caso la clasificación de distancia a red vial se realizó a través de la utilización de la herramienta *“Euclidian Distance”* del *“Spatial Analyst Toolbox”* en ArcGis Pro, a partir de la capa vectorial de Red vial extraída de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN).

3.3.2 Incendios forestales

3.3.2.1. Tipo de combustible

Para definir la susceptibilidad de la cobertura vegetal ante incendios se requiere evaluar la condición pirogénica que existe en esta y cómo se comporta frente a la amenaza antes mencionada (Huentecol, 2023), para el desarrollo de esto, se clasifican las siguientes variables para la evaluación de la amenaza, por tipo, duración y carga del combustible en este caso de la materia vegetal del área de estudio.

Esta variable corresponde a el tipo de cobertura vegetal que se identifica en el área de estudio y que podría ser afectada por un incendio (IDEAM, 2011; Huentecol, 2023). Para la clasificación de la cobertura vegetal se recogen datos desde Google Earth Engine (GEE), plataforma desde la cual se elabora un mapa que define el Índice normalizado de vegetación diferenciado (Normalized Difference Vegetation Index) para el área de estudio, El procedimiento de clasificación se basó en datos del radar de apertura sintética Sentinel-1, con una resolución global de 10 m (Zanaga et al., 2022). Clasificación con la cual definiremos la cobertura vegetal “land cover”, debido a que es el método que en el desarrollo de la investigación ha demostrado ser el más coincidente con la realidad territorial del área de estudio.

Tabla 2. Tipo de cobertura vegetal, adecuada a la definición de Paramo (2007)

Tipo de cobertura	Descripción
Agua	Cuerpos de agua superficiales
Suelo construido y desnudo	Áreas urbanas, caminos, suelo expuesto
Pastizal	Cobertura herbácea
Vegetación escasa	Matorrales, cultivos, vegetación rala
Vegetación densa	Bosque nativo cerrado
Vegetación muy densa	Plantaciones forestales (pino, eucalipto)

A partir de la definición establecida sobre los tipos de combustibles, se elaboró una clasificación propia (tabla 2), la cual se adaptó de lo propuesto por Páramo (2007)

para el contexto colombiano (IDEAM, 2011). En este modelo, los combustibles se agrupan en dos categorías principales: combustibles ligeros y combustibles pesados.

Combustibles ligeros. Son los que tienen menos de 1 cm de diámetro: pastos, hierbas, hojas, pinocha, helechos, líquenes, ramillas, entre otros. Se inflaman con facilidad y se consumen rápidamente cuando están secos.

Combustibles pesados. Son los que tienen más de 1 cm de diámetro: troncos, tocones, ramas gruesas, raíces, entre otros (Árboles y arbustos). Se inflaman más difícilmente que los ligeros y arden más despacio (Paramo, 2011; IDEAM, 2011).

Para abordar esta variable se clasificará mediante las categorías antes mencionadas, combustible ligero y combustible pesado y para aquellas coberturas que no tengan estas características se establecerán como “no combustible”, expuesto en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación por tipo de cobertura y combustible

Tipo de cobertura	Tipo de combustible	Categoría
Superficies impermeables	No combustible	No combustible
Cuerpos de agua	No combustible	No combustible
Pastizales	Pastos/hierbas	Combustible ligero
Vegetación escaza	Árboles/arbustos/hierbas	Combustible ligero
vegetación densa	Arboles/arbustos	Combustible pesado
Vegetación muy densa	Arboles	Combustible pesado

3.2.1.2 Duración del combustible

Se refiere la cantidad de tiempo medido en horas de ignición que requiere cada tipo de cobertura considerada por tipo de combustible (Huentecol, 2023), se ocupa la misma clasificación (Tabla 3) de cobertura que, en la variable anterior, ajustando la clasificación en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación por tipo de cobertura y la duración en horas de ignición del combustible

Tipo de cobertura	Duración del combustible
Superficies impermeables	No combustible
Cuerpos de agua	No combustible
Pastizales	1 hora
vegetación escaza	10 horas
vegetación densa	100 horas
Vegetación muy densa	100 horas

3.1.1.3. NDVI:

La variable biomasa indica la cantidad de combustible disponible para que se genere la combustión lo cual se expresa en toneladas por hectárea Ton/Ha (IDEAM, 2011; Huentecol, 2023). Para el cálculo de esta variable nos dispondremos a lo establecido por el parámetro NDVI definido anteriormente, el cual determina el estado de las plantas que existen en el terreno.

3.1.1.4 Cubrimiento horizontal

De acuerdo con Huentecol (2023), el cubrimiento horizontal hace referencia al grado de proximidad y continuidad de la vegetación en el plano horizontal de la superficie terrestre, el cual puede evaluarse mediante el “Índice de Campos Continuos de Vegetación” (VFC). Una cobertura vegetal densa y conectada entre sí incrementa las posibilidades de propagación del fuego. Por su parte, Ariza (2020) lo describe como la fracción de cobertura vegetal viva que ocupa la superficie, a partir de la “Fracción de Cobertura Vegetal” (FVC). En ambos enfoques, los valores se expresan en una escala del 0 al 100 % de cobertura arbórea según Braun-Blanquet, integrando aspectos de abundancia y dominancia de la vegetación.

3.1.1.5 NDII (Contenido de humedad)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada del Infrarrojo (NDII) es una herramienta empleada para estimar el nivel de humedad presente en la vegetación, lo que resulta clave para determinar su capacidad de resistir el impacto del fuego. Una menor humedad implica una mayor disponibilidad de material combustible susceptible de ignición rápida (IDEAM, 2011). Este índice presenta un rango de valores que oscila entre -1 y 1: registros entre 0 y -1 reflejan vegetación sometida a estrés hídrico creciente; valores cercanos a 0 pueden corresponder a vegetación en capacidad de campo o a la presencia de nubes; mientras que valores positivos, entre 0 y 1, indican vegetación sin signos de estrés hídrico (Parra et al., 2011; Sriwongsitanon et al., 2015).

la clasificación final considera: muy bajo (-1/ -0,1); bajo (0,1/ 0); moderado (0/0,1); alto (0,1/0,2); muy alto (0,2/1).

3.1.2.6 Velocidad del viento

La velocidad del viento está directamente relacionada por la propagación rápida del fuego más aun combinada con otros factores por ejemplo la pendiente que al existir zonas de mayor inclinación genera vientos convectivos ascendente, es decir que el aire se calienta por el terreno lo cual genera que el fuego ascienda y aumente la velocidad de propagación (CENEPRED, 2020; Moscovich et al., 2014; Omi, 2005). Para el desarrollo de esta variable se utilizó de referencia el trabajo realizado por el CENEPRED (2020) donde se utilizarán los datos espaciales generados por el Atlas global de vientos, a una escala de 10 m los cuales se clasificarán mediante la escala Beaufort la cual estima la fuerza del viento a partir de su velocidad.

3.1.2.8 Distancia a red vial

La apertura o mejora de caminos y carreteras desempeña un papel importante en la dinámica de los incendios forestales, ya que genera áreas de influencia que incrementan la probabilidad de aparición de focos de fuego. Esto ocurre debido a su cercanía con la vegetación y a que funcionan como un enlace directo entre las actividades humanas y el entorno forestal, facilitando el acceso de la población a zonas boscosas (Abdo et al., 2022; Miranda et al., 2021; IDEAM, 2011).

3.1.2.9 Altitud

La topografía juega un papel fundamental en el desarrollo de las condiciones meteorológicas de una región, debido al comportamiento del clima de la zona. Para analizar el peligro de incendios forestales se debe considerar el factor topológico Altitud como un factor biofísico importante, por ejemplo, condiciones ventosas y secas con pendientes pronunciadas rápidamente provocar una rápida propagación del fuego y quemar grandes áreas de bosque en poco tiempo (Jaque-Castillo. 2021).

3.4 Validación del modelo

Para la validación del modelo se empleó el método de curva ROC (Receiver Operating Characteristic) empleado por Acharya y Lee (2007).

Es una gráfica que muestra cómo varía la sensibilidad o especificidad según los resultados de clasificación. La curva ROC se analiza mediante el área bajo la curva (AUC), que representa el espacio entre el eje horizontal y la propia curva (Acharya y Lee, 2019).

A mayor área bajo la curva (AUC), es decir, cuanto más inclinada sea la curva ROC, mejor será la capacidad predictiva del modelo. Un AUC de 0.9 señala un modelo excelente, donde el 90% de los deslizamientos se ubica en las zonas de mayor susceptibilidad, y solo el 10% en otras áreas (Lee y Talib, 2005; Acharya y Lee, 2019).

3.5 Mapa de multiamenazas

Para la realización de los mapas de susceptibilidad ante multiamenazas, en este caso remociones en masas e incendios forestales, se procede una vez estén determinados los valores de FR, se realizará la construcción de los índices de susceptibilidad para cada amenaza. Este paso se llevará a cabo en ArcGIS Pro mediante la herramienta *Raster Calculator*, asignando a cada clase de variable su respectivo peso y generando un mapa continuo de susceptibilidad. Los valores obtenidos se reclasificarán en intervalos definidos (muy baja, baja, media, alta y muy

alta) utilizando la herramienta *Reclassify*, obteniendo así los mapas finales de susceptibilidad para incendios forestales y remociones en masa.

En cuanto al mapa multiamenazas, este se elaborará a partir de la integración de los mapas individuales de susceptibilidad. En primer lugar, se estandarizarán las clases de ambos mapas para que sean comparables entre sí, con valores de 1 a 5 para posteriormente integrar los mapas de ambas amenazas en uno a través de la suma ponderada de los mapas de susceptibilidad individuales con un peso de 0.5 cada uno a través de la herramienta *Raster Calculator* según lo establecido por Rehman et al., 2022. El producto final será un mapa multiamenazas que representará la distribución espacial conjunta de incendios forestales y remociones en masa en el área de estudio. Este insumo permitirá identificar las áreas críticas con mayor nivel de exposición potencial.

Para analizar en detalle las zonas susceptibles a ambas amenazas se desarrollarán tres cartografías de análisis donde el proceso consiste en reclasificar el mapa de susceptibilidad a multiamenazas para generar capas binarias mediante la herramienta *Reclassify* de ArcGIS Pro (Castro, 2025). Para el escenario de alta y muy alta susceptibilidad, se asignó el valor 1 a las clases “Alta” y “Muy alta” y el valor 0 al resto. Para el escenario de baja y muy baja susceptibilidad, se asignó el valor 1 a las clases “Baja” y “Muy baja” y el valor 0 a las demás. Como resultado, se obtuvieron dos ráster binarios por escenario, donde, posteriormente, en cada escenario, las capas binarias se integraron mediante la herramienta *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analyst Tools*.

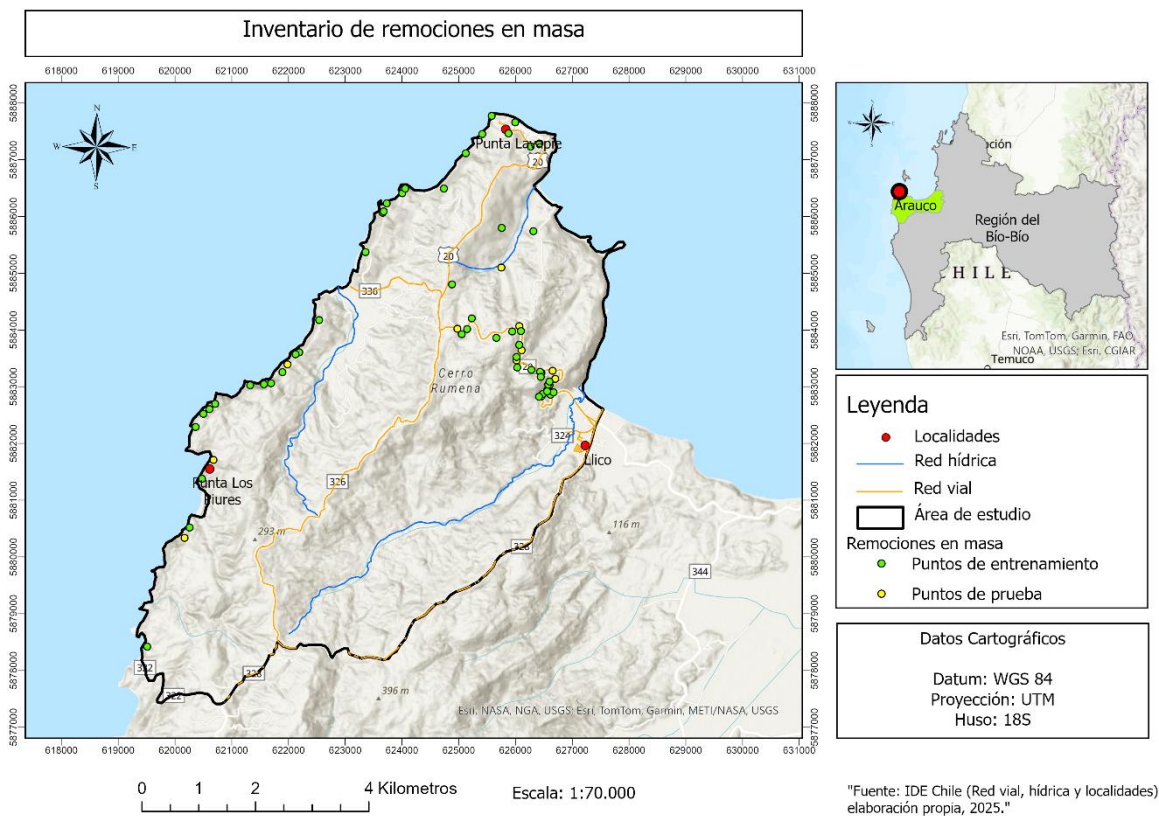
IV RESULTADOS

4.1 Remociones en masa

4.1.1 Inventario de remociones en masa

En la recopilación de datos para la construcción del inventario de remociones en masa se lograron obtener 64 puntos de remociones en masa en el área de estudio, de estos 7 fueron obtenidos a través de información de Sernageomin, 41 fueron identificadas a través del visor Google Earth pro, 14 fueron validadas en terreno y 2 se extrajeron del trabajo realizado por el grupo de estudios Multiamenazas UdeC, detallados cada uno en el anexo 1. la concentración de estos se desarrolla principalmente en cercanía a la ruta p-22 que une la localidad de Llico con Punta Lavapié y en el acantilado costero.

Figura 9. cartografía inventario remociones en masa



Fuente: elaboración propia, ArcGis Pro.

El conjunto de datos se dividió en dos grupos, uno de 51 puntos con los cuales se desarrolló el modelo de entrenamiento de la metodología antes descrita, y otro con 13 puntos denominado puntos de prueba con los cuales se desarrolló la validación del modelo.

En la Figura 10 se muestra un ejemplo de las remociones en masa que se observaron en los acantilados consteros mediante la identificación a través de google earth, se analiza como en el año 2011 (Figura 10A), según la imagen de la plataforma, en la zona se observa un area donde existe perdida de vegetación, lugar donde con posterioridad en el año 2012 (Figura 10B) se desarrolla una remoción en masa del tipo caída de roca.

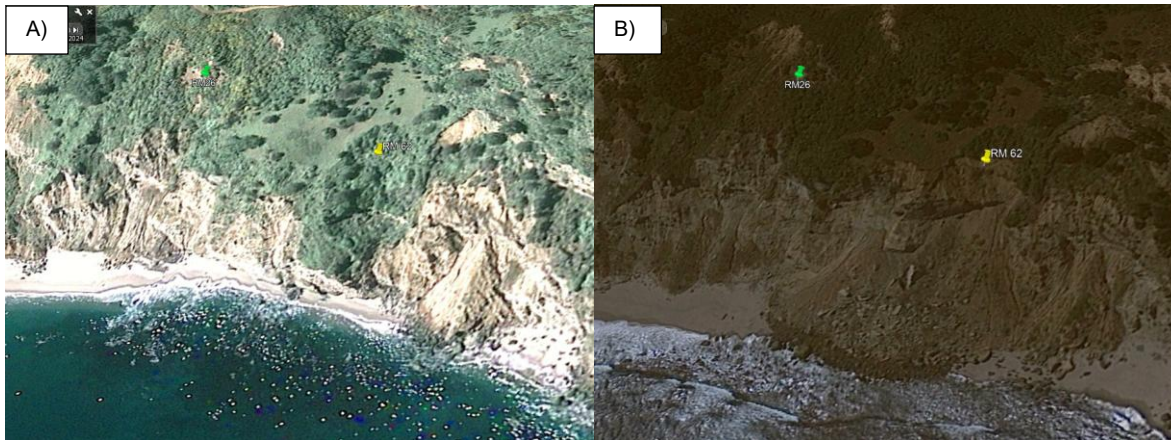
Figura 10. Remocion en masa 64 (RM64)



Fuente: imágenes extraídas desde Google earth.

A continuación, se muestran dos imágenes extraídas desde Google Earth, figura 11, mediante la identificación de remociones en masa en el área de estudio, donde se observa la aparición de una remoción en masa en el lugar donde se ubica la RM26 en la imagen de la izquierda (año 2011) se identifica una zona donde existe perdida de vegetación, se observa suelo descubierto, que con posterioridad en el año 2012 (Figura 11B) se identifica el deslizamiento. De otra forma en la RM62 se observa en el año 2011 (Figura 11A) una zona cóncava que se podría especular procede de un deslizamiento previo, el cual, en el año 2012, se vuelve a activar.

Figura 11. Remoción en masa 62 y 26 (RM62, RM26)



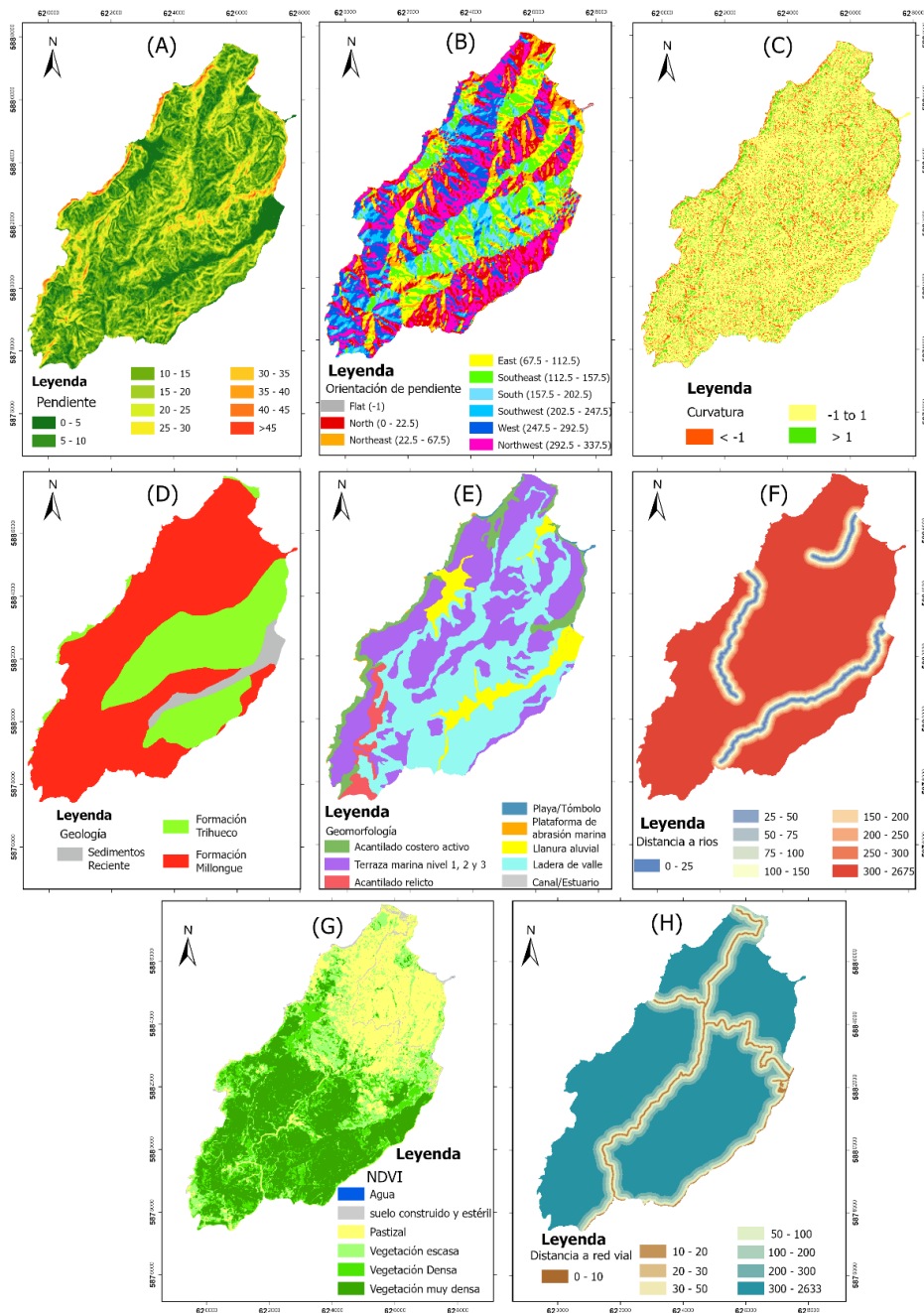
Fuente: imágenes extraídas desde Google earth.

4.1.2 Factores considerados para la evaluación de susceptibilidad a remociones en masa

Para evaluar la susceptibilidad a remociones en masa se empleó el modelo Frequency Ratio (FR). Cada factor definido en la Tabla 1 fue analizado de forma

independiente y se presentaron los resultados obtenidos. De acuerdo con la clasificación metodológica de cada factor, se elaboraron las cartografías temáticas (Figura 12), que sirvieron como insumos para el cálculo del FR y la construcción del mapa de susceptibilidad.

Figura 12. Cartografías factores considerados para remoción en masa



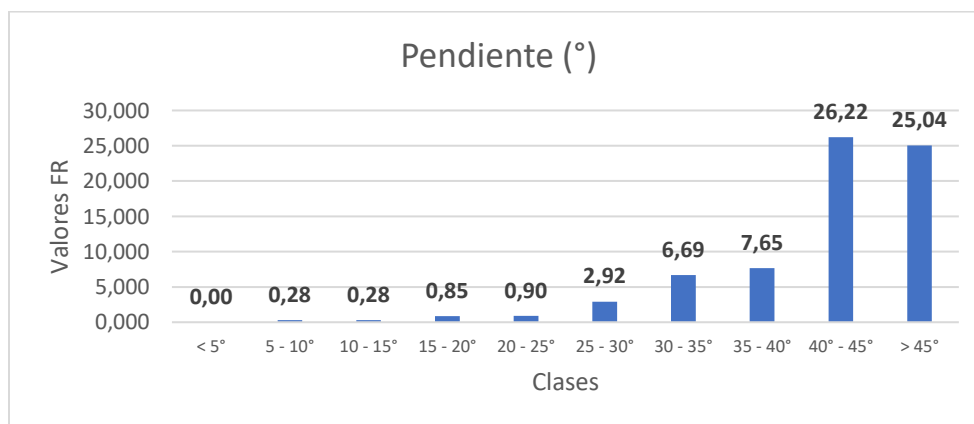
Fuente: elaboración propia

4.1.2.1 Pendiente

Con la finalidad de analizar las pendientes en la zona de estudio (Figura 11A) debido a la irregularidad que existe en el área, se clasificaron 10 grupos en intervalos de 5°, donde el último es mayor a 45°, entre los 0° y 58°, alcanzan un punto máximo de inclinación de 58.88° los que se identifica principalmente en la zona de acantilados costeros. La pendiente mínima es la que se desarrolla en la zona costera al nivel del mar con 0° de pendiente.

Los resultados expuestos en la tabla del Anexo 3 (Tabla Cálculos FR) indican que los eventos de remociones en masa poseen una gran dispersión en las distintas clases anteriormente descritas, pero en relación a la cantidad de área que posee cada una y a la ocurrencia de cada evento el modelo FR demuestra que, según los cálculos obtenidos por los valores FR para la clase pendiente, el gráfico (Figura 13), demuestra que partir de los 40° se observa una alta exposición a remociones en masa donde la clase “40-45°” posee una concentración del 37% y la clase “>45°” un 35%, es decir, más del 70% de los resultados están concentrados en pendientes mayores a 40°, lo que refleja una fuerte influencia de la pendiente en la ocurrencia de remociones lo que evidencia que a mayor inclinación mayor es la susceptibilidad de ocurrencia de remociones y que las clases con pendientes suaves (<25°) representan menos del 4% de la acumulación de eventos, indicando baja susceptibilidad.

Figura 13. Gráfico de Clases y Valores FR del factor Pendiente.



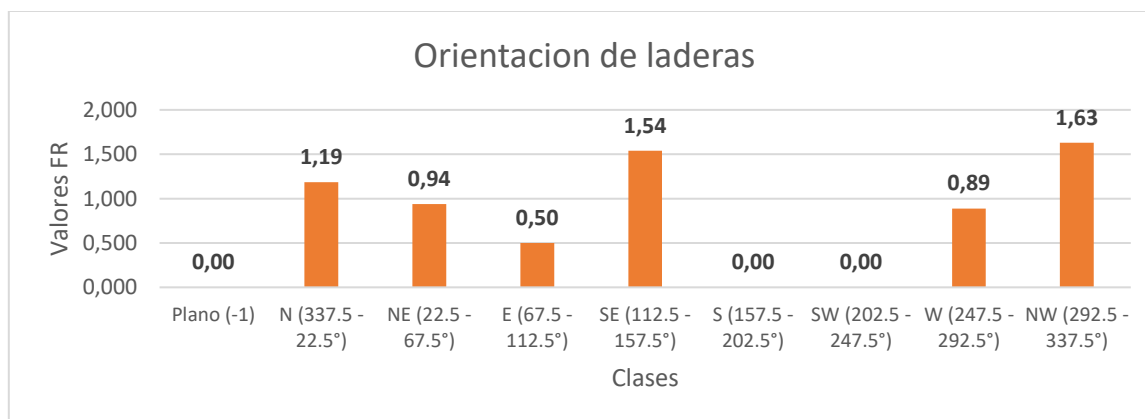
Fuente: elaboración propia

4.1.2.2 Orientación de laderas

La orientación de laderas fue clasificada en torno a los puntos cardinales que se generaron a través del DEM, resultando la siguiente clasificación: Norte (0° - $22,5^{\circ}$), Noreste ($22,5^{\circ}$ - $67,5^{\circ}$), Este ($67,5^{\circ}$ - $112,5^{\circ}$), Sureste ($112,5^{\circ}$ - $157,5^{\circ}$), Sur ($157,5^{\circ}$ - $202,5^{\circ}$), Suroeste ($202,5^{\circ}$ - $247,5^{\circ}$), Oeste ($247,5^{\circ}$ - $292,5^{\circ}$), Noroeste ($292,5^{\circ}$ - $337,5^{\circ}$), Plano (-1°).

Según los cálculos obtenidos por los valores FR, el gráfico (Figura 14) demuestra que la zona con mayor exposición a eventos es la ladera con orientación Noroeste con un 24%, se visualiza que las zonas con orientación norte -noroeste, norte, noreste- poseen el 55% de los resultados, hecho que evidencia una fuerte influencia en aquellas pendientes con disposición norte, las cuales poseen mayor exposición solar, cosa que condiciona su nivel de humedad.

Figura 14. Gráfico de Clases y Valores FR del factor orientación de laderas



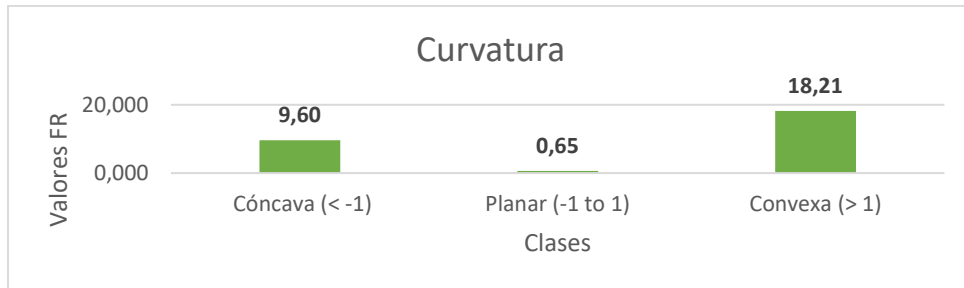
Fuente: elaboración propia

4.1.2.3 Curvatura

Se clasifica en 3 zonas, cóncavo " <-1 "; plano " -1 to 1 " y convexo " >1 ". Donde las zonas planas abarcan la mayor parte del área de estudio, por otro lado, la concentración de zonas cóncavas se desarrolla en áreas cercanas a cursos de agua y en escarpes de acantilado costero. Las zonas convexas se sitúan cercanas a la infraestructura vial y a los acantilados costeros.

Los resultados expuestos en la figura 15 muestran la aplicación del modelo FR, donde indican que la zona con relieve cóncavo posee 64% exposición ante remociones en masa y el relieve convexo un 34%.

Figura 15. Gráfico de Clases y Valores FR del factor curvatura



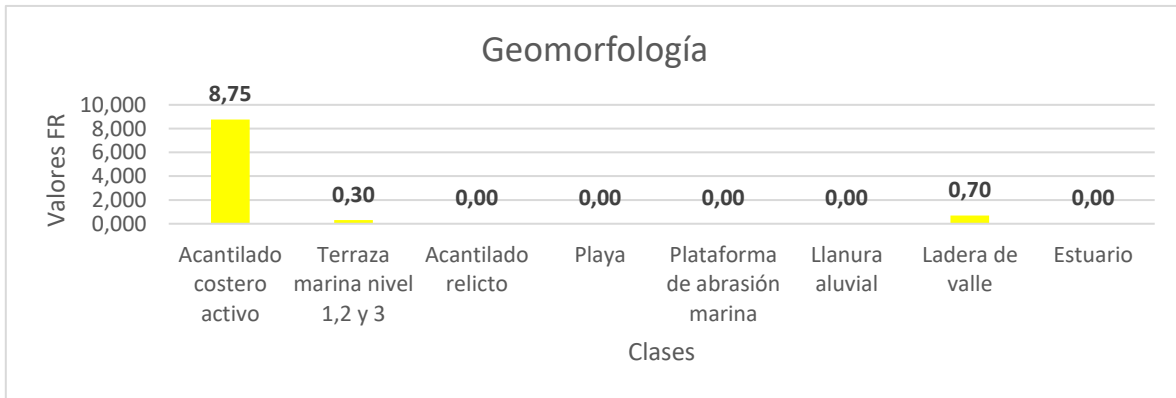
Fuente: elaboración propia

4.1.2.4 Geomorfología

la clasificación de la variable fue realizada por las clases ya establecidas por el trabajo realizado por el Grupo de Estudios Multiamenazas Biobío, se realizaron 4 modificaciones para la realización del estudio actual, donde se agrupan en una clase “tómbolo/Playa”, “canal/estuario” y Terraza marina nivel 1,2 y 3, además, la clase “Remociones en masa” se agregó a la clase “acantilado costero” para evitar la redundancia al aplicar el método que predice la ocurrencia de remociones en masa debido la gran cantidad de eventos y la poca área de esta, lo cual genera una distorsión de los resultados. Las clases que se utilizaron fueron: Acantilado costero activo; Terraza marina nivel 1,2,3; Acantilado relicto; Playa/tómbolo; Plataforma de abrasión marina; Llanura aluvial; Ladera de valle; canal/estuario.

Los resultados expuestos en la figura 16 muestran la aplicación del modelo FR lo cual demuestra que la clase “acantilado costero” posee un 90% (Anexo 3) de probabilidades de ser susceptible a la ocurrencia de remociones en masa en el área de estudio con un alto nivel de exposición potencial, por otro lado, la clase “ladera de valle” y “Terraza marina 1,2 y 3” poseen una exposición de 7% y 3% respectivamente.

Figura 16. Gráfico de Clases y Valores FR del factor geomorfología



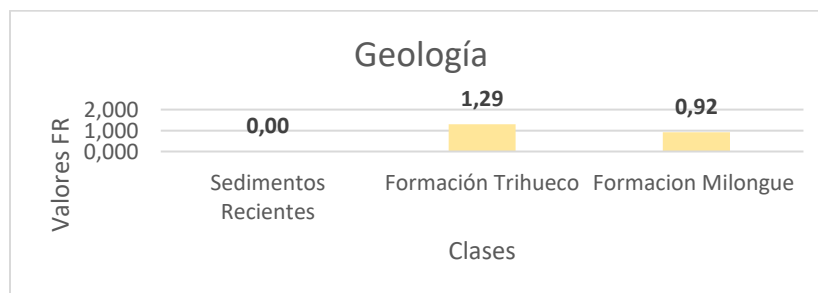
Fuente: elaboración propia

4.1.2.5 Geología

Se distribuyen en 3 clases, Sedimentos recientes, Formación Trihuco y Formación Millongue, donde aquella más presente en el área de estudio es la Formación Millongue, los Sedimentos Recientes es la formación con menos cantidad en el área de estudio.

Como muestra la tabla del anexo 3 el 60% de los eventos se concentran en la clase “Formación Millongue” la cual es la que mayor área abarca respectivamente, por consiguiente, posee un 58% de exposición potencial frente a procesos de remoción en masa en la zona, siendo esta la zona más susceptible a este tipo de eventos.

Figura 17. Gráfico y Valores FR del factor Geología



Fuente: elaboración propia

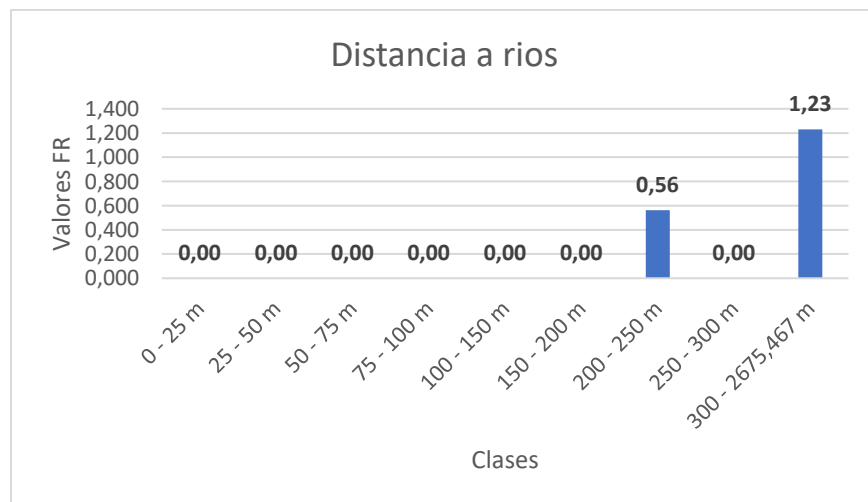
4.1.2.6 Distancia a redes fluviales

Para la realización de esta variable se clasifico en 9 clases: 0-25m, 25-50m, 50-75m, 75-100m, 100-150m, 150-200, 200-250m, 250,300m, >300m; la primera clase “0-25 m”, es donde se ubican los cursos fluviales que en este caso son 3 afluentes, la mayor concentración de área se da en el intervalo (>300 m) con la acumulación del 98% de los eventos en esta clase, debido a que son zonas de mayor altura donde no se identifican cursos de agua que afecten la humedad de la superficie.

Con relación a los resultados de la metodología FR, la zona con mayor exposición potencial a la ocurrencia de remociones en masa en la clase “>300m” con un 65% de las probabilidades, esto debido a que los deslizamientos en el área de estudio se generan en una distancia superior a 300m de los ríos.

Debido a que al momento de la elaboración de los mapas de susceptibilidad ante remociones en masa este factor generaba una distorsión importante en los resultados por la concentración en ciertas áreas, se decidió no considerarlo para la realización del modelo de análisis de susceptibilidad ante remociones en masa.

Figura 18. Gráfico y Valores FR del factor distancia a ríos



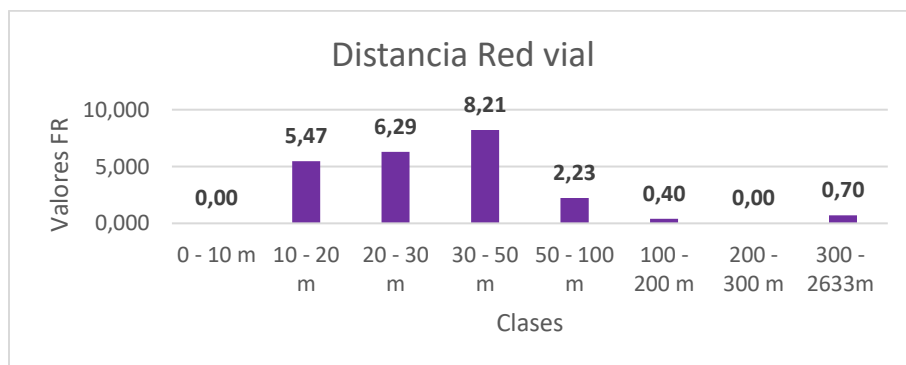
Fuente: elaboración propia

4.1.2.7 Distancia a red vial

la distancia a red vial fue clasificada en 8 intervalos: 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-50m, 50-100m, 100-200m, 200-300m, >300m. donde los primeros 3 intervalos tiene una interacción directa con las remociones en masa, no obstante, la mayor cantidad del área se desarrolla en el intervalo >300m debido a que la zona no presenta gran cantidad de infraestructura vial.

Los resultados de la aplicación de la metodología FR, indican que la concentración de la exposición a remociones en masa con relación a la distancia a redes viales se encuentra en el intervalo “10-20m”, “20-30m”, “30-50m” con un 85% de susceptibilidad ante estos eventos, lo cual revela que hay más posibilidades de ocurrencia a remociones en masa en zonas cercanas a infraestructura vial.

Figura 19. Gráfico y Valores FR del factor red vial



Fuente: elaboración propia

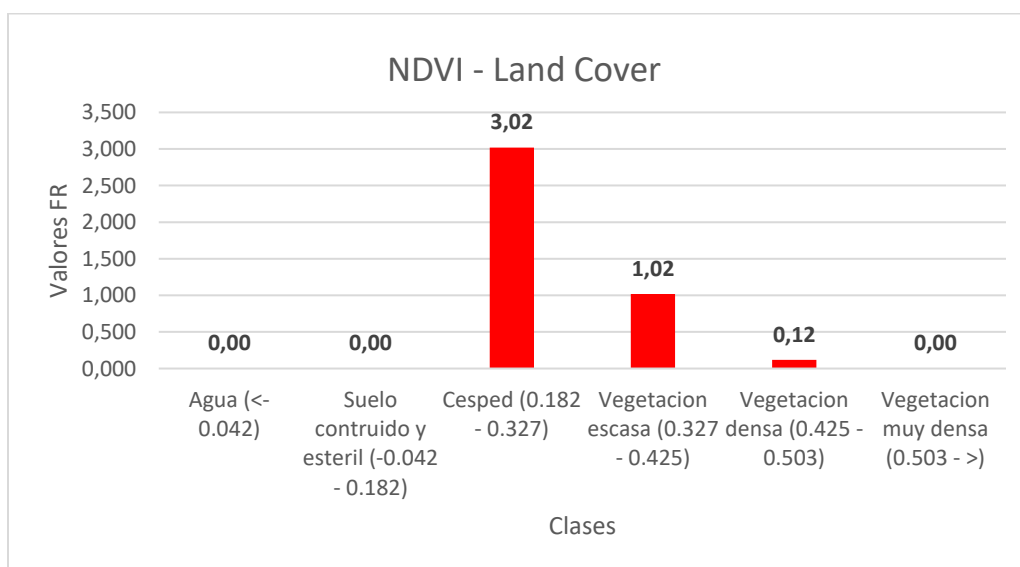
4.1.2.8 NDVI

La clasificación del índice de vegetación de diferencia normalizada se desarrolló en seis clases: Agua (0 - 0.042), Suelo construido y estéril (-0.042 - 0.182), Pastizal (0.182 - 0.327), Vegetación escasa (0.327 - 0.425), Vegetación densa (0.425 - 0.503), Vegetación muy densa (0.503 - >). Donde la concentración del área se desarrolla en la clase “Vegetación muy densa”, y por otro lado la clase “agua” posee valores ínfimos de análisis en la zona, pero para efectos del análisis de cobertura de suelo se tendrá en consideración.

La mayor cantidad de eventos se desarrolla en la clase “pastizal” con un 80% de las remociones, en las clases “agua”, “suelo construido y estéril” y “vegetación muy

densa” se desarrollan 0 eventos de remociones en masa. Para efecto de los resultados de la aplicación del modelo FR la clase pastizal es la que tiene mayor susceptibilidad ante remociones en masa con un 73% seguido de la clase “vegetación escasa” con un 25%, lo cual indica que a menor cantidad de vegetación en suelo orgánico mayor es la probabilidad de que ocurran eventos de remociones en masa en el terreno.

Figura 20. Gráfico y Valores FR del factor NDVI – Land cover



Fuente: elaboración propia

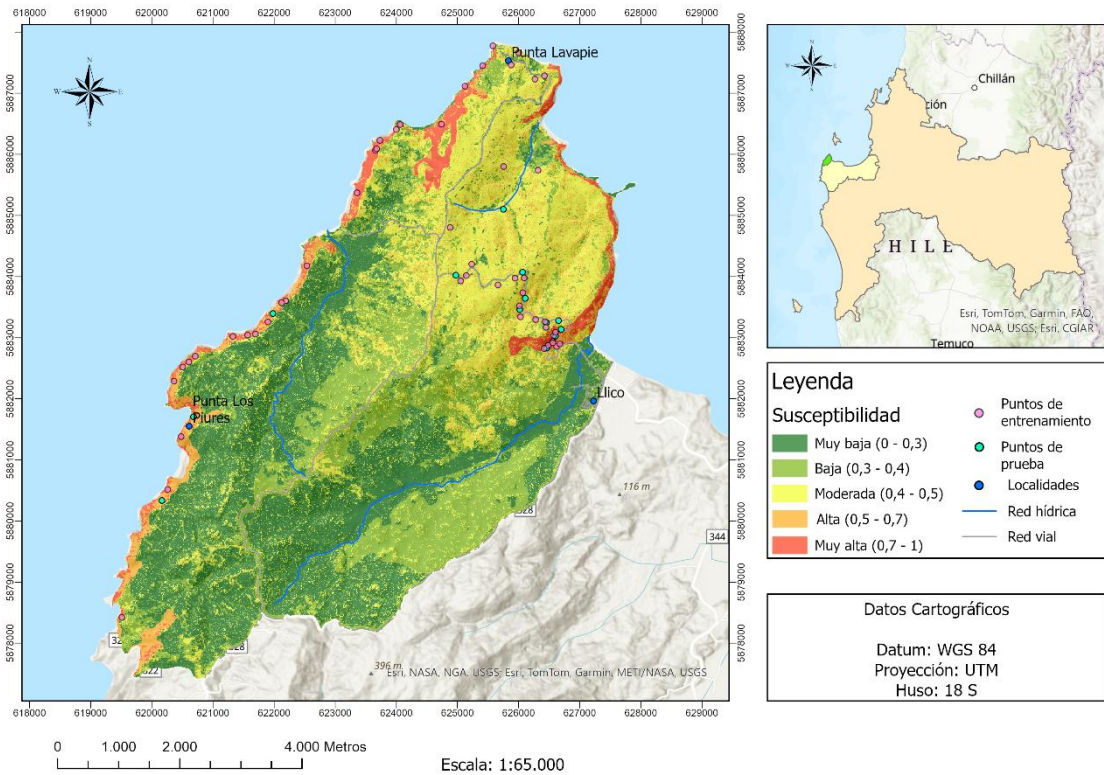
4.1.3 Mapa de susceptibilidad a Remociones en Masa

El mapa de susceptibilidad (figura 21) ante remociones en masa para el sector de Punta Lavapié, comuna de Arauco, Región del Biobío, elaborado a partir del modelo de evaluación de susceptibilidad y clasificado en cinco categorías de acuerdo con el índice obtenido fue construido a través de los resultados realizados en Excel que se detallan en el anexo 3. Donde todos los factores mencionados anteriormente fueron considerados.

Los resultados obtenidos se clasificaron en 5 clases de susceptibilidad: “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy alta”. Donde la escala de susceptibilidad se representa mediante un gradiente de colores que va desde verde oscuro para la

clase “Muy baja” (0,001–0,192) hasta rojo para la clase “Muy alta” (0,652–1), pasando por verde claro (“Baja”), amarillo (“Moderada”) y naranja (“Alta”).

Figura 21. Mapa de susceptibilidad ante remociones en masa



Fuente. Elaboración propia

En el área de estudio, las clases de susceptibilidad muy alta y alta se concentran principalmente en sectores costeros y laderas adyacentes al borde marítimo, caracterizados por pendientes pronunciadas y, en algunos casos, menor cobertura vegetal, lo que aumenta la inestabilidad del terreno. Estas zonas críticas aparecen de manera discontinua a lo largo del litoral.

Tabla 5. Pixeles por clase de susceptibilidad ante remoción en masa y su % en área

Clases Susceptibilidad	Remociones en masa	
	Pixeles de clase	Área (%)
Muy baja	98768	33%
Baja	89456	30%
Moderada	79514	26%

Alta	22878	8%
Muy alta	11205	4%
Total	301821	100%

Fuente: elaboración propia

Como se indica en la tabla 5, el área de estudio presenta desde la clase “Muy baja” a la clase “Muy alta”. Donde, el predominio de zonas de baja susceptibilidad se desarrolla con el 63% del área (clases Muy baja + Baja) las cuales se encuentra en niveles bajos de susceptibilidad, lo que indica que la mayor parte del territorio evaluado presenta condiciones relativamente estables frente a remociones en masa.

La clase Moderada abarca un 26%, actuando como franja de transición entre las zonas estables y las áreas más críticas. Estas áreas pueden presentar condiciones puntuales de inestabilidad, dependiendo de factores como precipitaciones extremas o intervenciones antrópicas.

Las clases Alta y Muy alta representan en conjunto solo el 12% del territorio, pero su localización puede coincidir con zonas habitadas, infraestructura o áreas estratégicas, lo que incrementa su importancia para la gestión del riesgo.

El 8% que corresponde a la clase “Alta” sugiere áreas extensas de pendiente pronunciada, suelos susceptibles o condiciones geomorfológicas desfavorables. El 4% en la clase “Muy alta” probablemente corresponde a taludes muy inestables, laderas abruptas y zonas de alta energía erosiva.

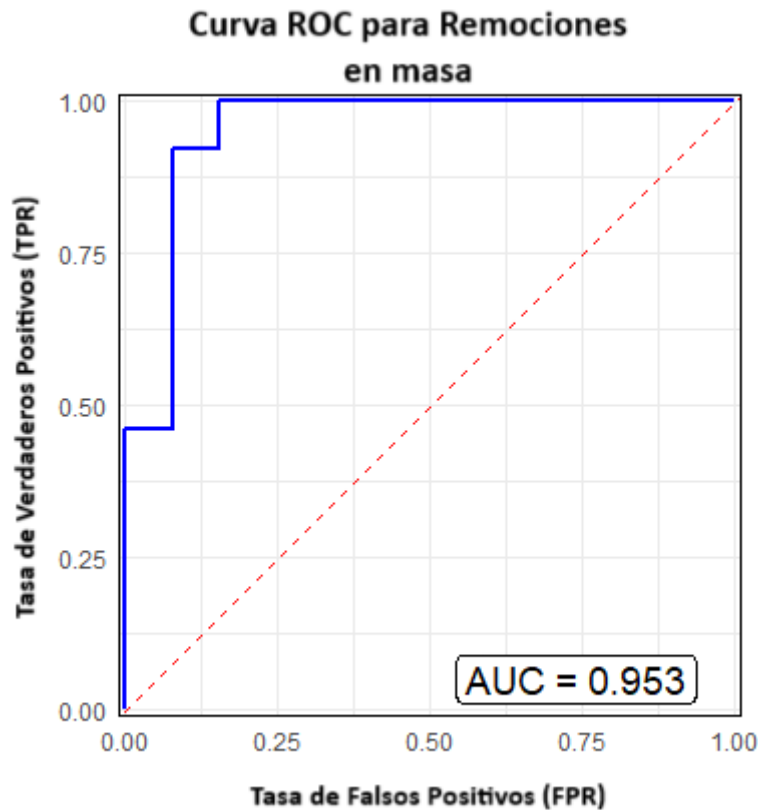
La susceptibilidad moderada se distribuye en una franja intermedia, actuando como transición entre las áreas críticas y las zonas interiores. Por su parte, las clases de susceptibilidad baja y muy baja predominan en sectores más planos o con vegetación más densa y continua, localizados principalmente hacia el interior de la península.

4.1.4 Validación de mapa de susceptibilidad ante remociones en masa

Para realizar la validación del mapa de susceptibilidad ante remociones en masa se aplica el método de curva ROC (Receiver Operating Characteristic) y el cálculo del

área bajo la curva ROC (AUC), empleado por Achayra y Lee (2007). Donde La curva ROC representa la capacidad del modelo para discriminar entre presencia y ausencia de eventos de remociones en masa, graficando la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR) frente a la Tasa de Falsos Positivos (FPR).

Figura 22. Gráfico ROC Y AUC, para susceptibilidad ante remociones en masa



Como se muestra en la figura 22, la curva (línea azul) se ubica claramente por encima de la diagonal aleatoria (línea roja discontinua), lo que indica un desempeño significativamente mejor que un modelo sin capacidad predictiva. La curva presenta una pendiente inicial muy pronunciada y alcanza valores cercanos a TPR = 1 con bajos valores de FPR, lo que sugiere alta sensibilidad con pocos errores.

El AUC = 0,953 lo cual indica un nivel de desempeño excelente (valores >0,9 se consideran de alta calidad predictiva). Esto significa que hay un 95,3% de probabilidad de que el modelo asigne una puntuación de susceptibilidad mayor a un píxel con evento real de remoción que a un píxel sin evento.

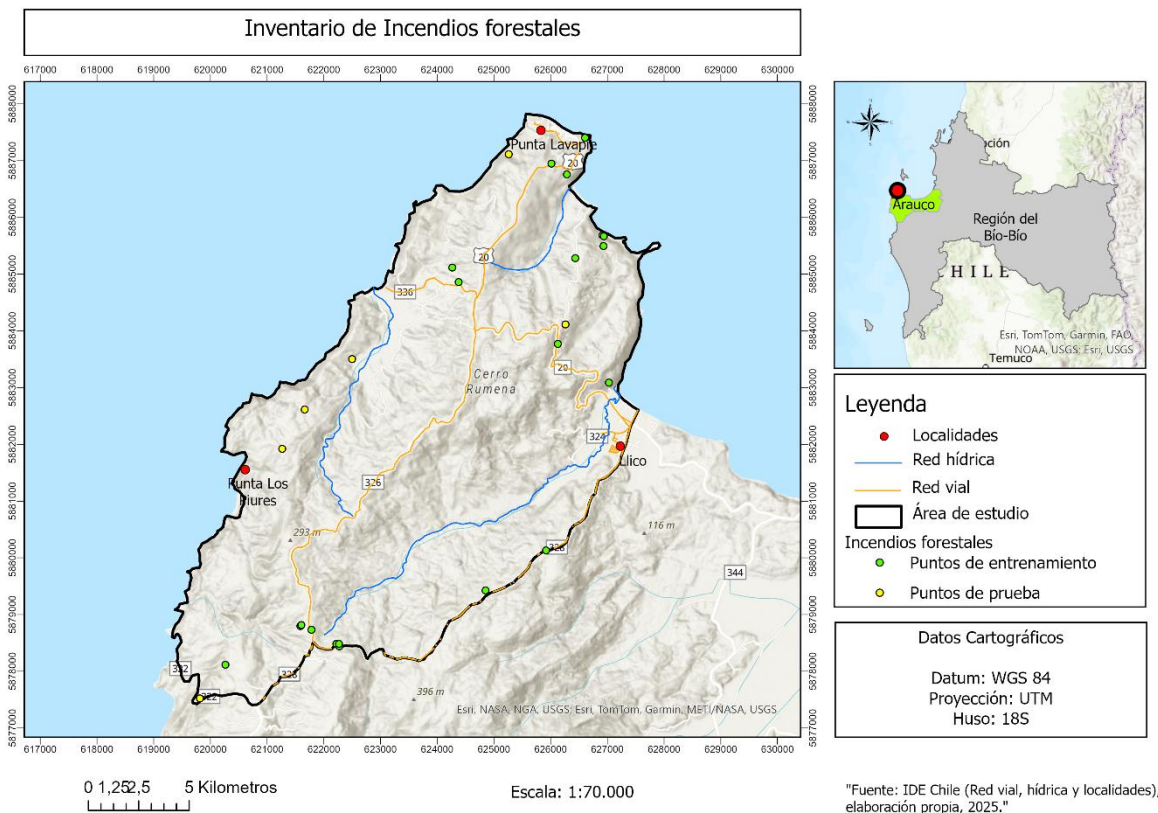
Un AUC tan alto respalda la fiabilidad del modelo de susceptibilidad aplicado para remociones en masa. Por otro lado, la baja tasa de falsos positivos en el tramo inicial de la curva implica que el modelo identifica correctamente la mayoría de las zonas críticas sin clasificar excesivamente zonas seguras como de alto riesgo

4.2 Incendios forestales

4.2.1 Inventario eventos por incendio forestal

En la recopilación de datos para la construcción del inventario de incendios forestales se obtuvieron 26 puntos en el área de estudio, todos extraídos desde la plataforma IDE- CONAF, detallados cada uno con sus coordenadas y fecha en el anexo 2, expuestos en la Figura 23.

Figura 23. Inventario de incendios forestales

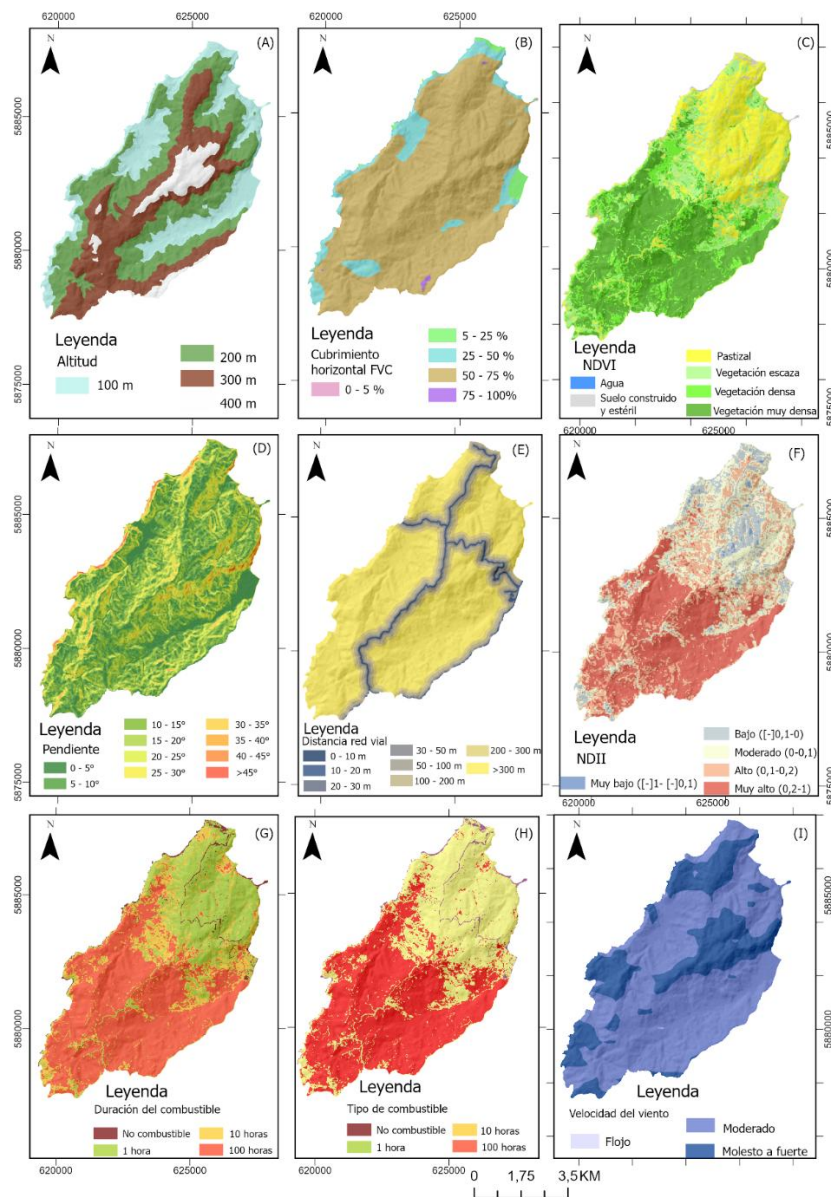


Fuente: elaboración propia, ArcGis Pro.

4.2.2 Factores considerados para incendio forestal

Para evaluar la susceptibilidad a incendios forestales se empleó el modelo Frequency Ratio (FR). Cada factor definido en la Tabla 1 fue analizado de forma independiente y se presentaron los resultados obtenidos. De acuerdo con la clasificación metodológica de cada factor, se elaboraron las cartografías temáticas (Figura 24), que sirvieron como insumos para el cálculo del FR y la construcción del mapa de susceptibilidad.

Figura 24. Cartografía factores considerados para incendio forestal



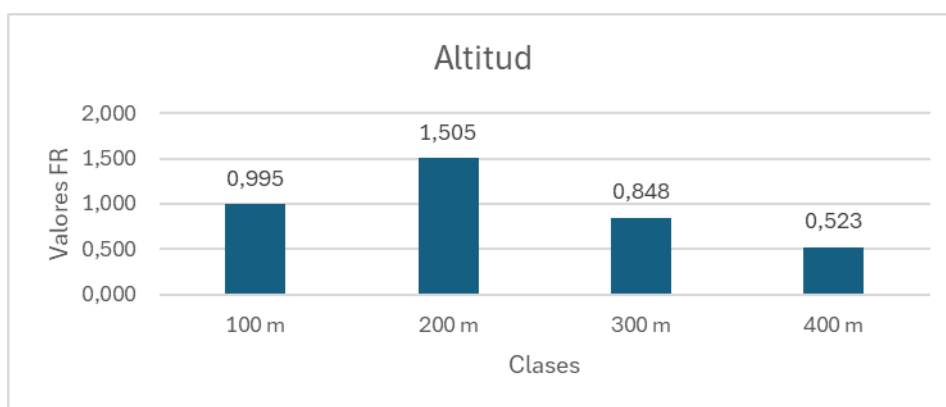
Fuente: elaboración propia

4.2.2.1 Altitud

Para el desarrollo del factor altitud se clasifico el ráster en cuatro clases: 100m, 200m, 300m, 400m, donde, la clase 200–300 m tiene el FR más alto, el mayor número de eventos se concentra en 300–400 m. Ambas clases intermedias concentran casi el 80% de los eventos.

La franja altitudinal más crítica es de 200 a 400 m, donde coinciden las plantaciones forestales, caminos de acceso y zonas habitadas

Figura 25. Gráfico clases y Valores FR del factor altitud (incendio forestal)



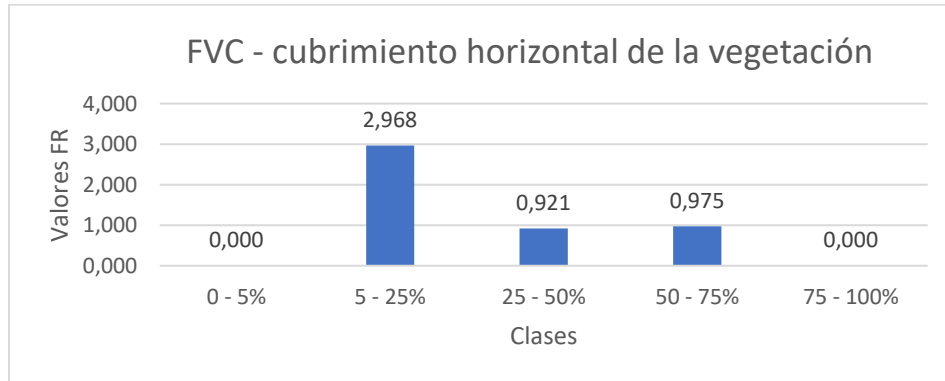
Fuente: elaboración propia

4.2.2.2 FVC cubrimiento horizontal

Para el desarrollo de la variable FVC, se clasifico en 5 clases: (0-5%), (5-25%), (25-50%), (50-75%), (75-100%). Los eventos ocurren mayoritariamente en zonas con cubrimiento vegetal continuo entre 50–75%, que coincide con plantaciones y bosques mixtos. Las zonas más ralas (<25%) presentan una baja cantidad de eventos y las zonas de vegetación más densas (>75%) no presentan eventos.

El riesgo aumenta en zonas con cobertura vegetal media-alta, donde se favorece la continuidad horizontal del combustible, pero sin saturación de humedad ni interrupciones estructurales.

Figura 26. Gráfico clases y Valores FR del factor FVC – Cubrimiento horizontal (incendio forestal)



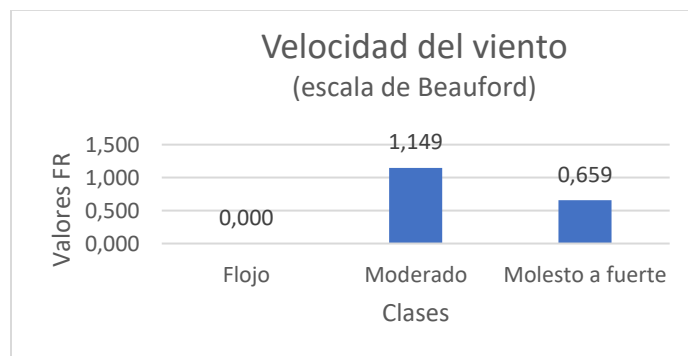
Fuente: elaboración propia

4.2.2.3 Velocidad del viento

La clasificación de la velocidad del viento medida en m/s se realizó de acuerdo con lo establecido por la escala de Beaufort generando 3 categorías: Flojo (3.4-5.4), Moderado (5.4-7.9), Molesto a fuerte (>7.9). la mayor cantidad de los eventos se desarrollan en zonas que poseen una velocidad de viento leve.

Aun así, según lo establecido por la metodología utilizada la concentración de eventos se desarrolla en aquellas zonas con condiciones de viento moderado con alta susceptibilidad para el desarrollo de incendios forestales, donde, las velocidades superiores a 3 m/s se asocian directamente con la propagación del fuego. Estas condiciones son más frecuentes en zonas costeras y sectores expuestos de la topografía, lo que contribuye al avance rápido del incendio hacia zonas interiores.

Figura 27. Gráfico clases y Valores FR del factor Velocidad del viento (incendio forestal)



Fuente: elaboración propia

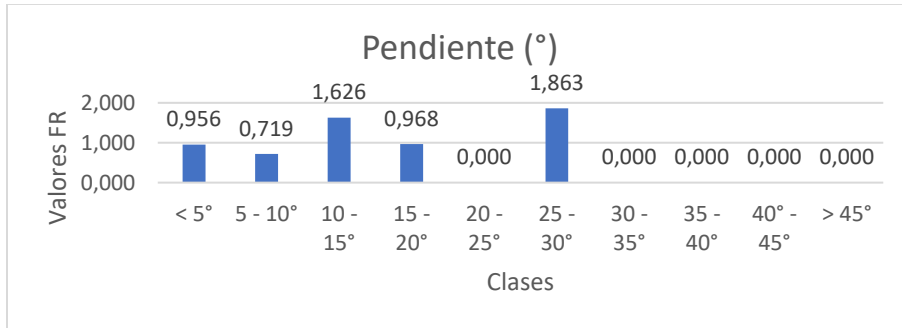
4.2.2.4 Grado de pendiente

Para la clasificación de la pendiente se definieron 10 clases: $<5^\circ$, $5-10^\circ$, $10-15^\circ$, $15-20^\circ$, $20-25^\circ$, $25-30^\circ$, $30-35^\circ$, $35-40^\circ$, $40-45^\circ$, $>45^\circ$. Se puede evidenciar que entre las clases comprendidas entre 10° y 20° , zonas de pendientes suaves a moderadas se concentra la mayor cantidad de incendios forestales con un 55% de los puntos.

En particular la clase $10-15^\circ$ concentra una cantidad de 45% de los eventos, y posee un $FR > 1$ lo que indica una alta ocurrencia real y elevada influencia relativa, por el contrario, aquellas pendientes $>30^\circ$ no presentan ningún evento ($FR=0$) por lo tanto no contribuyen a la amenaza de esta zona.

La pendiente más crítica es la de $10^\circ - 15^\circ$ debido a que es la más común en el paisaje de la zona de estudio y por concentrar más de un tercio de los eventos. Esta inclinación favorece la acumulación de vegetación en las laderas y la propagación lateral de fuego.

Figura 28. Gráfico clases y Valores FR del factor pendiente (incendio forestal)



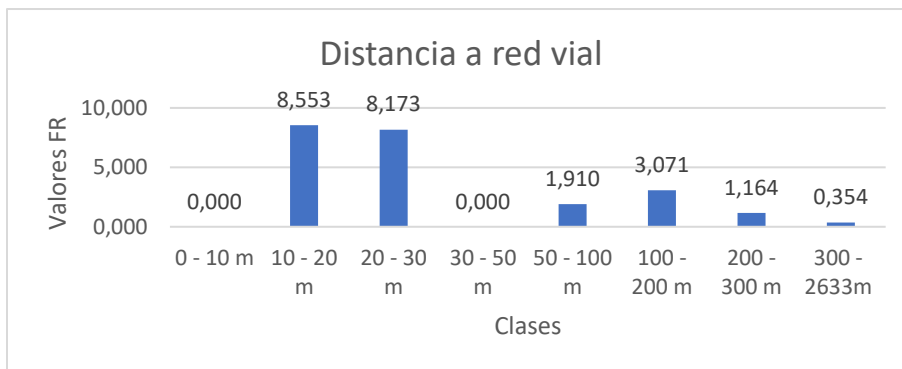
Fuente: elaboración propia

4.2.2.5 Distancia a red vial

la distancia a red vial fue clasificada en 8 clases: 0-10m, 10-20m, 20-30m, 30-50m, 50-100m, 100-200m, 200-300m, >300m. La concentración de los eventos se da en las cercanías a la red vial, en las clases "10-20 m". El FR más alto (8,553) también corresponde a 10-20 m, lo que confirma una relación directa y fuerte.

Este es uno de los factores antrópicos más críticos donde los caminos actúan como fuente de ignición (quemaduras, chispas, colillas), y también facilitan la propagación en la interfaz urbano-rural.

Figura 29. Gráfico clases y Valores FR del factor distancia a red vial (incendio forestal)



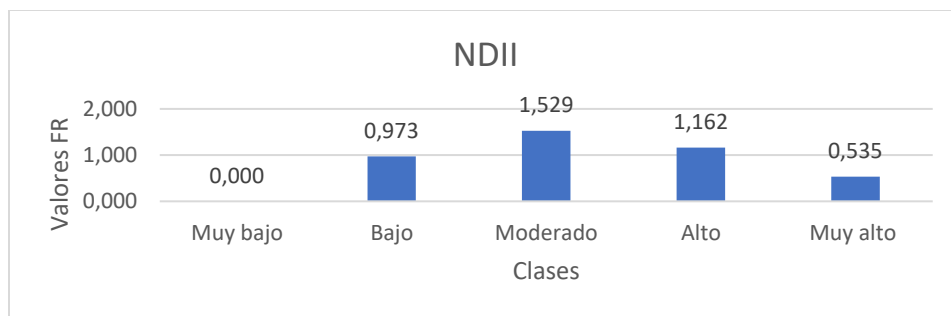
Fuente: elaboración propia

4.2.2.6 NDII

Para el desarrollo de la variable NDII, se clasifico en cinco clases: Muy bajo, bajo, moderado, alto, muy alto. La mayoría de los incendios se produjo en zonas con NDII moderado, con un FR también mayor que 1. Las clases muy húmedas (NDII > 0.2) tienen baja frecuencia y bajo FR.

La vegetación moderadamente seca es la más crítica, ya que tiene suficiente biomasa y baja humedad, ideal para la ignición y propagación.

Figura 30. Gráfico clases y Valores FR vs factor NDII (incendio forestal)



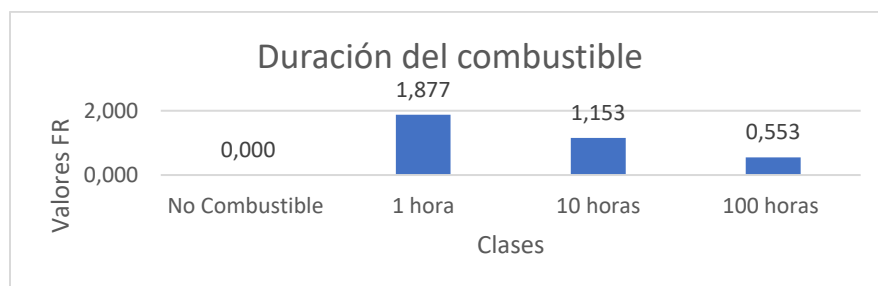
Fuente: elaboración propia

4.2.2.7 Duración del combustible

La clasificación de la variable se realizó en cuatro intervalos: No combustible, 1 hora, 10 horas, 100 horas. La clase 1 hora agrupa la mayoría de los eventos reales (50% de los eventos) y presenta un FR alto (1.877), >1, lo que la posiciona como la categoría más crítica.

Combustibles de rápida ignición concentran más eventos, por otro lado, los combustibles de larga duración presentan una menor incidencia.

Figura 31. Gráfico clases y Valores FR factor duración del combustible (incendio forestal)



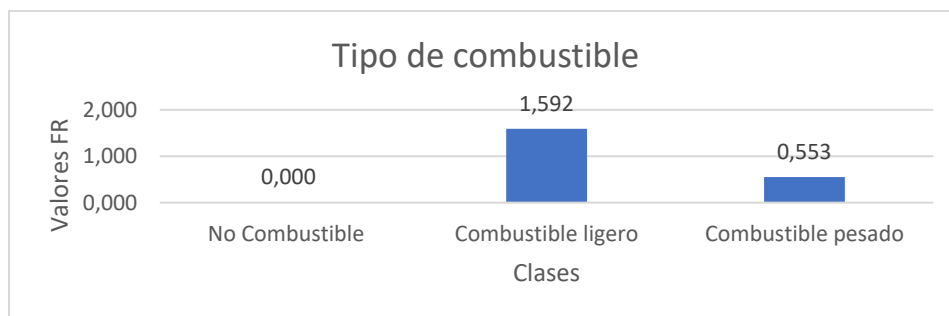
Fuente: elaboración propia

4.2.2.8 tipo de combustible

El factor fue clasificado en 3 intervalos, No combustible, combustible ligero, combustible pesado. Donde el mayor número de eventos ocurre en áreas con combustible ligero (70% de los eventos), con un FR >1, lo que indica alta relación real y estadística. por otro lado, la clase “combustible pesado” (bosque denso) tiene un FR <1, indicando que es menos susceptible, probablemente por mayor humedad.

Se puede inferir que la clase “combustible ligero” es el tipo dominante donde se inician los incendios. Corresponde a pastizales, arbustos, residuos vegetales, presentes en zonas de interfaz.

Figura 32. Gráfico clases y Valores FR factor tipo de combustible (incendio forestal)

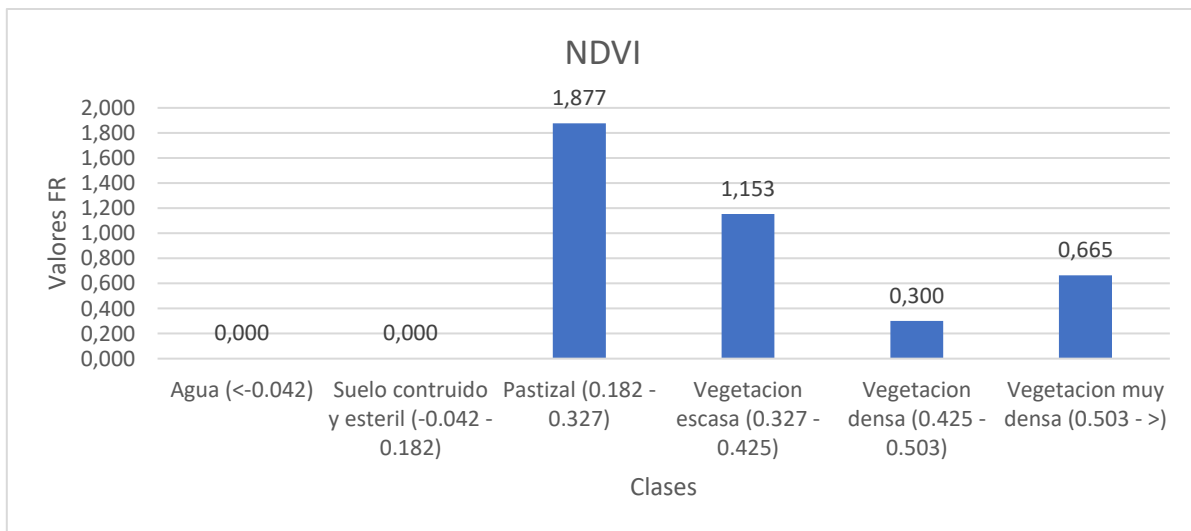


Fuente: elaboración propia

4.2.2.9 NDVI

La clasificación del índice de vegetación de diferencia normalizada se desarrolló en seis clases: Agua (0 - 0.042), Suelo construido y estéril (-0.042 - 0.182), Pastizal (0.182 - 0.327), Vegetación escasa (0.327 - 0.425), Vegetación densa (0.425 - 0.503), Vegetación muy densa (0.503 - >). La mayor cantidad de eventos ocurrió en la clase “pastizal” que presenta un NDVI de 0.327-0.425, lo que corresponde a vegetación degradada o con estrés hídrico, lo cual coincide con los resultados FR >1 en esta clase (1.877), lo cual permite estimar que es una zona con alta exposición, seguida por la clase “vegetación escasa”, que también posee una alta exposición, con un FR de 1.153.

Figura 33. Gráfico clases y Valores FR factor tipo de combustible (incendio forestal)

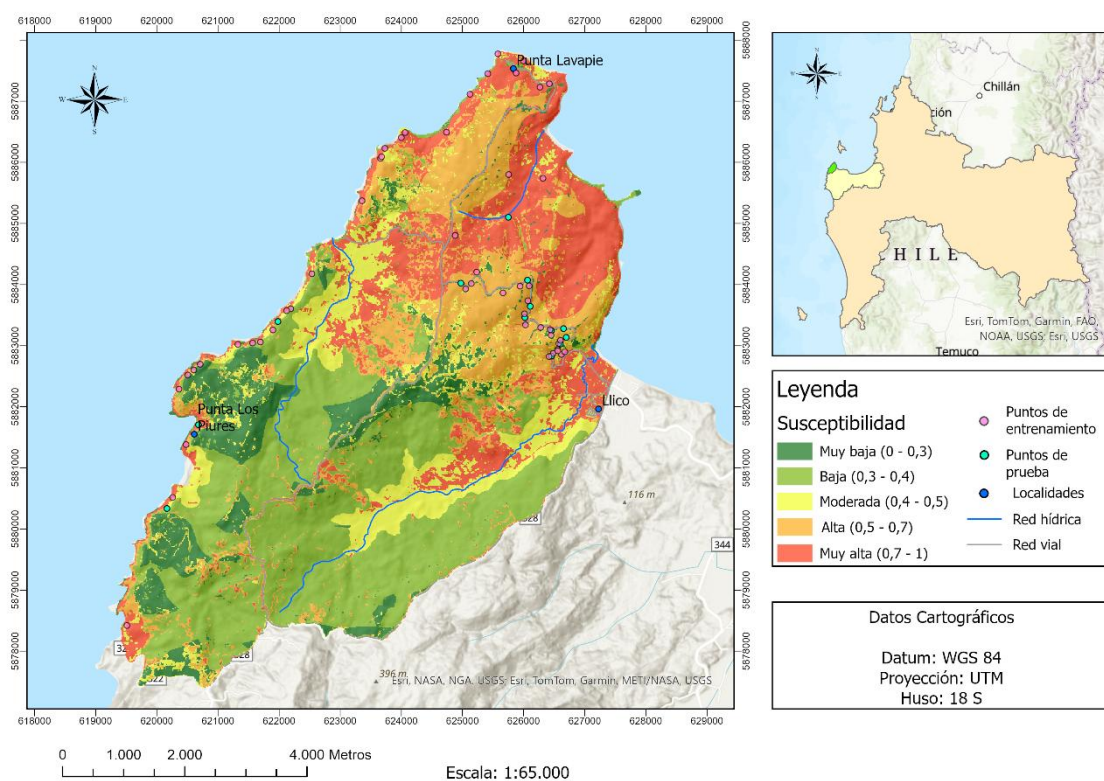


Fuente: elaboración propia

4.2.3 Mapas de susceptibilidad ante incendios forestales

La Figura 34 presenta el mapa de susceptibilidad ante incendios forestales para la península de Punta Lavapié, comuna de Arauco, Región del Biobío, elaborado a partir del modelo de evaluación de susceptibilidad mediante el método de Frecuencia Relativa (FR) e integrando variables topográficas, de cobertura vegetal, meteorológicas y antrópicas. El resultado se clasifica en cinco categorías: Muy baja (0–0,3), Baja (0,3–0,4), Moderada (0,4–0,5), Alta (0,5–0,7) y Muy alta (0,7–1).

Figura 34. Susceptibilidad a incendios forestales



Fuente: elaboración propia

En términos de distribución territorial, las clases de susceptibilidad muy baja y baja abarcan conjuntamente el 45% del área de estudio como se demuestra en la tabla 6, correspondiendo a un 11% y 34% respectivamente. Estas zonas se localizan principalmente en sectores interiores y del sur de la península, caracterizados por pendientes suaves, proximidad a cuerpos de agua o vegetación menos inflamable.

Tabla 6. susceptibilidad ante incendios forestales, pixeles por clase y su porcentaje de área

Susceptibilidad	Incendios forestales	
	Pixeles de clase	Área (%)
Muy baja	33700	11%
Baja	103394	34%
Moderada	43121	14%
Alta	61585	20%
Muy alta	60021	20%
Total	301821	100%

La clase moderada ocupa el 14% del área, distribuyéndose como franja de transición entre las zonas críticas y las de menor susceptibilidad. Las categorías alta y muy alta concentran cada una el 20% del territorio. Estas zonas se ubican mayoritariamente en el sector NE, zonas costeras expuestas y áreas con pendiente pronunciada o vegetación continua susceptible a la ignición. En particular, los sectores cercanos a la localidad de Punta Lavapié y a la ruta p-22 presentan concentraciones relevantes de estas clases, lo que sugiere la influencia combinada de la exposición al viento, la continuidad del combustible vegetal y la cercanía a actividades humanas.

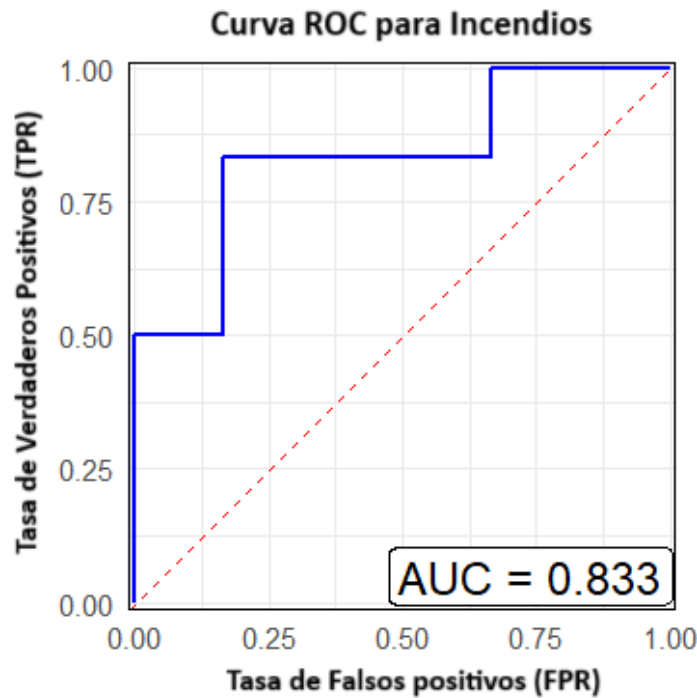
Los puntos de entrenamiento y prueba empleados en la validación del modelo muestran una alta correspondencia espacial con las áreas clasificadas como de alta y muy alta susceptibilidad, lo que respalda la coherencia de la modelación.

4.2.4 Validación Mapa de susceptibilidad ante Incendios forestales

Interpretación técnica

La Figura 35 presenta la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) obtenida para el modelo de susceptibilidad a incendios forestales. Esta curva describe la relación entre la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR) y la Tasa de Falsos Positivos (FPR) para diferentes umbrales de clasificación, permitiendo evaluar la capacidad del modelo para discriminar entre áreas con y sin ocurrencia de incendios

Figura 35. Gráfico ROC y AUC, para modelo de susceptibilidad ante incendios



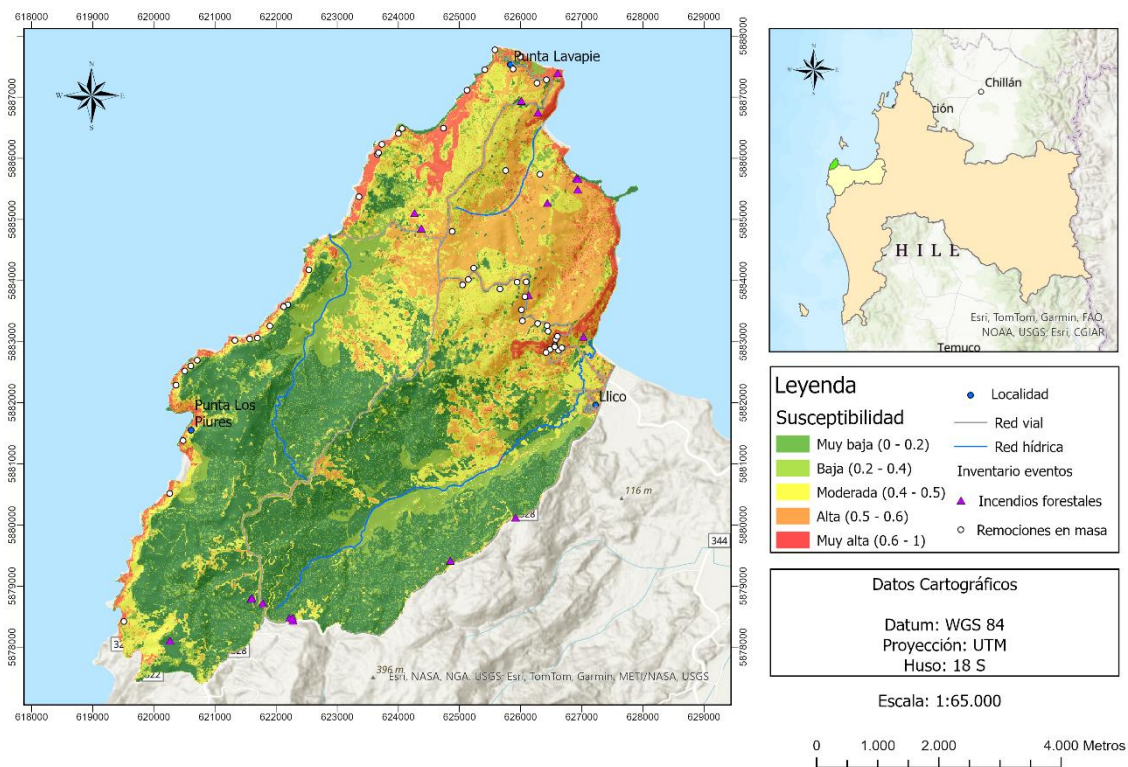
La línea azul representa la relación entre la “Tasa de Verdaderos Positivos (TPR)” y la “Tasa de Falsos Positivos (FPR)” La curva se ubica por encima de la diagonal aleatoria (línea roja discontinua), lo que indica que el modelo tiene una capacidad predictiva superior a la de un modelo aleatorio. La línea azul, correspondiente al modelo, se ubica de forma consistente por encima de la diagonal aleatoria (línea roja discontinua), lo que indica un desempeño superior al de una clasificación aleatoria.

El área bajo la curva (AUC) obtenida es de 0,833, lo cual indica que el modelo tiene una capacidad de discriminación buena (entre 0,8 y 0,9). Esto implica que el modelo presenta un 83,3% de probabilidad de asignar un valor de susceptibilidad mayor a un píxel con ocurrencia real de incendio que a un píxel sin ocurrencia. La pendiente inicial de la curva refleja que el modelo logra tasas relativamente altas de verdaderos positivos en los primeros incrementos de falsos positivos.

4.3 Mapa de susceptibilidad Multiamenazas

El mapa de Susceptibilidad (figura 36) es el resultado de la superposición de las amenazas “remociones en masa” (RM) e “incendios forestales” (IF), el cual permite identificar de manera integral las áreas del territorio en que ambos procesos interactúan.

Figura 36. Mapa de susceptibilidad a multiamenazas



Fuente: elaboración propia

La susceptibilidad alta y muy alta se concentra principalmente en la franja costera oriental y en el sector norte de la península, especialmente en las proximidades de Punta Lavapié. Estas áreas se asocian con laderas de fuerte pendiente y en sectores donde la presencia de infraestructura vial y asentamientos humanos es más densa. Si bien en términos relativos abarcan una proporción menor del territorio, según lo indicado en la tabla 7 representan un 24% del área total (19% alta y 5% muy alta), lo que equivale a 71.707 píxeles. Dichos sectores adquieren

especial relevancia por su coincidencia con la localización de eventos registrados en el inventario.

Las zonas de baja y muy baja susceptibilidad predominan en el sector suroeste y en el área central de la península. Dichos espacios se caracterizan por presentar pendientes suaves, cobertura vegetal continua y menor grado de intervención antrópica, condiciones que favorecen una mayor estabilidad ambiental. En términos cuantitativos, abarcan conjuntamente el 56% de la superficie (37% muy baja y 19% baja).

En cuanto a la susceptibilidad moderada, esta se distribuye como una franja de transición entre los sectores estables y las áreas críticas, correspondiendo principalmente a zonas intermedias de pendiente y a espacios cercanos a la red hídrica, donde los procesos geomorfológicos pueden intensificarse bajo determinadas condiciones de precipitación y uso del suelo. Este nivel representa el 20% del territorio, equivalente a 59.427 píxeles, lo que confirma su papel intermedio en la gradiente de estabilidad territorial.

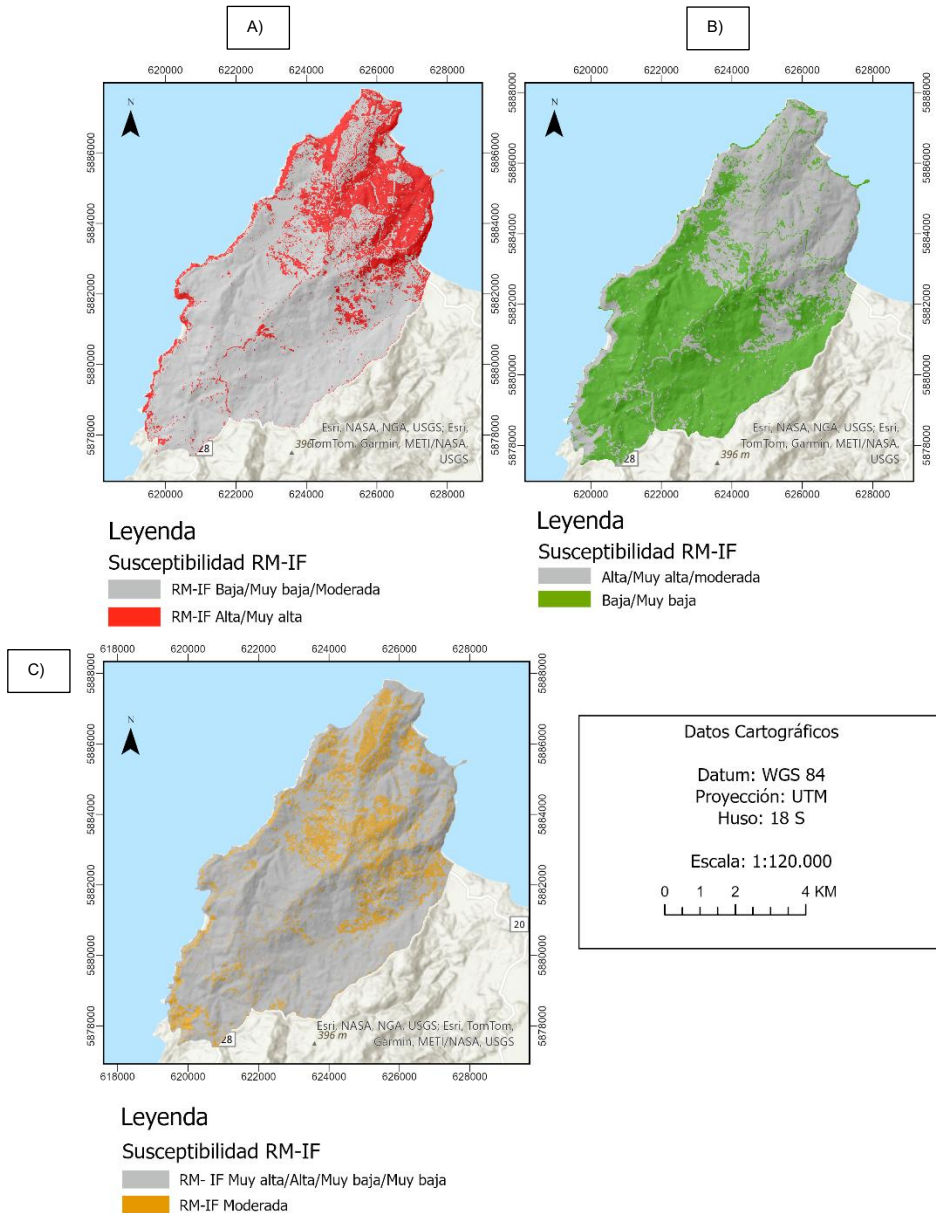
Tabla 7. Distribución de píxeles y área por clase en el mapa de multiamenazas.

Clase	Píxeles por clase	Porcentaje
Muy baja	112264	37%
Baja	58423	19%
Moderada	59427	20%
Alta	56809	19%
Muy alta	14898	5%
Total	301821	100%

Fuente: elaboración propia

Con el fin de analizar la ocurrencia conjunta de distintas amenazas en sus valores extremos de susceptibilidad, se elaboraron mapas de coincidencia para tres escenarios: i) coincidencia de susceptibilidad alta y muy alta, ii) coincidencia de susceptibilidad baja y muy baja, y iii) coincidencia moderada. Este procedimiento se aplicó a los mapas de susceptibilidad individuales de incendios forestales y remociones en masa.

Figura 37. Mapa de coincidencia RM-IF



Fuente: elaboración propia

En la figura 37 el mapa “A”, evidencia la distribución de las zonas donde RM e IF alcanzan simultáneamente niveles altos o muy altos de susceptibilidad. Donde la clase “Alta/ Muy alta” representa el 24% del área de estudio. Estas áreas aparecen concentradas principalmente en la franja costera norte y noreste, lo que sugiere que

allí confluyen condiciones topográficas de pendiente elevada con alta carga de combustible vegetal. La superposición indica un escenario crítico, dado que la ocurrencia de incendios en laderas inestables puede aumentar significativamente la probabilidad de procesos de remoción por pérdida de cobertura y alteración fisicoquímica de los suelos.

El segundo mapa (B) se presenta una simplificación en dos clases, agrupando en una clase “alta, muy alta y moderada” que represente el 43% del área de estudio, frente a las categorías “baja y muy baja” con un 57% del área. Esto permite visualizar de manera más sintética la distribución territorial de las amenazas.

El tercer mapa (C) aísla la condición moderada de susceptibilidad compuesta RM-IF, frente al resto de las clases con un 20% del área. Este enfoque es relevante porque pone en evidencia un escenario de transición: sectores que, aunque no representan actualmente un nivel crítico, podrían evolucionar hacia condiciones de mayor riesgo en función de cambios climáticos, de cobertura vegetal o por intervenciones antrópicas. De este modo, la categoría moderada adquiere valor estratégico para la planificación preventiva, dado que actúa como una zona intermedia entre áreas de bajo y alto riesgo.

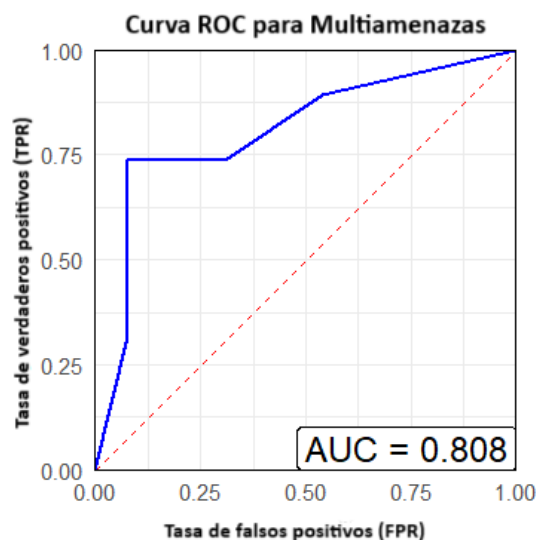
La lectura comparada de los tres escenarios revela que la mayor concentración de coincidencias de alta susceptibilidad se ubica en la franja costera norte, donde confluyen la exposición a incendios forestales recurrentes con pendientes abruptas susceptibles a remociones. Estos resultados son consistentes con la literatura que identifica al fuego como un factor desencadenante o amplificador de procesos de inestabilidad en laderas (Shakesby & Doerr, 2006; González et al., 2018). En consecuencia, la integración multiamenaza aporta una visión más realista de la vulnerabilidad del territorio, permitiendo priorizar áreas críticas para acciones de mitigación, planificación del uso de suelo y diseño de infraestructura resiliente.

4.3.1 Validación mapa de susceptibilidad a multiamenazas

Para realizar la validación del mapa de susceptibilidad a multiamenazas se realiza el método ROC donde los resultados de esta (Figura 38) indican que el área bajo la curva (AUC) expuesta en la Figura obtenida es de 0,808, lo cual indica que el

modelo tiene una capacidad de discriminación buena (entre 0,8 y 0,9). Esto implica que el modelo presenta un 80,8% de probabilidad de asignar un valor de susceptibilidad mayor a un píxel con ocurrencia real de incendio que a un píxel sin ocurrencia.

Figura 38. Curva ROC para multiamenazas



Fuente: elaboración propia.

V. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos mediante el modelo de "Frequency ratio" (FR) permitieron identificar con claridad los factores condicionantes más relevantes tanto para los procesos de remociones en masa (RM) como para los incendios forestales (IF) en la zona de estudio.

Tabla 8. Clase con valores FR altos y bajo para las clases de Remociones en masa

Factor RM	Clase FR más alto	FR más alto	Clase FR más bajo	FR más bajo
Pendiente (°)	40° - 45°	22,474	< 5°	0
Orientación de laderas	NW (292.5 - 337.5°)	1,629	E (67.5 - 112.5°)	0,075
Curvatura	Convexa (> 1)	18,214	Planar (-1 to 1)	0,023
Geomorfología	Acantilado costero activo	8,753	Playa; Plataforma de abrasión marina; Acantilado relictos; llanura aluvial	0
Geología / litología	Formación Trihuco	1,295	Sedimentos recientes	0
Distancia Red Vial	30 - 50 m	8,211	0 - 10m; 200 - 300 m	0
NDVI - Land Cover	Pastizal (0.182 - 0.327)	3,018	Agua; suelo construido y estéril; Vegetación muy densa	0

En el caso de las remociones en masa (RM), los resultados obtenidos evidencian que la pendiente constituye el factor más influyente en la ocurrencia de remociones en masa, destacando especialmente los rangos de 40° a 45°, donde el valor de FR alcanzó 22,47. Este comportamiento confirma lo señalado en la literatura, donde las pendientes superiores a 30° han sido sistemáticamente identificadas como áreas críticas para la inestabilidad de laderas (Hong et al., 2007; Guzzetti et al., 2006). En contraste, las pendientes bajas (<5°) presentaron FR igual a 0, lo que refuerza la idea de que estas zonas funcionan como áreas de acumulación o deposición más que como sectores de generación de deslizamientos.

La curvatura también mostró un patrón relevante, con mayores susceptibilidades en formas convexas (FR=18,21), en coherencia con lo planteado por Stocking (1972), quien indica que estas formas concentran esfuerzos de corte y favorecen la inestabilidad local. Asimismo, la geomorfología asoció las máximas susceptibilidades a acantilados costeros activos (FR=8,75), lo que resulta concordante con la dinámica de erosión marina y tectónica descrita para la franja costera del centro-sur de Chile (Pinto y Lara, 2018).

En términos antrópicos, la distancia a la red vial arrojó los mayores valores de FR en el rango de 30 a 50 m (FR=8,21). Esto coincide con lo reportado por Abdo et al. (2022) y Miranda et al. (2021), quienes subrayan la influencia de la infraestructura vial en la desestabilización de taludes y la exposición de suelos a procesos erosivos.

En contraste, los incendios forestales mostraron una mayor susceptibilidad vinculada a factores antrópicos y de combustible, destacando la proximidad a la red vial (10–20 m, FR=8,553) y el cubrimiento horizontal de vegetación entre 5–25% (FR=2,968) ambos expresados en la Tabla 9. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Abdo et al. (2022) y Miranda et al. (2021), quienes evidencian que la accesibilidad humana, junto con la continuidad y disposición de combustibles, constituyen determinantes clave en la generación de focos de ignición.

Tabla 9. Clase con valores FR altos y bajo para las clases de Remociones en masa

Factor IF	Clase FR más alto	FR más alto	Clase FR más bajo	FR más bajo
Pendiente (°)	25° - 30°	1,863	25° - 25°;> 30°	0
Duración del combustible	1 hora	1,877	No combustible	0
Tipo de combustible	Combustible ligero	1,529	No combustible	0
NDII	Moderado	1,529	Muy bajo	0
Cubrimiento horizontal VFC	5 - 25 %	2,968	0 - 5%	0
Velocidad del viento	Moderado	1,149	Flojo	0
Distancia a red vial	10 - 20m	8,553	0 - 10m;30 - 50m	0
NDVI - Land Cover	Pastizal	1,877	Agua; suelo construido	0
Altitud	200m	1,505	400m	0,523

El análisis de susceptibilidad a incendios forestales indicó que las pendientes entre 25° y 30° son las más críticas (FR=1,86), lo que refleja la importancia de la topografía en la propagación del fuego, al favorecer tanto la acumulación de

combustible como la aceleración de la llama cuesta arriba. En cuanto al combustible, las categorías de duración 1 hora y combustible ligero concentraron los mayores valores de FR (1,87 y 1,53 respectivamente), lo cual resulta coherente con la evidencia que asocia los combustibles finos con una rápida ignición y propagación (Keeley et al., 2019).

Otros factores determinantes fueron la cobertura horizontal de vegetación (VFC), con mayor susceptibilidad en rangos de 5-25% (FR=2,96), donde la vegetación discontinua actúa como puente para la propagación del fuego (Huentecol, 2023). La distancia a la red vial volvió a ser un elemento crítico: la clase de 10 a 20 m obtuvo el FR más alto (8,55), evidenciando la relación directa entre accesibilidad humana y probabilidad de ignición (IDEAM, 2011).

Respecto a la capacidad discriminadora del modelo de susceptibilidad ante incendios forestales (AUC= 0,833) es menor a la obtenida en el modelo de remociones en masa (AUC = 0,953), lo que podría atribuirse a la mayor variabilidad espacial y temporal de los factores que condicionan la ocurrencia de incendios forestales, como las condiciones climáticas, el tipo y continuidad del combustible, y la influencia antrópica.

La coincidencia espacial de ambas amenazas permitió identificar tres escenarios principales expuestos en la Figura 37. Representado en la Tabla 10, donde, para la clase baja/ muy baja con un 57% del área, indica un bajo nivel de amenaza conjunta, aunque no exento de riesgo bajo condiciones meteorológicas extremas (Araya et al., 2020). Por otro lado, para la clase alta/muy alta (24% del área) mostró altas coincidencias en IF y RM, confirmando el carácter dominante del fuego sobre el paisaje, en concordancia con González et al. (2018), quienes relacionan el reemplazo de bosques nativos por monocultivos forestales con un aumento de la recurrencia e intensidad de incendios. Finalmente, el tercer escenario (20% del área) corresponde a sectores donde ambos procesos coinciden en clases moderadas, representando áreas de transición con potencial riesgo multiamenaza.

Tabla 10. Coincidencia RM e IF, pixeles por clase y área (%)

SUCEPTIBILIDAD RM E IF	PIXELES CLASE	AREA (%)
Alta/Muy alta/Moderada	131134	43%
Baja/Muy baja	170687	57%
Total	301821	100%
Baja/Muy baja/Alta/Muy alta	242394	80%
Moderada	59427	20%
Total	301821	100%
Baja/Muy baja/moderada	230114	76%
Alta/Muy alta	71707	24%
Total	301821	100%

Fuente: elaboración propia

Territorialmente, las mayores coincidencias se concentran en el sector norte de Punta Lavapié, caracterizado por la presencia de acantilados activos, pendientes fuertes y coberturas vegetales de pastizales y matorrales expuestos. Este patrón es coherente con lo observado en los incendios de 2017 en el Biobío, donde la pérdida de cobertura vegetal generó condiciones favorables para procesos erosivos y remociones posteriores. De esta forma, los resultados confirman que los incendios no solo constituyen una amenaza en sí mismos, sino que también actúan como catalizadores de procesos de remoción en masa al degradar la cobertura protectora del suelo y modificar la hidrología superficial (Shakesby & Doerr, 2006; Sanhueza et al., 2020). Estos resultados coinciden con lo señalado por González et al. (2020) y Urrutia-Jalabert et al. (2018), quienes destacan la relevancia de la actividad humana y las coberturas vegetales en la generación de incendios en la zona centro-sur de Chile.

En síntesis, el análisis multiamenaza aplicado evidencia que la interacción entre incendios y remociones en masa configura un escenario de riesgo creciente, particularmente relevante bajo las proyecciones de cambio climático para la zona centro-sur de Chile, donde se espera un aumento en la recurrencia de sequías e incendios de gran magnitud

VI. Limitaciones

En el desarrollo de la presente investigación se identificaron una serie de limitaciones que condicionaron tanto la construcción metodológica como el alcance de los resultados.

En primer lugar, los puntos de inventario de remociones en masa e incendios forestales presentaron imprecisiones espaciales que dificultaron una validación más robusta de los modelos. Esta restricción se traduce en un grado de incertidumbre respecto de la localización exacta de algunos eventos, lo que puede afectar la representatividad de las relaciones estadísticas establecidas.

Otro aspecto relevante corresponde a la naturaleza de los datos utilizados, los cuales fueron principalmente de carácter espacial pero no temporal. La ausencia de una dimensión temporal explícita limita la posibilidad de evaluar la evolución histórica de los procesos y, por ende, restringe la interpretación dinámica de las amenazas. Este punto resulta particularmente importante para los factores climáticos, cuya variabilidad interanual incide directamente en la ocurrencia tanto de incendios como de remociones en masa.

En este mismo sentido, se evidenció la falta de datos de libre acceso y de alta resolución, lo que obstaculizó la incorporación de ciertos factores condicionantes reconocidos en la literatura como relevantes. Un ejemplo de ello fue la imposibilidad de integrar variables climáticas clave como temperatura y precipitación, dado que los registros disponibles no presentaban la resolución espacial adecuada para el área de estudio. A pesar de la existencia de productos globales y regionales, estos no fueron lo suficientemente confiables ni ajustados a la escala local de Punta Lavapié.

Asimismo, la escasa disponibilidad de estaciones meteorológicas en la franja costera se configuró como una limitante adicional, reduciendo la capacidad de validar la información climática modelada con datos empíricos in situ.

Finalmente, desde una perspectiva de gestión territorial, se debe destacar la situación de la carretera P-22, la cual constituye la única vía de acceso a Punta

Lavapié y se encuentra expuesta de manera simultánea a las amenazas de incendios forestales y remociones en masa. Esta condición no solo representa un desafío metodológico, sino también un factor crítico para la seguridad de la población y la continuidad de las actividades socioeconómicas, lo que refuerza la necesidad de fortalecer la planificación y medidas de mitigación en torno a dicha infraestructura.

VII. Conclusiones

El análisis integrado de la susceptibilidad frente a multiamenazas remociones en masa e incendios forestales en la costa de la comuna de Arauco (zona de estudio), evidencia que la configuración de los escenarios de riesgo responde tanto a factores climáticos, topográficos y geológicos como al tipo de cobertura vegetal existente. Estas variables, al interactuar espacialmente, generan patrones de multiamenaza que no necesariamente coinciden en el tiempo, pero que se potencian en el espacio. A ello se suma la presión ejercida por las actividades humanas, las cuales han contribuido de manera significativa a la intensificación y propagación de estas amenazas desde la transformación del territorio.

A través de la utilización de la metodología “frequency ratio” se pudo modelar el cómo las amenazas abordadas responden frente a distintas condiciones seleccionadas en el entorno (factores condicionantes) y como la combinación de estas generan una mayor o menor susceptibilidad frente a Remociones en masa e incendios forestales, cada una por separada y en conjunto, para así analizar escenarios de riesgo donde se conjugan más de una amenaza.

La construcción de un inventario de remociones en masa e incendios forestales permitió tener eventos definidos en la zona de estudio para realizar un análisis claro frente a la distribución de las amenazas. Aportando así en el desarrollo del modelo, como también, en un futuro a distintas bases de datos donde se puedan incorporar este inventario.

La evaluación de la susceptibilidad ante remociones en masa permitió identificar que los factores mas influyentes se relacionan con pendientes entre 40° y 45°, curvatura de zonas convexas y unidades geomorfológicas como acantilados

costeros activos. Demostrando su rol como condicionantes críticos en la ocurrencia de estos procesos. Asimismo, la relación con factores geológicos, como la presencia de la Formación Trihueco, refuerza la importancia de la litología en la configuración de áreas inestables.

La evaluación de susceptibilidad a incendios forestales permitió identificar que los factores más influyentes se relacionan con la proximidad a la red vial, la cobertura de pastizales y la duración del combustible. Esto evidencia que los patrones de uso del suelo y las características de la vegetación configuran escenarios propicios para la ignición y propagación del fuego, particularmente en áreas de interfaz urbano-forestal.

Al contrastar las áreas de alta susceptibilidad a remociones en masa e incendios forestales se evidenció que, aunque ambos procesos responden a factores condicionantes distintos, existe coincidencia espacial de un 24% del área total en las categorías de alta y muy alta susceptibilidad. Este hallazgo sugiere la existencia de zonas expuestas a multiamenazas, en las cuales la ocurrencia de incendios forestales podría incrementar la fragilidad del suelo favoreciendo procesos de remoción en masa.

El análisis del mapa integrado de multiamenazas ofrece una visión sistémica de las amenazas que afectan simultáneamente a la zona de estudio. La identificación de coincidencias entre RM e IF permite priorizar sectores para medidas de mitigación, tales como la estabilización de laderas, el control del uso del suelo, la gestión forestal preventiva y la regulación de actividades humanas en áreas críticas. De esta forma, el enfoque multiamenaza refuerza la necesidad de avanzar hacia políticas de planificación territorial que no solo consideren amenazas de manera individual, sino también sus posibles interacciones y sinergias. Este trabajo se proyecta como un aporte a la literatura académica que aborda el riesgo desde una perspectiva de multiamenazas que concibe éstas como un fenómeno integral al cual le urge análisis.

VIII. Referencias

- ABDOLLAHI, M.; VAHEDIFARD, F. & LESHCHINSKY, B.A. 2024. Hydromechanical Modeling of Evolving Post-Wildfire Regional-Scale Landslide Susceptibility. *Engineering Geology*. Vol. 335: 107538.
- ACHARYA, T.D. & LEE, D.H. 2019. Landslide Susceptibility Mapping Using Relative Frequency and Predictor Rate Along Araniko Highway. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Vol. 23 (2): 763–776.
- ADDIS, A. 2023. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia. *Journal of Engineering*. Vol. 2023: 14 pp.
- AKGUN, A.; DAG, S. & BULUT, F. 2008. Landslide Susceptibility Mapping for a Landslide-Prone Area (Findikli, NE of Türkiye) by Likelihood-Frequency Ratio and Weighted Linear Combination Models. *Environmental Geology*. Vol. 54: 1127–1143.
- ARAYA MUÑOZ, D.; METZGER, M.; STUART, N.; WILSON, A. & CARVAJAL, D. 2017. A Spatial Fuzzy Logic Approach to Urban Multi-Hazard Impact Assessment in Concepción, Chile. *Science of the Total Environment*. Vol. 576: 508–519.
- ARIAS, C.; KING, R. & MONTENEGRO, C. 2018. Modelo Conceptual del Movimiento en Masa del Talud Ubicado en PK 28+400, Ruta 160, Comuna de Lota. Proyecto de Habilitación Profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Facultad de Ingeniería.
- CASTILLO, M.; PEDERNERA, P. & PEÑA, E. 2003. Incendios Forestales y Medio Ambiente: Una Síntesis Global. *Revista Ambiente y Desarrollo (CIPMA)*.
- CASTRO-VENEGAS, F.; JAQUE, E.; QUEZADA, J.; PALMA, J.L. & FERNÁNDEZ, A. 2025. Multi-Source Landslide Inventories for Susceptibility Assessment: A Case Study in the Concepción Metropolitan Area, Chile. *Frontiers in Earth Science*. Vol. 13: 1534295.

- CENEPRED. 2020. Escenario de Riesgo por Incendios Forestales de la Región Cusco. Lima, Perú.
- CR2 (CENTRO DE CIENCIA DEL CLIMA Y LA RESILIENCIA). 2018. Informe Final: Simulaciones Climáticas Regionales y Marco de Evaluación de la Vulnerabilidad.
- CHAPARRO ÁVILA, E.; RENARD REESE, M. & NACIONES UNIDAS (EDS.). 2005. Elementos Conceptuales para la Prevención y Reducción de Daños Originados por Amenazas Socionaturales. CEPAL/GTZ.
- CONAF. s.f. Prevención de Incendios Forestales. Corporación Nacional Forestal.
- CONAF. 2021. Estadísticas Históricas de Incendios Forestales en Chile. Corporación Nacional Forestal.
- CRUDEN, D. & FELL, R. 1997. Landslide Risk Assessment. Routledge.
- DOAN, V.L.; NGUYEN, B.-Q.-V.; PHAM, H.T.; NGUYEN, C.C. & NGUYEN, C.T. 2023. Effect of Time-Variant NDVI on Landslide Susceptibility: A Case Study in Quang Ngai Province, Vietnam. Open Geosciences. Vol. 15 (1): 20220550.
- ENCINAS, A.; FINGER, K.L.; NIELSEN, S.N.; LAVENU, A.; BUATOIS, L.A. & PETERSON, D.E. 2006. Tectonic and Sedimentary Evolution of the Arauco Basin (33–38°S), South-Central Chile. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 21 (3): 200–222.
- ENCINAS, A. et al. 2008. Neogene Evolution of the Forearc Basin System of South-Central Chile. Sedimentary Geology.
- ENCINAS, A.; NIELSEN, S.N.; FINGER, K.L.; LAVENU, A.; BUATOIS, L.A. & PETERSON, D.E. 2010. Sedimentology and Sequence Stratigraphy of the Eocene Lebu Group, South-Central Chile. Andean Geology. Vol. 37 (1): 131–154.
- ETXEBERRIA RAMÍREZ, P.; BRAZAOLA ROJO, A. & EDESO FITO, J.M. 2002. Cartografía de Peligro de Incendios Forestales Mediante SIG y Modelos de Propagación. En: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España (Comunicación).

- FINGER, K.L.; ENCINAS, A.; NIELSEN, S.N. & BUATOIS, L.A. 2007. Paleontology and Biostratigraphy of the Eocene Lebu Group. *Revista Geológica de Chile*. Vol. 34 (1): 3–33.
- FUENZALIDA, H.; VILLAGRÁN, C.; BERNAL, P.; FUENTES, E.; SANTIBAÑEZ, F.; PEÑA, H.; MONTECINO, V.; HAJEK, E. & RUTLLANT, J. 1989. Cambio Climático Global y Eventuales Efectos en Chile. *Ambiente y Desarrollo*. pp. 37–42.
- GARREAUD, R. et al. 2011. The South American Monsoon System. *Climate Dynamics*.
- GARRIDO, J.; VILAR, L.; ECHAVARRÍA, P.; MARTÍNEZ-VEGA, J. & MARTÍN, M.P. 2018. ¿Pueden las Interfaces de Usos del Suelo Explicar la Ocurrencia de Incendios Forestales a Escala Provincial? Los Casos de Zamora y Madrid. *GeoFocus (Artículos)*. Nº 22: 71–95.
- GLADE, T. & CROZIER, M.J. 2005. The Nature of Landslide Hazard Impact. En: Glade, T.; Anderson, M. & Crozier, M. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley & Sons. pp. 43–74.
- GONZÁLEZ, M.E.; LARA, A.; URRUTIA, R. & BOSNICH, J. 2011. Cambio Climático y su Impacto Potencial en la Ocurrencia de Incendios Forestales en la Zona Centro-Sur de Chile (33°–42° S). *Bosque (Valdivia)*. Vol. 32 (3): 215–219.
- HAUSER, A. 2000. *Remociones en Masa en Chile (Versión Actualizada)*. SERNAGEOMIN. Boletín Nº 59. 89 p. Santiago, Chile.
- HAUSER, A. 2005. Informe Geológico-Geotécnico Preliminar: Sectores Agüita de la Perdiz y ... (Informe).
- HEINE, R.A.; LANT, C.L. & SENGUPTA, R.R. 2004. Development and Comparison of Approaches for Automated Mapping of Stream Channel Networks. *Annals of the Association of American Geographers*. Vol. 94 (3): 477–490.
- HONG, Y.; ADLER, R.F. & HUFFMAN, G. 2007. Use of Satellite Remote Sensing Data in the Mapping of Global Landslide Susceptibility. *Natural Hazards*. Vol. 43 (2): 245–256.

- HUENTECOI, S. 2022. Riesgo de Incendios Forestales en Comunidades Campesinas y Mapuche de la Comuna de Collipulli. Memoria de Título. Universidad de Concepción.
- HUNGR, O.; LEROUeIL, S. & PICARELLI, L. 2013. The Varnes Classification of Landslide Types: An Update. (Referencia de revista/libro no especificado).
- IDEAM. 2011. Protocolo para la Realización de Mapas de Zonificación de Riesgos a Incendios de la Cobertura Vegetal. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- JAQUE CASTILLO, E.; FERNÁNDEZ, A.; FUENTES ROBLES, R. & OJEDA, C.G. 2021. Data-Based Wildfire Risk Model for Mediterranean Ecosystems: Case Study of the Concepción Metropolitan Area in Central Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 21: 3663–3678.
- KEELEY, J.E. & SYPHARD, A.D. 2019. Twenty-First Century California, USA, Wildfires: Fuel-Dominated Versus Wind-Dominated Fires. *Fire Ecology*. Vol. 15: Artículo 24.
- REHMAN, A.; SONG, J.; HAQ, F.; MAHMOOD, S.; AHAMAD, M.I.; BASHARAT, M.; SAJID, M. & MEHMOOD, M.S. 2022. Multi-Hazard Susceptibility Assessment Using the Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio Techniques in the Northwest Himalayas, Pakistan. *Remote Sensing*. Vol. 14 (3): 554.
- LAVELL, A. 2001. Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes Hacia una Definición.
- LAVELL, A. 2007. Apuntes para una Reflexión Institucional en Países de la Subregión Andina sobre el Enfoque de la Gestión del Riesgo. PREDECAN.
- LEÓN, J.; BADÍA, D. & ECHEVERRÍA, M. s.f. Metodologías Empleadas para el Estudio de la Erosión Edáfica en Incendios Forestales.
- MARTÍNEZ, J.; VARGAS, G. & CONTRERAS, S. 2022. Tectonic Uplift and Marine Terraces on the Arauco Peninsula, Chile: Constraints from Luminescence and Radiocarbon Dating. *Geomorphology*. Vol. 402: 108130.

- MELNICK, D.; BOOKHAGEN, B.; STRECKER, M. & ECHTLER, H. 2009. Surface Uplift and Climate Interaction in Southern Chile. *Geology*. Vol. 37 (7): 615–618.
- MILLER, M. 2025. What Is Multi-Hazard Risk Management? *Survive & Thrive: The AEM Blog*.
- MICHALIJJOS, M.P. & UBOLDI, J. 2013. Propuesta Metodológica para la Evaluación de Áreas Afectadas por Incendios Mediante el Uso de Imágenes Satelitales (Sierra de la Ventana, Argentina). *Revista de Geografía Norte Grande*. N° 56: 223–234.
- ONEMI. 2016. Marco para la Reducción del Riesgo de Desastres en Chile 2016–2030. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública.
- ONEMI. 2016. Grupo de Trabajo a Cargo de la Acción Estratégica 4.2.1 del Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Oficina Nacional de Emergencia.
- ONEMI. 2017. Plan Nacional de Emergencia. Santiago, Chile.
- OFICINA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES (UNDRR). 2015. Marco de Sendái para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030.
- PEÑA-FERNÁNDEZ, E. s.f. Incremento de los Incendios Forestales en Bosques Naturales y Plantaciones Forestales en Chile.
- RAMÍREZ, P. 2023. Visita Técnica por Condición de Estabilidad de Laderas en Cerro La Virgen y Caleta Punta Lavapié, Comuna de Arauco, Región del Biobío. SERNAGEOMIN.
- ŠAKIĆ TROGRLIĆ, R.; REITER, K.; CIUREAN, R.L.; GOTTARDO, S.; TORRESAN, S.; DALOZ, A.S.; MA, L.; PADRÓN FUMERO, N.; TATMAN, S.; HOCHRAINER-STIGLER, S.; DE RUITER, M.C.; SCHLUMBERGER, J.; HARRIS, R.; GARCIA GONZALEZ, S.; GARCÍA VAQUERO, M.; FEBLES ARÉVALO, T.L.; HERNANDEZ MARTIN, R.; MENDOZA JIMENEZ, J.; FERRARIO, D.M.; ... WARD, P.J. 2024. Challenges in Assessing and Managing Multi-Hazard Risks: A European Stakeholders Perspective. *Environmental Science & Policy*. Vol. 157: 103774.

- SEPÚLVEDA, S. 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. SERNAGEOMIN. RMET-147.
- SEPÚLVEDA, N. 2023. Remociones en Masa Detonadas por Precipitaciones Durante Agosto y Septiembre de 2023, Comunas de Arauco, Lebu y Punta Lavapié, Provincia de Arauco, Biobío. SERNAGEOMIN.
- SAG (SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO). s.f. Áreas Silvestres Protegidas.
- SERNAGEOMIN. s.f. Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur.
- SERNAGEOMIN. 2012. Mapa Geológico de la Región del Biobío. Escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN. 2012. Geología para la Reconstrucción y la Gestión del Riesgo en la Región del Biobío. Informe Registrado IR-12-48. 12 p. 35 mapas. Santiago, Chile.
- SIMMONS, I.G. 1989. Changing the Face of the Earth: Culture, Environment, History. Blackwell. Cambridge.
- TAVERA, J. 1942. Estratigrafía de la Cuenca de Arauco. Instituto Geológico de Chile.
- TORRES, A. & BASTÍAS, C. 2024, 3 febrero. 365 Días Después: Los Avances y Pendientes que Dejó la Peor Catástrofe de Incendios Forestales en el Biobío. Diario Concepción.
- URRUTIA-JALABERT, R.; GONZÁLEZ, M.E.; GONZÁLEZ-REYES, Á.; LARA, A. & GARREAUD, R. 2018. Climate Variability and Forest Fires in Central and South-Central Chile. *Ecosphere*. Vol. 9 (4): e02171.
- VAN WESTEN, C.J.; CASTELLANOS ABELLA, E.A. & KURIAKOSE, S.L. 2008. Spatial Data for Landslide Susceptibility, Hazards and Vulnerability Assessment: An Overview. *Engineering Geology*. Vol. 102 (3–4): 112–131.
- VALENZUELA, W.E.V. 2018. Nuevos Horizontes para el Abordaje de la Gestión del Riesgo de Desastres a Partir de la Evaluación Multiamenazas. *Geoacta*. Vol. 43 (1): Artículo 1.

VERA, J. & ALBARRACÍN, A. 2017. Metodología para el Análisis de Vulnerabilidad ante Amenazas de Inundación, Remoción en Masa y Flujos Torrenciales en Cuencas Hidrográficas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Vol. 27 (2): 109–136.

VILLAR, M.D.L.Á.P.; VIDAL, P.G. & FALCÓN, M.R. 2016. Algunos Elementos Conceptuales Relacionados con el Riesgo de Desastres. Ecos Sociales. Vol. 4 (10): Artículo 10.

IX. Anexos

Anexo 1. Inventario remociones en masa

ID	Tipo de punto (entrenamiento /prueba)	Coordenadas		Ubicación	Fecha	Tipo de Movimiento	Fuente	Confiability
		Latitud	Longitud					
RM 1	Entrenamiento	37.191757°	73.572772°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	12-06-2024	Destizamiento	Visor Sernageomin	Alta
RM 2	Entrenamiento	37.191631°	73.574071°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	15-09-2023	Destizamiento de suelo	Minuta flash Sernageomin	Alta
RM 3	Entrenamiento	37.183245°	73.584334°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	15-09-2023	Destizamiento de suelo	Minuta flash Sernageomin	Alta
RM 4	Entrenamiento	37.181912°	73.590151°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	15-09-2023	Destizamiento de suelo y roca	Minuta flash Sernageomin	Alta
RM 5	Entrenamiento	37.191423°	73.574075°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	15-09-2023	Destizamiento de suelo	Minuta flash Sernageomin	Alta
RM 6	Entrenamiento	37.189357°	73.575364°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	15-09-2023	Destizamiento de suelo y roca	Minuta flash Sernageomin	Alta
RM 7	Entrenamiento	37.192160°	73.573362°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-12-2014	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 8	Entrenamiento	37.192497°	73.575679°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 9	Prueba	37.186787°	73.580235°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	28-08-2024	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 10	Entrenamiento	37.184313°	73.579738°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-12-2014	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 11	Entrenamiento	37.174872°	73.593286°	Ruta P-22, llico/punta lavapie	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 12	Entrenamiento	37.153972°	73.590932°	costa punta lava pie	28-08-2024	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 13	Entrenamiento	37.159766°	73.602804°	costa punta lava pie	01-01-2012	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 14	Entrenamiento	37.169939°	73.610527°	costa punta lava pie	01-01-2017	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 15	Entrenamiento	37.180817°	73.619566°	costa punta lava pie	01-01-2013	Destizamiento de roca	identificación Google earth	Alta
RM 16	Entrenamiento	37.166217°	73.577273°	cerca de playa trana	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 17	Entrenamiento	37.152786°	73.578093°	punta lavapie	28-08-2024	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 18	Prueba	37.172060°	73.583518°	valle entre llico y punta lavapie	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 19	Entrenamiento	37.152291°	73.576353°	punta lavapie	28-08-2024	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 20	Entrenamiento	37.165769°	73.583562°	valle entre llico y punta lavapie	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 21	Entrenamiento	37.187904°	73.580086°	Ruta P-22, llico/punta lavapie	28-08-2024	Destizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 22	Prueba	37.192422°	73.575188°	Ruta P-22, llico/punta lavapie	28-08-2024	Destizamiento de suelo y roca	identificación en terreno	Alta
RM 23	Entrenamiento	37.150765°	73.582529°	Punta lavapie	01-01-2023	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 24	Entrenamiento	37.192058°	73.574918°	Ruta P-22, llico/punta lavapie	28-08-2024	Destizamiento de suelo y roca	identificación en terreno	Alta
RM 25	Entrenamiento	37.162128°	73.606483°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 26	Entrenamiento	37.190996°	73.628899°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 27	Entrenamiento	37.195233°	73.641057°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 28	Entrenamiento	37.198108°	37.198108°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 29	Prueba	37.203310°	73.640066°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 30	Entrenamiento	37.214099°	73.644649°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 31	Entrenamiento	37.233063°	37.233063°	costa punta lava pie	01-01-2024	Destizamiento de suelo	identificación Google earth	Media

Continuación anexo 1.

ID	Tipo de punto (entrenamiento/prueba)	Coordenadas		Ubicación	Fecha	Tipo de Movimiento	Fuente	Confiability
		Latitud	Longitud					
RM 32	Entrenamiento	37.188235°	73.577268°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	28-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 33	Entrenamiento	37.188551°	73.575554°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	28-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 34	Entrenamiento	37.190538°	73.573873°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 35	Entrenamiento	37.190081°	73.573602°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 36	Prueba	37.190631°	73.573596°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 37	Entrenamiento	37.194274°	73.640121°	Acantilado costero	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	grupo de estudios multiamenazas UdeC	Alta
RM 38	Entrenamiento	37.195875°	73.642383°	Acantilado costero	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	grupo de estudios multiamenazas UdeC	Alta
RM 39	Entrenamiento	37.150882°	73.587701°	Acantilado costero	28-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 40	Entrenamiento	37.147994°	73.586175°	Acantilado costero	28-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 41	Prueba	37.181878°	73.592062°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 42	Prueba	37.188353°	73.573058°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 43	Entrenamiento	37.186241°	73.580264°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2022	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 44	Prueba	37.185173°	73.579287°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2022	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 45	Entrenamiento	37.182719°	73.591181°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2022	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 46	Prueba	37.188665°	73.575287°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	28-08-2024	Deslizamiento de suelo y roca	identificación en terreno	Alta
RM 47	Entrenamiento	37.182138°	73.579476°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2022	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 48	Prueba	37.181294°	73.579819°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2022	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 49	Entrenamiento	37.180217°	73.589215°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	28-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación en terreno	Alta
RM 50	Prueba	37.189616°	73.572517°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2013	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 51	Entrenamiento	37.182196°	73.581176°	Ruta P-22, llico/punta Lavapié	01-01-2013	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 52	Entrenamiento	37.148947°	73.581190°	punta Lavapié	21-08-2012	caída de roca	Sernageomin	Alta
RM 53	Entrenamiento	37.206288°	73.642311°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 54	Entrenamiento	37.159636°	73.595150°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 55	Entrenamiento	37.160515°	73.603427°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 56	Entrenamiento	37.163416°	73.607036°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 57	Entrenamiento	37.163651°	73.607.235	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 58	Entrenamiento	37.185996°	73.623374°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 59	Entrenamiento	37.186320°	73.624135°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 60	Prueba	37.187933°	73.625764°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 61	Entrenamiento	37.189188°	73.626644°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 62	Entrenamiento	37.191177°	73.630292°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Media
RM 63	Entrenamiento	37.191374°	73.633032°	Acantilado costero	01-01-2012	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta
RM 64	Prueba	37.215732°	73.645649°	Acantilado costero	01-08-2024	Deslizamiento de suelo	identificación Google earth	Alta

Anexo 2. Inventario incendios forestales

ID	Tipo de punto (entrenamiento/prueba)	Coordenadas		Ubicación	Fecha	Causa	Fuente	Confiabilidad
		Este	Norte					
IF 1	Prueba	622497,88	5883500	MALLIN Y RUMENA	2010-2011	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 2	Entrenamiento	622268	5883500	RUMENA	2013-2014	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 3	Prueba	621586	5887113	QUINOQUEN	2013-2014	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 4	Prueba	625264	5887110	PUNTA LAVAPIE	2010-2011	Actividades recreativas	IDE-CONAF	Alta
IF 5	Entrenamiento	624264	5885110	TRANA 3	2010-2011	Accidentes eléctricos	IDE-CONAF	Alta
IF 6	Entrenamiento	626264	5884110	TRANA Y TRAUCO	2010-2011	Incendios de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 7	Entrenamiento	620264	5878110	QUINOQUEN	2011-2012	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 8	Entrenamiento	624590,25	5878806,6	QUINOQUEN	2013-2014	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 9	Entrenamiento	622275,98	5878443,2	RUMENA	2013-2014	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 10	Entrenamiento	626437	5885279	TRANA Y TRAUCO	2015-2016	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 11	Entrenamiento	625933	5880093	LLICO Y MONTANA DE EVARISTO	2016-2017	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 12	Entrenamiento	624376	5884851	RUMENA	2017-2018	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 13	Entrenamiento	621779	5878730	QUINOQUEN	2017-2018	Incendio de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 14	Entrenamiento	626604,88	5878546	A23 TRANA #3	2018-2019	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 15	Entrenamiento	626933,49	5876662	A21 TRANA #3	2018-2019	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 16	Entrenamiento	626284	5886758	A21 TRANA #3	2019-2020	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 17	Prueba	621265	5881921	A23 MALLIN Y RUMENA	2019-2020	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 18	Entrenamiento	624852,98	5879424	LLICO Y MONTANA DE EVARISTO	2020-2021	Incendios de causa desconocida	IDE-CONAF	Alta
IF 19	Entrenamiento	622219	5878486	LLICO Y MONTANA DE EVARISTO	2020-2021	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 20	Entrenamiento	626912	5885699	TRANA Y TRAUCO	2020-2021	Actividades recreativas	IDE-CONAF	Alta
IF 21	Entrenamiento	626936	5885699	TRANA Y TRAUCO (PARTICULAR)	2020-2021	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 22	Prueba	621662	5882615	RUMENA	2021-2022	Quema de desechos	IDE-CONAF	Alta
IF 23	Entrenamiento	626126	5883768	TRANA Y TRAUCO	2022-2023	Faenas forestales	IDE-CONAF	Alta
IF 24	Entrenamiento	626013	5886927	TRANA #3	2022-2023	Incendios intencionales	IDE-CONAF	Alta
IF 25	Entrenamiento	627027	5883087	LLICO	2022-2023	Accidentes eléctricos	IDE-CONAF	Alta
IF 26	Prueba	619814	5877525	HIJUELA 5	2022-2023	Tránsito de personas vehículos o aeronaves	IDE-CONAF	Alta

Anexo 3. Resultados FR remociones en masa

ANEXO 3

DATASET: Inventario local PL

TYPE: Deslizamiento - Arranque (80% entrenamiento) 51 puntos

Factor	Class	Class Pixels	Class pixels (%)	Land	Landslides	FR	RF	RF (%)	Min RF	Max RF	Max-Min R	(Max-Min RF)min	PR
Pendiente (°)	< 5°	31574	10,46%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,359	0,359	0,244	1,47
	5 - 10°	62948	20,86%	3	5,88%	0,282	0,005	0					
	10 - 15°	83531	27,68%	4	7,84%	0,283	0,005	0					
	15 - 20°	62353	20,66%	8	15,69%	0,759	0,012	1					
	20 - 25°	32752	10,85%	6	11,76%	1,084	0,017	2					
	25 - 30°	16199	5,37%	8	15,69%	2,923	0,047	5					
	30 - 35°	7082	2,35%	8	15,69%	6,685	0,107	11					
	35 - 40°	3093	1,02%	6	11,76%	11,480	0,183	18					
	40° - 45°	1580	0,52%	6	11,76%	22,474	0,359	36					
	> 45°	709	0,23%	2	3,92%	16,694	0,266	27					
	Total	301821	100,00%	51	100,00%	62,665	1,000	100					
Orientación de laderas	Plano (-1)	865	0,29%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,244	0,244	0,244	1,00
	N (337.5 - 22.5°)	44908	14,88%	9	17,65%	1,186	0,178	18					
	NE (22.5 - 67.5°)	31560	10,46%	5	9,80%	0,938	0,140	14					
	E (67.5 - 112.5°)	35516	11,77%	3	5,88%	0,500	0,075	7					
	SE (112.5 - 157.5°)	38460	12,74%	10	19,61%	1,539	0,230	23					
	S (157.5 - 202.5°)	23407	7,76%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	SW (202.5 - 247.5°)	21733	7,20%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	W (247.5 - 292.5°)	39992	13,25%	6	11,76%	0,888	0,133	13					
	NW (292.5 - 337.5°)	65380	21,66%	18	35,29%	1,629	0,244	24					
	Total	301821	100,00%	51	100,00%	6,679	1,000	100					
Curvatura	Cóncava (< -1)	4314	1,43%	7	13,73%	9,603	0,337	34	0,023	0,640	0,617	0,244	2,53
	Planar (-1 to 1)	293608	97,28%	32	62,75%	0,645	0,023	2					
	Convexa (> 1)	3899	1,29%	12	23,53%	18,214	0,640	64					
	Total	301821	100,00%	51	100,00%	28,462	1,000	100					
Geomorfología	Acantilado costero activo	20284	6,72%	30	58,82%	8,753	0,898	90	0,000	0,898	0,898	0,244	3,68
	Terraza marina nivel 1,2 y 3	118161	39,15%	6	11,76%	0,301	0,031	3					
	Acantilado relicto	9577	3,17%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Playa	1340	0,44%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Plataforma de abrasión marina	519	0,17%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Llanura aluvial	24674	8,18%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Ladera de valle	127187	42,14%	15	29,41%	0,698	0,072	7					
	Estuario	79	0,03%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
Total	301821	100,00%	51	100,00%	9,751	1,000	100						
Geología / litología	Sedimentos Recientes	11658	3,86%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,584	0,584	0,244	2,39
	Formación Trihuco	91424	30,29%	20	39,22%	1,295	0,584	58					
	Formación Milongue	198739	65,85%	31	60,78%	0,923	0,416	42					
	Total	301821	100,00%	51	100,00%	2,218	1,000	100					
Distancia a rios	0 - 25 m	5729	1,90%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,686	0,686	0,244	2,81
	25 - 50 m	4887	1,62%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	50 - 75 m	5184	1,72%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	75 - 100 m	4843	1,60%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	100 - 150 m	9822	3,25%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	150 - 200 m	10376	3,44%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	200 - 250 m	10518	3,48%	1	1,96%	0,563	0,314	31					
	250 - 300 m	9996	3,31%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	300 - 2675,467 m	240466	79,67%	50	98,04%	1,231	0,686	69					
Total	301821	100,00%	51	100%	1,793	1,000	100						
Distancia Red Vial	0 - 10 m	2912	0,96%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,352	0,352	0,244	1,44
	10 - 20 m	5414	1,79%	5	9,80%	5,466	0,235	23					
	20 - 30 m	3761	1,25%	4	7,84%	6,294	0,270	27					
	30 - 50 m	6487	2,15%	9	17,65%	8,211	0,352	35					
	50 - 100 m	15951	5,28%	6	11,76%	2,226	0,096	10					
	100 - 200 m	29352	9,72%	2	3,92%	0,403	0,017	2					
	200 - 300 m	25944	8,60%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	300 - 2633m	212000	70,24%	25	49,02%	0,698	0,030	3					
Total	301821	21,16%	51	100,00%	23,298	1,000	100						
NDVI - Land Cover	Agua (<-0.042)	19	0,01%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,727	0,727	0,244	2,98
	Jelo conuido yesteril (-0.042 - 0.182)	5358	1,78%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Pastizal (0.182 - 0.327)	80396	26,64%	41	80,39%	3,018	0,727	73					
	Vegetacion escasa (0.327 - 0.425)	52337	17,34%	9	17,65%	1,018	0,245	25					
	Vegetacion densa (0.425 - 0.503)	50296	16,66%	1	1,96%	0,118	0,028	3					
	Vegetacion muy densa (0.503 - >)	113415	37,58%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
Total	301821	100,00%	51	100,00%	4,153	1,000	100						

Anexo 4. Resultados FR incendios forestales

ANEXO 4

DATASET: Inventario local PL

TYPE: Incendios Forestales - Arranque (80%)

26

Factor	Class	Class Pixel	Class pixels (%)	Pixel Landslides	Class Landslide (%)	FR	RF	RF (%)	Min RF	Max RF	Max-Min RF	(Max-Min RF)min	PR
Pendiente (°)	< 5°	31574	10,46%	2	10,00%	0,956	0,156	16	0,000	0,304	0,304		1,20
	5 - 10°	62948	20,86%	3	15,00%	0,719	0,117	12					
	10 - 15°	83531	27,68%	9	45,00%	1,626	0,265	27					
	15 - 20°	62353	20,66%	4	20,00%	0,968	0,158	16					
	20 - 25°	32752	10,85%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	25 - 30°	16199	5,37%	2	10,00%	1,863	0,304	30					
	30 - 35°	7082	2,35%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	35 - 40°	3093	1,02%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	40° - 45°	1580	0,52%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	> 45°	709	0,23%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
Total		301821	100,00%	20	100,00%	6,132	1,000	100					
Duración del combustible	No Combustible	5377	1,78%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,524	0,524		2,06
	1 hora	80396	26,64%	10	50,00%	1,877	0,524	52					
	10 horas	52337	17,34%	4	20,00%	1,153	0,322	32					
	100 horas	163711	54,24%	6	30,00%	0,553	0,154	15					
	Total		301821	100,00%	20	100,00%	3,584	1,000					
Tipo de combustible	No Combustible	5377	1,78%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,742	0,742		2,92
	Combustible ligero	132733	43,98%	14	70,00%	1,592	0,742	74					
	Combustible pesado	163711	54,24%	6	30,00%	0,553	0,258	26					
	Total		301821	100,00%	20	100,00%	2,145	1,000					
NDII	Muy bajo	1132	0,38%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,364	0,364		1,43
	Bajo	31013	10,28%	2	10,00%	0,973	0,232	23					
	Moderado	78966	26,16%	8	40,00%	1,529	0,364	36					
	Alto	77901	25,81%	6	30,00%	1,162	0,277	28					
	Muy alto	112809	37,38%	4	20,00%	0,535	0,127	13					
Total		301821	100,00%	20	100,00%	4,199	1,000	100					
Cubrimiento horizontal VFC	0 - 5%	48	0,02%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,610	0,610	0,254	2,40
	5 - 25%	5084	1,68%	1	5,00%	2,968	0,610	61					
	25 - 50%	32773	10,86%	2	10,00%	0,921	0,189	19					
	50 - 75%	263195	87,20%	17	85,00%	0,975	0,200	20					
	75 - 100%	721	0,24%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
Total		301821	100,00%	20	100,00%	4,864	1,000	100					
Velocidad del viento	Flojo	46	0,02%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,635	0,635		2,50
	Moderado	210196	69,64%	16	80,00%	1,149	0,635	64					
	Molesto a fuerte	91579	30,34%	4	20,00%	0,659	0,365	36					
	Total		301821	100,00%	20	100%	1,808	1,000					
Distancia Red Vial	0 - 10 m	2084	0,69%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,368	0,368		1,45
	10 - 20 m	5293	1,75%	3	15,00%	8,553	0,368	37					
	20 - 30 m	3693	1,22%	2	10,00%	8,173	0,352	35					
	30 - 50 m	6357	2,11%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	50 - 100 m	15799	5,23%	2	10,00%	1,910	0,082	8					
	100 - 200 m	29482	9,77%	6	30,00%	3,071	0,132	13					
	200 - 300 m	25928	8,59%	2	10,00%	1,164	0,050	5					
	300 - 2633m	213185	70,63%	5	25,00%	0,354	0,015	2					
Total		301821	100,00%	20	100,00%	23,226	1,000	100					
NDVI - Land Cover	Agua (<-0.042)	19	0,01%	0	0,00%	0,000	0,000	0	0,000	0,470	0,470		1,85
	Suelo contruido y esteril (-0.042 - 0.182)	5358	1,78%	0	0,00%	0,000	0,000	0					
	Pastizal (0.182 - 0.327)	80396	26,64%	10	50,00%	1,877	0,470	47					
	Vegetacion escasa (0.327 - 0.425)	52337	17,34%	4	20,00%	1,153	0,289	29					
	Vegetacion densa (0.425 - 0.503)	50296	16,66%	1	5,00%	0,300	0,075	8					
	Vegetacion muy densa (0.503 - >)	113415	37,58%	5	25,00%	0,665	0,166	17					
Total		301821	100,00%	20	100,00%	3,996	1,000	100					
Altitud	100 m	75074	24,87%	5	25,00%	0,995	0,257	26	0,135	0,389	0,254		1,00
	200 m	113547	37,62%	5	25,00%	1,505	0,389	39					
	300 m	89537	29,67%	7	35,00%	0,848	0,219	22					
	400 m	23663	7,84%	3	15,00%	0,523	0,135	14					
	Total		301821	100,00%	20	100,00%	3,870	1,000					