



INFORME FINAL (EJECUTIVO)

Noviembre 2024

Análisis de Remociones en Masa,
Ruta 115 CH, Región del Maule

Índice

Índice	2
1 Introducción	4
1.1 Objetivos y Alcances del Proyecto	5
1.1.1 General	5
1.1.2 Específicos	5
1.1.3 Objetivos del Informe final	5
2 Cumplimiento del Programa de Trabajo	7
3 Resultados	9
3.1 Estudios Específicos	9
3.3.1 Estudio de Climatología y meteorología	9
3.3.2 Estudio de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR)	11
3.3.3 Instalación de Vértices y Monitoreo en Área de Deslizamiento Rotacional km 134	14
3.3.4 Análisis de datos de medición de nivel freático y medición inclinómetro	20
3.3.5 Levantamiento de información geoespacial en terreno Vuelos UAV	23
3.3.6 Modelos empírico y heurístico de susceptibilidad a remociones en masa ...	25
3.3.7 Resultados de las simulaciones de susceptibilidad a Caídas de Rocas en la Ruta 115 CH	27
3.3.8 Recomendaciones de infraestructuras de mitigación basadas en planificación de rutas alternativas que no sean afectadas por la influencia del deslizamiento rotacional para conectar la Ruta 115-CH	30
4 Conclusiones y Recomendaciones	32



Parte 1

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

El Ministerio de Obras Públicas de Chile, a través de su Dirección de Planeamiento (Dirplan MOP) y el Departamento de Estudios, ha puesto en marcha un estudio titulado "Análisis de Remociones en Masa, Ruta 115-CH, Región del Maule". Esta iniciativa responde a la necesidad imperante de contar con una infraestructura vial que se alinee con los planes de desarrollo del país, especialmente en un contexto donde los procesos geodinámicos naturales, como las remociones en masa, representan un riesgo significativo.

El estudio tiene como objetivo principal identificar herramientas de gestión ambiental y territorial que se integren de manera efectiva en la planificación estratégica, facilitando así la toma de decisiones informadas. Se centra en el análisis de la situación actual, su proyección futura y las características específicas de estas amenazas naturales en las zonas de alta montaña. La investigación adopta un enfoque científico que no solo busca entender mejor el territorio, sino también proponer soluciones de infraestructura sostenibles y adaptadas a las condiciones geológicas y climáticas del área.

Este informe técnico presenta los resultados finales de los estudios realizados, incluyendo análisis DInSAR, estudios climatológicos, geológicos, levantamientos UAV y el monitoreo de los vértices en la zona afectada por deslizamientos rotacionales. Asimismo, se ofrecen recomendaciones sobre la planificación de rutas alternativas que minimicen la exposición a estos riesgos.

Entre 2018 y 2021, la Región del Maule ha recibido inversiones significativas en infraestructura vial, totalizando aproximadamente MM \$308.827, con un enfoque particular en la Ruta 115-CH. Esta ruta ha sido objeto de inversiones considerables, incluyendo MM \$10.846 destinados a estudios de ingeniería y medidas de conservación. Dada su importancia estratégica, especialmente como vía alternativa al Paso Cristo Redentor, este estudio busca fortalecer la resiliencia de la Ruta 115-CH frente a los desafíos que representan las remociones en masa.

El presente análisis no solo identifica las causas y efectos de estos fenómenos, sino que también propone un enfoque interdisciplinario que oriente las decisiones de inversión y gestión ambiental. Se espera que, a partir de estas recomendaciones, se mejoren las condiciones de seguridad vial y se eleve el nivel de servicio de la Ruta Internacional Paso Pehuenche en el tramo entre los kilómetros 100 y 161.

1.1 Objetivos y Alcances del Proyecto

1.1.1 General

Generar diseño e implementación de metodologías interdisciplinarias aplicables a la planificación de susceptibilidad naturales asociados a remociones en masa (RM) para comprensión del proceso geodinámico y que orienten y ayuden a la toma de decisiones, en contexto de gestión y planificación ambiental territorial, para mejorar las condiciones de seguridad vial y nivel de servicialidad de la Ruta 115-CH, Paso Internacional Pehuenche entre el Km. 100 al Km. 161.

1.1.2 Específicos

- Generar estudio basado en interferometría radar satelital (InSAR), para una caracterización detallada de las tasas de desplazamiento espacial y de mayor rango temporal (detección de cambios en una serie temporal) para RM (Km 100 al Km 161), relacionando el factor sísmico y volcánico de la Laguna del Maule que tiene interacción con la ruta internacional.
- Desarrollar estudio de deslizamientos rotacionales en sector Monjes Blancos (km 135), para determinar la dimensión y profundidad de la falla, la composición del material asociado y la influencia del nivel de las aguas subterráneas que se relacionan a la pérdida de resistencia y afección de la carpeta de rodado en la ruta que la afecta constantemente.
- Generar actualización de RM (km 100 al Km 161) a través de monitoreo, trabajo de campo y vuelos con dron para modelos con tratamiento SIG (Sistemas de Información Geográfica) debido a puntos críticos de inestabilidad de taludes/vertientes.
- Identificar elementos y acciones a tener en consideración para el diseño vial en la zona de RM bajo estudio, para luego establecer orientaciones y propuestas específicas que apunten a mejorar el comportamiento y seguridad de la vía.

1.1.3 Objetivos del Informe final

- Entregar una recopilación de los Resultados del proyecto.
- Resumir información recogida y procesada en las etapas del proyecto.
- Generar conclusiones y recomendaciones.

Parte 2

CUMPLIMIENTO DEL PROGRAMA DE TRABAJO



2 Cumplimiento del Programa de Trabajo

El cronograma se adecua a las fechas solicitadas por bases técnicas. A continuación, se indica el porcentaje de cumplimiento por etapas de trabajo comprometidas para el presente contrato, las que se presentan divididas según las principales actividades que componen cada una de ellas:

Tabla 1: Programa de trabajo.

ETAPAS	INICIO	TERMINO	DIAS (N°)	AVANCE (%)
ETAPA DE DIAGNÓSTICO Y VALIDACIÓN	25-09-2023	17-11-2023	53	100
DIAGNÓSTICO Y REVISIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE	25-09-2023	17-11-2023	53	100
REUNIÓN DE COORDINACIÓN	25-09-2023	05-10-2023	10	100
ENTREGA DE INFORME Y PRESENTACIÓN	05-10-2023	17-11-2023	43	100
ETAPA ESTUDIOS ESPECÍFICOS	25-09-2023	19-10-2024	390	
ESTUDIO DE REMOCIÓN EN MASA POR INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA	25-09-2023	19-10-2024	390	100
ESTUDIO DE DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES	25-11-2023	19-10-2024	329	100
ACTUALIZACIÓN DE REMOCIONES EN MASA (KM 100 AL KM 161)	23-04-2024	21-06-2024	59	100
ENTREGA DE INFORMES	05-10-2023	30-08-2024	330	
ENTREGA INFORME 1	05-10-2023	17-11-2023	43	100
ENTREGA INFORME 2	18-11-2023	08-03-2024	111	100
ENTREGA INFORME 3	09-03-2024	03-06-2024	86	100
ENTREGA INFORME 4	04-06-2024	30-08-2024	87	100
ENTREGA DE INFORMES BIMENSUAL	25-09-2023	18-11-2024	420	
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 1	25-09-2023	24-11-2023	60	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 2	25-11-2023	23-01-2024	59	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 3	24-01-2024	25-03-2024	61	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 4	26-03-2024	22-05-2024	57	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 5	23-05-2024	22-07-2024	60	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 6	23-07-2024	23-09-2024	62	100
ENTREGA DE INFORME BIMENSUAL 7	24-09-2024	18-11-2024	55	100
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL	25-09-2023	18-12-2024	450	
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL 1	25-09-2023	26-12-2023	92	100
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL 2	27-12-2023	25-03-2024	89	100
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL 3	26-03-2024	21-06-2024	87	100
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL 4	22-06-2024	19-09-2024	89	100
ENTREGA DE INFORME TRIMESTRAL FINAL	20-09-2024	18-12-2024	89	-
INFORME FINAL	20-10-2024	04-11-2024	15	100

Fuente: Elaboración propia.

Según lo indicado en la tabla 1, el programa de trabajo se mantuvo en cumplimiento según fechas comprometidas, el detalle del programa de trabajo se encuentra anexado en el Informe Final.



Parte 3

RESULTADOS

3 Resultados

Este apartado, hace referencia al resumen de las actividades desarrolladas durante el transcurso del estudio:

- Resultado de los Estudios específicos

3.1 Estudios Específicos

3.3.1 Estudio de Climatología y meteorología

El estudio examina las relaciones entre variables climáticas, como la precipitación y la acumulación de nieve, y su impacto en la estabilidad de taludes y el riesgo de remociones en masa en el entorno de la Ruta 115-CH en Chile. Los análisis se basan en datos meteorológicos históricos (1980-2023) obtenidos de estaciones locales y aplican pruebas estadísticas (Mann-Kendall) para identificar tendencias en precipitaciones y eventos extremos, así como en acumulación de nieve.

Principales Elementos del Estudio:

Análisis de Precipitaciones: Se observa que las precipitaciones intensas contribuyen a la inestabilidad de los taludes por saturación de suelos, aumento de presión en los poros y disminución de cohesión del material. Estos efectos se agravan con lluvias extremas, detectadas en algunos años específicos.

Eventos Extremos y Patrones Temporales: Los eventos de precipitación intensa muestran una estacionalidad concentrada entre junio y julio. Las estaciones de alta montaña también exhiben variabilidad en la acumulación de nieve, influenciada por fenómenos como El Niño y La Niña.

Tendencias de Nieve y su Impacto: El aumento de acumulación de nieve, seguido de deshielos, puede incrementar el riesgo de deslizamientos y flujos de detritos en pendientes pronunciadas, afectando la seguridad vial y aumentando la vulnerabilidad a remociones en masa.

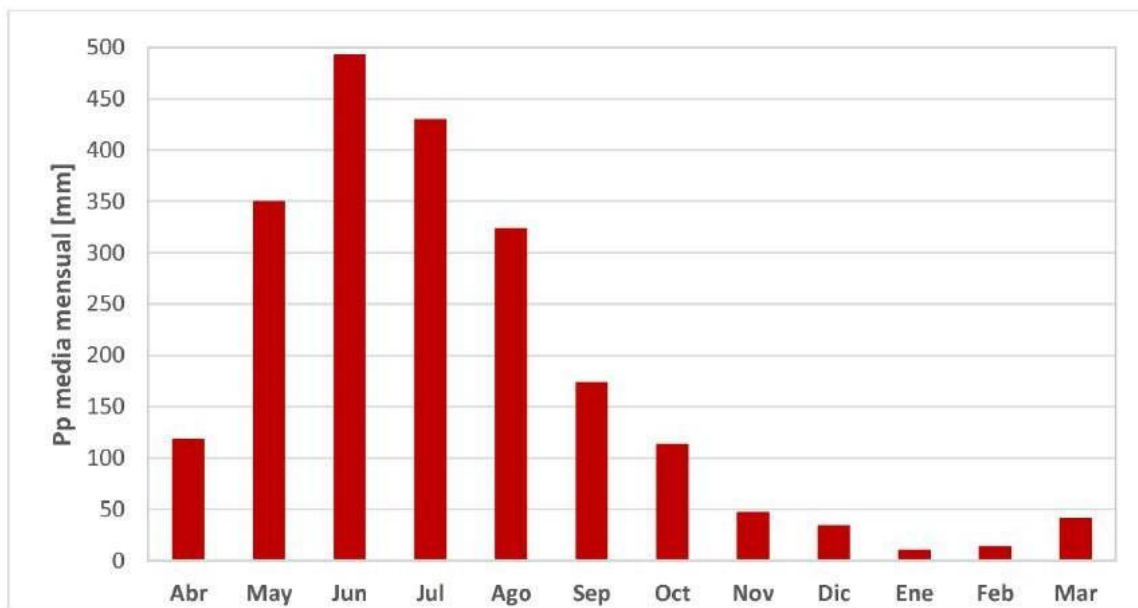


Figura 1 Precipitaciones medias mensuales históricas del periodo entre 1984-2013 - estación Armerillo. Fuente: Morales, 2016.

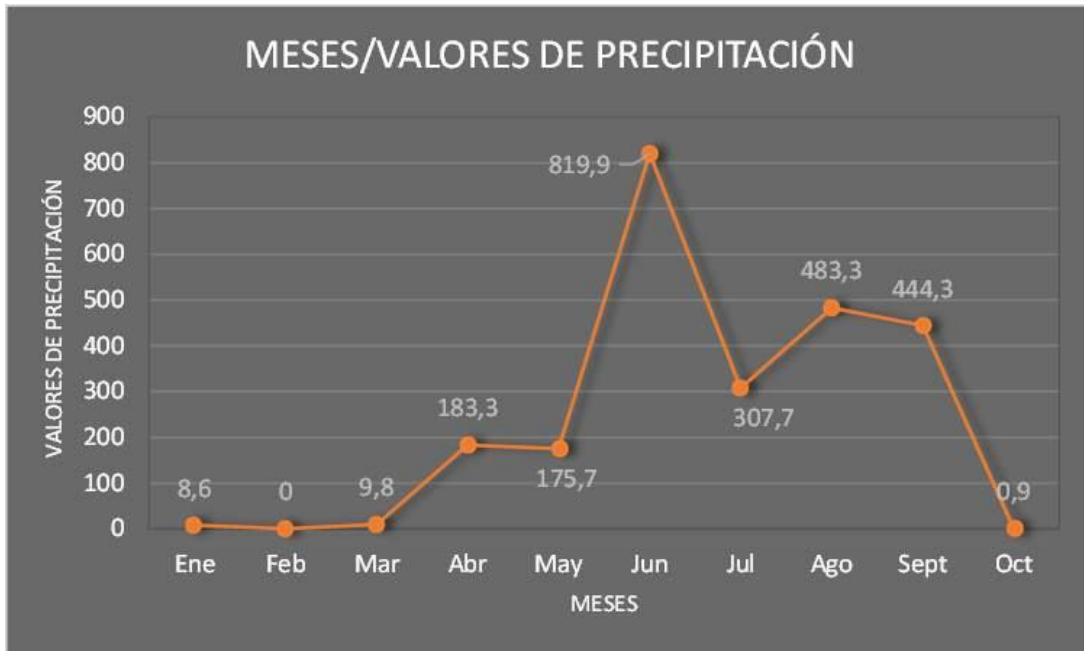


Figura 2. Distribución mensual de las precipitaciones para el año de 2023. Fuente: Elaboración propia.

Conclusión:

El estudio concluye que las precipitaciones extremas y los cambios en la acumulación de nieve tienen un impacto directo en la estabilidad de los taludes cercanos a la Ruta 115-CH. La estacionalidad y los eventos climáticos extremos elevan el riesgo de deslizamientos y caídas de rocas, lo cual representa un desafío para la infraestructura vial en esta región.

Recomendaciones:

Monitoreo Continuo de Clima: Se recomienda implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas y de acumulación de nieve para prever deslizamientos.

Fortalecimiento de Estructuras: Es crucial fortalecer las infraestructuras de drenaje en zonas vulnerables y aplicar tecnologías de estabilización de taludes.

Planes de Emergencia y Gestión de Riesgo: Desarrollar protocolos de respuesta y planes de contingencia ante eventos de remoción en masa, incluyendo evacuación y cierre temporal de la carretera cuando las condiciones lo exijan.

3.3.2 Estudio de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR)

Este estudio se enfoca en analizar el desplazamiento superficial y las deformaciones en áreas de alta montaña en la Ruta 115-CH en Chile, aplicando técnicas de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR), particularmente los métodos SBAS y PSI. Estas técnicas permiten monitorear movimientos de terreno mediante imágenes de satélites Sentinel-1A/B, proporcionando mediciones precisas en condiciones climáticas adversas y sobre terrenos montañosos. La investigación evalúa cambios topográficos y deformaciones en la superficie, especialmente en el sector de la Laguna del Maule.

Principales Elementos del Estudio:

Metodología DInSAR: Se utilizó una serie temporal de imágenes SAR en modos Ascendente y Descendente para generar mapas de deformación horizontal y vertical. Las técnicas SBAS y PSI permitieron cuantificar la velocidad de deformación y el desplazamiento acumulado.

Procesamiento de Imágenes: Las imágenes se sometieron a preprocesamiento y procesamiento para generar interferogramas, realizar correcciones atmosféricas y analizar la coherencia en función de la estación del año. El uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM) mejoró la precisión en las mediciones.

Análisis de Deformación: Se identificaron velocidades de deformación y acumulaciones de desplazamiento en áreas específicas, especialmente en sectores inestables y con alta variabilidad estacional.

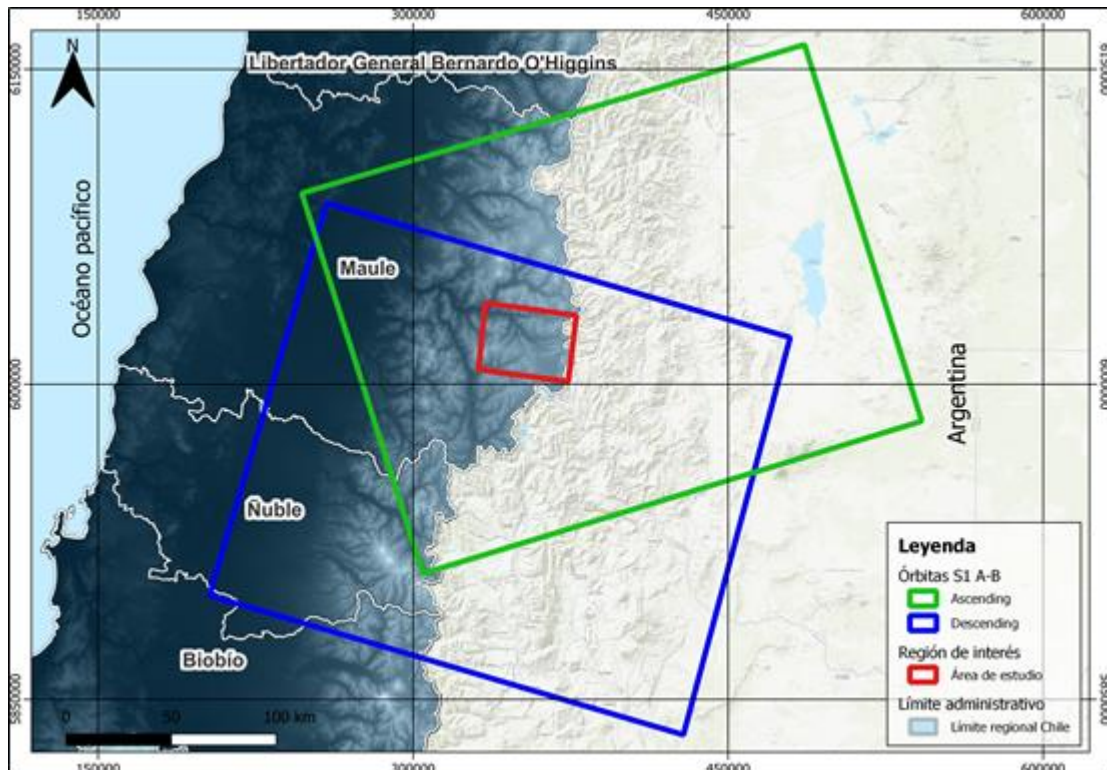


Figura 3. Esquema adquisición SAR.

Conclusiones:

La tecnología DInSAR demostró ser efectiva para monitorear deformaciones en áreas propensas a remociones en masa y desplazamientos de tierra. El estudio resalta la importancia del monitoreo continuo en áreas de alta montaña debido a los riesgos de deslizamientos que afectan la infraestructura vial, particularmente en zonas cercanas a la Laguna del Maule, donde los resultados muestran variabilidad en la estabilidad del terreno según la estación del año y las condiciones climáticas.

Ejemplo resultados, los cuales se puedes revisar por completo en informe final.

Polígono	Total	Mínimo	Máximo	Promedio
P1	42.00	4.19	9.35	5.95
P2	118.00	0.99	7.90	3.93
P3	62.00	-5.73	5.51	-0.82
P4	6.00	-3.77	-3.77	-3.77

Tabla 1. Geoestadística de píxeles en Polígono P1-P4 modo Asc (mm/year).

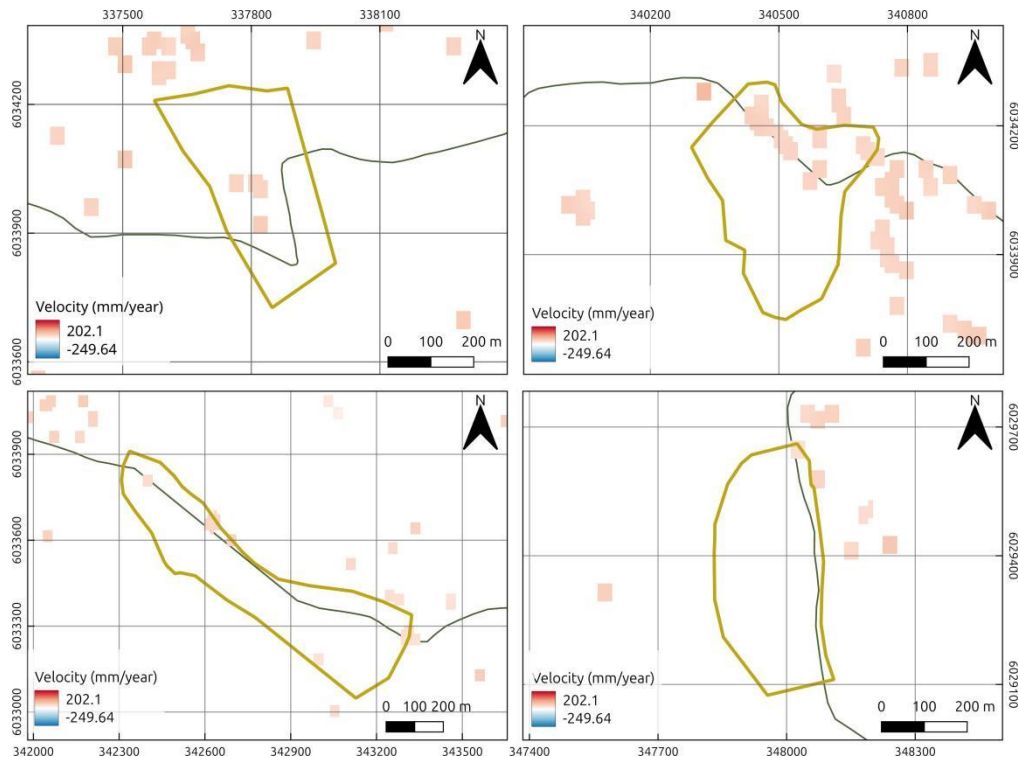


Figura 4. Velocidad (mm/year) para P1 a P4.

Recomendaciones:

Implementación de un Sistema de Monitoreo Continuo: Se sugiere instalar un sistema de monitoreo en tiempo real en la Ruta 115-CH para detectar desplazamientos peligrosos y alertar de posibles deslizamientos.

Fortalecimiento de Infraestructura: Se recomienda reforzar los taludes y mejorar los sistemas de drenaje en áreas identificadas con alta deformación acumulada, especialmente en sectores que experimentan variabilidad estacional.

Gestión de Riesgos: Desarrollar protocolos de respuesta ante eventos de remoción en masa, con planes de cierre y desvío de tráfico en caso de emergencias.

3.3.3 Instalación de Vértices y Monitoreo en Área de Deslizamiento Rotacional km 134

El estudio se centra en el monitoreo geodésico de un área de deslizamiento rotacional en el kilómetro 134 de la Ruta 115-CH en Chile. Con el fin de evaluar y mitigar los riesgos de deslizamientos, se realizó la instalación y monitoreo de 30 vértices geodésicos, empleando técnicas GNSS de alta precisión. Los vértices fueron distribuidos en cuatro cuadrantes y monitoreados en cuatro campañas entre enero y marzo de 2024. El procesamiento de datos se realizó mediante la técnica PPP (Precise Point Positioning), garantizando alta precisión en la detección de movimientos.

Principales Elementos del Estudio:

Instalación y Monitoreo de Vértices: La instalación de 30 vértices geodésicos en el área de riesgo permitió un monitoreo detallado de desplazamientos en cada cuadrante. El uso de receptores GNSS multiconstelación (GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou) posibilitó captar movimientos submilimétricos en condiciones óptimas.

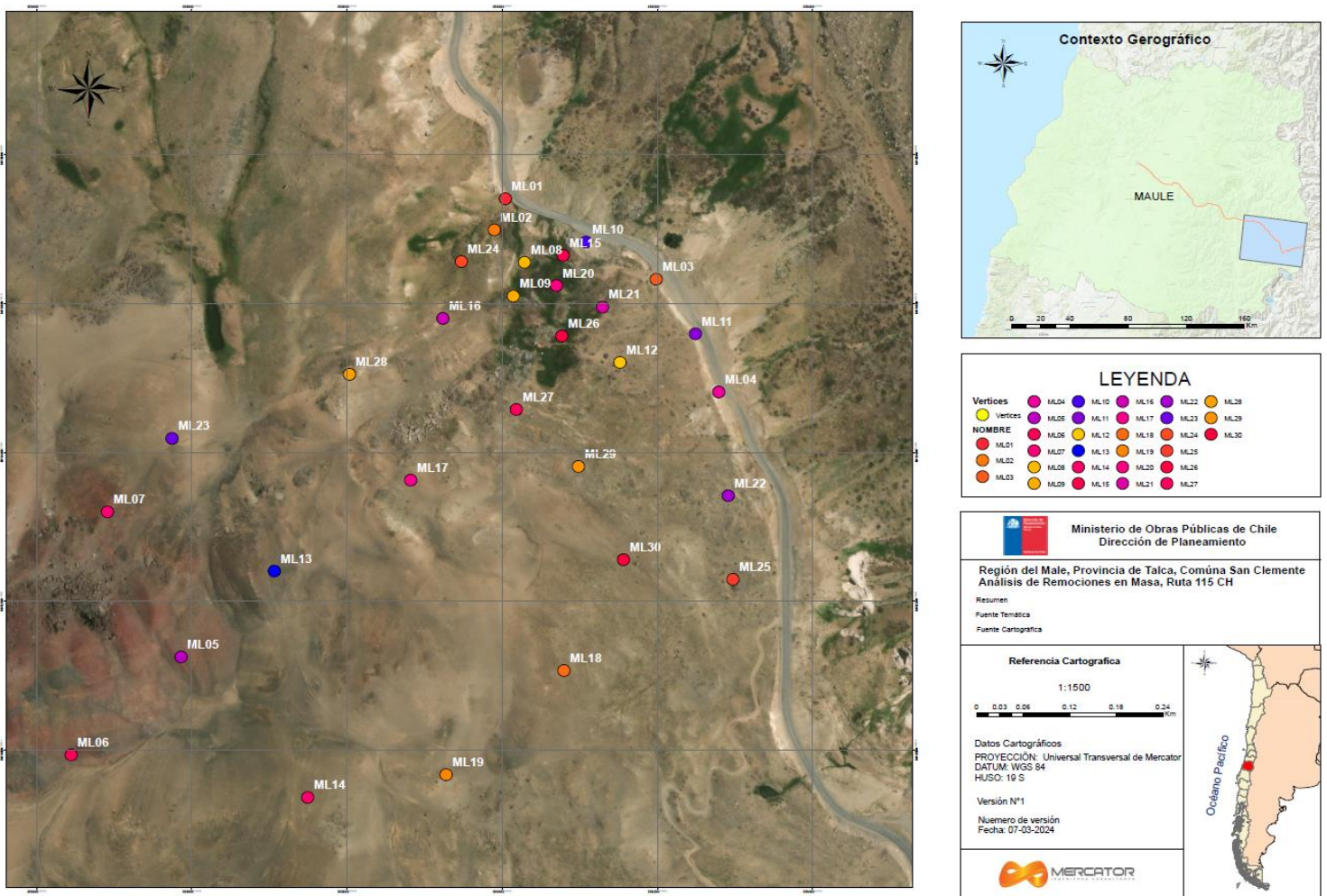


Figura 5 Cartografía Posición de vértices. Fuente: Elaboración propia.



Figura 6 Posición del GNSS para monitoreo.

Procesamiento y Análisis de Datos: Los datos fueron postprocesados utilizando el software GrafNet para el ajuste de redes y el análisis de desplazamientos. En el análisis se destacó el desplazamiento hacia la ruta 115-CH, con algunos puntos de mayor movimiento, como ML20, que presentó desplazamientos de hasta 15 cm en tres meses.

Resultados por Cuadrantes: Cada cuadrante mostró patrones de movimiento hacia el noreste, orientándose hacia la Ruta 115-CH. Los vértices con mayores desplazamientos fueron ML23, ML13, ML21 y ML20, en diferentes cuadrantes.

Conclusiones:

El análisis indica un desplazamiento consistente de los vértices hacia la Ruta 115-CH, lo cual representa un riesgo significativo para la estabilidad de la infraestructura vial en el sector Monjes Blancos. Los movimientos observados validan la importancia de realizar monitoreos continuos y detallados en áreas de alta vulnerabilidad, especialmente en temporadas de alta actividad geomorfológica.

Recomendaciones:

Monitoreo Continuo y Ampliado: Se recomienda extender el monitoreo a otras áreas susceptibles y continuar las campañas en el área actual, optimizando la frecuencia en períodos de mayor actividad para anticipar riesgos.

Refuerzo de Infraestructura: Implementar medidas de estabilización en las zonas identificadas con mayores desplazamientos, como muros de contención o sistemas de drenaje.

Plan de Emergencia: Establecer protocolos para la rápida evacuación y cierre temporal de la ruta en caso de eventos extremos de desplazamiento, garantizando la seguridad de los usuarios de la vía.

Monitoreo Complementario de Remoción en Masa mediante GNSS en las Inmediaciones de la Ruta 115-CH

La Ruta 115-CH en la Región del Maule, Chile, cruza una zona de alta actividad tectónica y volcánica, particularmente en las proximidades de la Laguna del Maule. Este sector está expuesto a riesgos geológicos significativos, incluyendo deslizamientos y otros fenómenos de remoción en masa (RM), debido tanto a la actividad sísmica histórica como a la continua deformación tectónica. Para una gestión eficaz del riesgo en esta área, se ha implementado un monitoreo geodésico mediante estaciones GNSS en modo campana como continuas, utilizando el método de Punto Preciso de Posicionamiento (PPP), que proporciona precisión del orden de decimas de milímetros en la estimación de desplazamientos al usar correcciones de órbita y reloj.

Estudios de Monitoreo GNSS: Procesamiento y Estrategias

Dos estudios complementarios, ambos empleando PPP, refuerzan la comprensión de la dinámica de la remoción en masa en este sector. El primer análisis se realizó en la estación continua ML14, ubicada en un área de la Ruta 115-CH conocida por deslizamientos activos. Mediante el procesamiento PPP, se obtuvieron observaciones GNSS diarias de la estación ML14 durante un período de 21 días en marzo de 2024. Este procesamiento incluyó un enfoque de corrección ionosférica y troposférica, empleando las constelaciones GPS y GLONASS en el marco de referencia ITRF2020. La serie de tiempo generada permitió identificar desplazamientos locales mediante coordenadas diarias transformadas a un sistema local (e, n, u), lo cual es útil para monitorear posibles movimientos de masa en áreas críticas de infraestructura vial.

El segundo estudio complementa la información al extender el monitoreo a largo plazo en la región de la Laguna del Maule, un área ubicada en la Zona Volcánica Sur de los Andes. Con cinco estaciones GNSS permanentes del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur (OVDAS), operativas entre 2012 y 2024, se ha recopilado una serie temporal extensa que permite una modelación detallada de las deformaciones en el sector. Estas estaciones, procesadas también en modo PPP, permiten estimar con precisión desplazamientos anuales en coordenadas locales, con el apoyo de filtros de Hampel para eliminar valores atípicos. Este monitoreo se ha enfocado en observar patrones de deformación cíclica y desplazamientos sostenidos, los cuales muestran velocidades significativas (hasta 247 mm/año en componente vertical) y una tendencia hacia el nor-oeste, probablemente vinculada al flujo de agua de la laguna.

Resultados y Conclusiones

Ambos estudios, aunque diferentes en escala y tiempo de observación, ofrecen un enfoque integral y complementario para monitorear la remoción en masa en la zona. Mientras el análisis de la estación ML14 proporciona datos de alta precisión en un corto período crítico para deslizamientos específicos en la infraestructura de la Ruta 115-CH, el monitoreo de las estaciones del OVDAS permite evaluar tendencias a largo plazo y variaciones cíclicas en el entorno de la Laguna del Maule, la cual involucra 8 de las 20 zonas de remoción activa situadas entre el km 146 y 153 de la ruta. Las observaciones en estas estaciones muestran amplitudes anuales de hasta 30 mm en vertical y 20 mm en horizontal, asociadas a la interacción entre la

actividad volcánica y la carga hídrica, sugiriendo una influencia significativa sobre la estabilidad del terreno.

Este enfoque destaca la importancia de un monitoreo GNSS continuo y detallado para la gestión de riesgos geológicos en las inmediaciones de la Ruta 115-CH. Al integrar análisis a corto y largo plazo, los resultados obtenidos brindan una base sólida para comprender mejor los procesos de deformación y sus implicaciones en la estabilidad del terreno, proporcionando datos críticos para la planificación y mitigación de riesgos en esta área altamente activa.

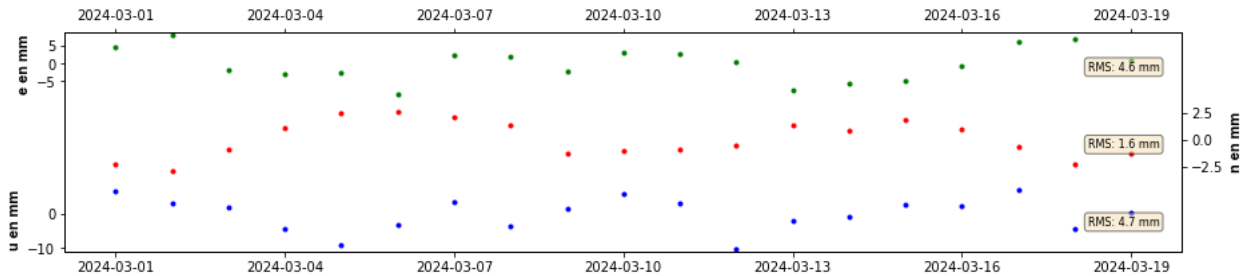


Figura 7. Serie de tiempo del desplazamiento observado mediante GNSS después de remover el componente lineal (T): e (verde), n (red), and u (azul) para el vértice ML14.

Monitoreo Complementario de Remoción en Masa mediante InSAR en las Inmediaciones de la Ruta 115-CH

Se efectuó un levantamiento InSAR en la zona de la ruta 115-CH, laguna del Maule utilizando el satélite Sentinel-1 con orbitas 18 ascendente y 83 descendente. El lapso de tiempo estudiado abarca desde el inicio de Sentinel-1, octubre 2014 hasta mayo del 2014, dando así casi diez años de monitoreo.

InSAR: Métodos

Para el procesamiento InSAR se utilizaron los softwares ISCE y MintPY. Ambos softwares están basados en Python y han sido y siguen siendo desarrollados por el NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) a medida que la investigación en el campo de InSAR avanza.

El software ISCE es utilizado para leer las imágenes satelitales SLC crudas y efectuar el corregistro con la imagen de referencia (master) y posteriormente la creación de interferogramas y el desengrapado de los mismos.

El software MintPY es utilizado para el análisis de las series de tiempo. Este software trabaja directamente que los resultados de ISCE ya que ambos se complementan íntegramente. MintPY carga los interferogramas desengrapados para comenzar su flujo de trabajo que incluye la selección de la referencia espacial, inversión de interferogramas y correcciones de desengrapado, correcciones atmosféricas, corrección de DEM y eliminación de rampas. Posteriormente hace el cálculo de la velocidad lineal y estimación de la precisión de esta.

Para el procesamiento de los datos, se tuvo que elegir ciertos parámetros para superar la complejidad de la zona de estudio y los desafíos que se presentaron al momento del procesamiento, en especial la alta estación invernal que normalmente representa un obstáculo con respecto a las mediciones realizadas por InSAR.

Resultados y Conclusiones

Los resultados de InSAR indican una clara señal regional correspondiente a un cuerpo magmático que está sufriendo una inflación en los últimos 10 años. Esta señal tiene un componente horizontal que espacialmente está dividida por lo que probablemente es el centro del volcán o cuerpo magmático, con movimientos hacia el oeste y este. La magnitud de la señal de deformación es inversamente proporcional a la distancia del volcán, y es de tener en cuenta que durante el monitoreo InSAR esta señal no ha decaído lo que muestra que un constante monitoreo en esta zona es primordial ya que esta tendencia podría desencadenar una amenaza mayor.

El método InSAR utilizado dio buenos resultados para el estudio de la señal regional del área, sin embargo, si existe el interés de estudiar un área en particular de superficie menor, es posible que este método no sea suficiente. Existe la posibilidad de explorar otros métodos InSAR como PSI pero estos están basados en reflectores permanentes, y la estación invernal puede hacer este método menos efectivo que el ahora utilizado.

Si existe alguna zona en particular de riesgo, se recomienda la instalación de reflectores artificiales para el monitoreo (Corner reflectors). Sin embargo, es de tomar en cuenta que la instalación y diseño de estos reflectores deberán tomar en cuenta las condiciones meteorológicas del área. Además, el procesamiento InSAR para el caso de los reflectores artificiales deberá ser diferente, ya que SBAS no es la metodología adecuada, en su lugar PSI.

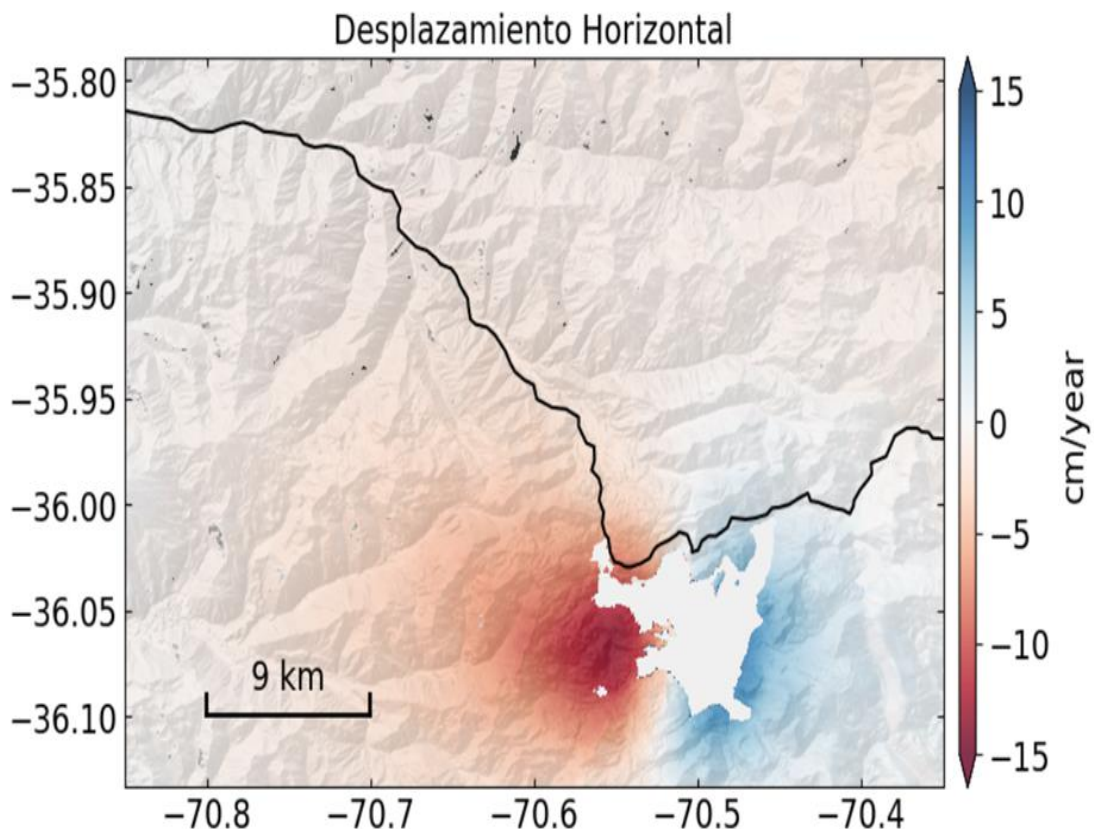


Figura 8. Componente horizontal derivado de la combinación de las órbitas ascendente y descendente.

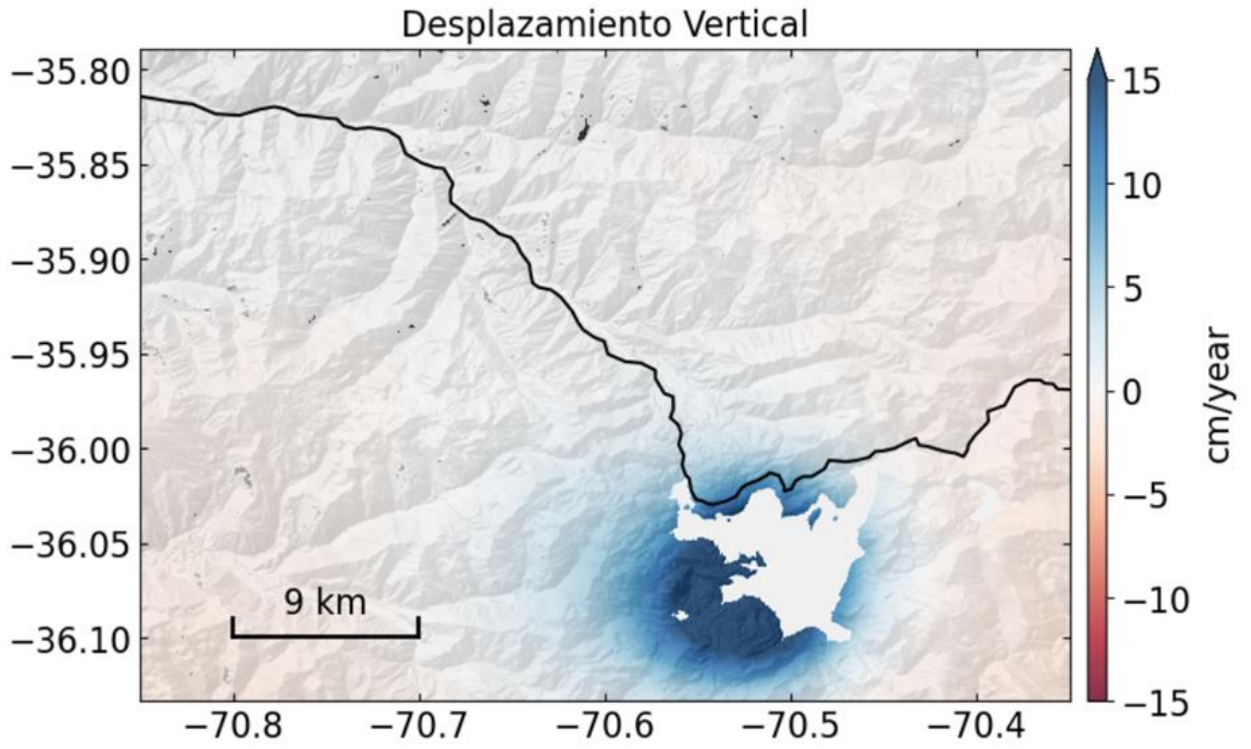


Figura 9. Componente vertical derivado de la combinación de las órbitas ascendente y descendente.

3.3.4 Análisis de datos de medición de nivel freático y medición inclinómetro

En la zona de los Monjes Blancos km 135 se realizaron dos pozos: un pozo de 30 m para medir las profundidades de los niveles freáticos, a través de un piezómetro, y otro pozo de 40 m para medir posibles niveles de deformaciones, por medio de un inclinómetro.



Figura 10 Fotografía de sonda Tecoinsa TP50 acoplada a camión 4x4 MAN realizando pozos en la ruta 115CH.

De acuerdo a las mediciones piezométricas realizadas entre febrero y abril del 2024, se detecta la presencia de una napa freática a una profundidad variable $Z_w = 20,256$ m a $20,749$ m dentro del periodo de mediciones, con una diferencia total de $0,493$ m. Esta profundidad coincide con niveles de sedimentos compuestos por arenas finas y arenas medias, con comportamiento plástico.



Figura 11 Piezómetro. A la izquierda se muestra el pozómetro utilizado en este estudio y registro de la toma de datos. A la derecha, se muestra el tapón, la funda metálica cerrada por candado y el collar de hormigón.

Con respecto a los datos inclinométricos tomados el 14 de marzo y 24 de abril de 2024, el desplazamiento resultante horizontal (X, Y) registrado, indica que los cambios más significativos se ubican entre los 15 y 20 m, y entre los 32 y 36 m. Profundidades que se asocian a niveles de roca piroclástica poco meteorizada, correspondiente a una toba de lapilli vítrea riolítica. En ese sentido, para el eje A el máximo de desplazamiento acumulado alcanzó 0,41 mm en dirección A180 (-), mientras que para el eje B fue de 0,46 mm en dirección B0 (+).



Figura 12 Inclinómetro. A la izquierda se muestra el inclinómetro utilizado en este estudio. A la derecha, se muestra el tapón, la funda metálica de cierre y la toma de datos.

Conclusiones Piezómetro.

El piezómetro indica la presencia de una napa freática a una profundidad variable $Z_w = 20,256$ m a 20,749 m dentro del periodo de mediciones, con una diferencia total de 0,493 m. Esta profundidad coincide con niveles de sedimentos compuestos por arenas finas y arenas medias, con comportamiento plástico.

Se recalca que el periodo de medición hasta ahora se ha desarrollado entre febrero 2024 y abril 2024, por lo que no se han tomado mediciones que puedan reflejar fluctuaciones estacionales, es decir, la comparación se da en momentos temporalmente cercanos y en contextos climáticos similares.

Conclusiones Inclinómetro.

El desplazamiento resultante horizontal (X, Y) registrado con el inclinómetro, en un periodo corto entre el 14 de marzo y el 24 de abril de 2024, indica que los cambios más significativos se ubican entre los 15 y 20 m, y entre los 32 y 36 m. En relación a la columna estratigráfica, estas profundidades se asocian a niveles de roca piroclástica poco meteorizada, correspondiente a una toba de lapilli vítrea riolítica.

Para el eje A el máximo de desplazamiento acumulado alcanzó 0,41 mm en dirección A180 (-), mientras que para el eje B el máximo de desplazamiento acumulado alcanzó 0,46 mm en dirección B0 (+).

La literatura indica la dificultad de determinar si hay movimientos del suelo cuando los movimientos son muy pequeños y que, en la práctica, el umbral general para identificar movimientos sobre una superficie en un deslizamiento de tierra es de al menos 2,5 mm (Machan y Bennett, 2008). En ese sentido, mayor cantidad de lecturas mejoraría la resolución de los datos y contribuiría una comparativa temporal, para determinar si posibles deslizamientos son propensos a activarse en ciertas estaciones del año.

3.3.5 Levantamiento de información geoespacial en terreno Vuelos UAV

Este estudio se centra en el levantamiento de información geoespacial utilizando vuelos de vehículos aéreos no tripulados (UAV) a lo largo de la ruta 115-CH, específicamente entre los kilómetros 100 y 161. Se han identificado y marcado 20 polígonos estratégicos de vuelo, distribuidos a lo largo de la ruta, con un total de 54 puntos de apoyo geodésicos precisos para garantizar la calidad de los datos recolectados.

Metodología:

- Planificación de Vuelos: Se utilizó la aplicación Drone Deploy para programar y optimizar los vuelos, ajustando parámetros como la altitud y el traslape de imágenes.
- Ejecución de Vuelos: Se realizaron 20 vuelos en cuatro campañas (de enero a abril de 2024), cubriendo un área total de aproximadamente 657,13 hectáreas.



Figura 13 Vuelos realizados en terreno. Fuente: Elaboración propia.

- Procesamiento de Datos: Las imágenes capturadas fueron procesadas mediante Agisoft Metashape, generando modelos digitales de elevación (MDE) y ortofotos georreferenciadas en el sistema WGS84.

Conclusiones

Eficiencia de UAV: El uso de UAV ha demostrado ser una herramienta eficaz y económica para la recopilación de datos geoespaciales en comparación con métodos tradicionales. Se logró una resolución de 3,77 cm a una altitud de 400 m, proporcionando datos precisos.

Variaciones en Volúmenes de Corte y Terraplén: Se identificaron cambios significativos en los volúmenes de corte y terraplén entre las diferentes campañas, lo que indica dinámicas de terreno relevantes que deben ser monitoreadas.

Calidad de Datos: Los procedimientos de control geodésico y la planificación minuciosa aseguraron que la calidad de los datos obtenidos fuera óptima, permitiendo un análisis detallado y confiable de los fenómenos de deslizamiento en la ruta.

Recomendaciones

Monitoreo Continuo: Se sugiere establecer un programa de monitoreo periódico utilizando UAV para seguir la evolución de los deslizamientos y otros fenómenos geológicos en la zona, asegurando la actualización constante de la información geoespacial.

Integración de Datos: Es recomendable integrar los datos de UAV con otros sistemas de monitoreo geológico y geotécnico para obtener un panorama más completo y facilitar la toma de decisiones informadas.

Capacitación y Tecnología: Se recomienda invertir en capacitación continua para el personal encargado de operar UAV y en la actualización de tecnologías de procesamiento de datos, optimizando así la eficiencia y efectividad en futuras campañas.

3.3.6 Modelos empírico y heurístico de susceptibilidad a remociones en masa

Este capítulo presenta dos enfoques para evaluar la susceptibilidad a remociones en masa en el área de estudio. Los modelos corresponden a un análisis empírico regional con Modelos Aditivos Generalizados (GAM) y un modelo heurístico simple aplicado a 20 zonas en donde se cuenta con modelos de elevación digital de alta resolución (0,1 m aproximadamente en la horizontal).

1. Modelo empírico regional (modelos GAM)

El modelo empírico se basó en un enfoque probabilístico utilizando modelos GAM, que permiten evaluar la susceptibilidad en función de la presencia o ausencia histórica de remociones en masa en el área. Estos modelos incorporaron variables topográficas (pendiente, curvatura del perfil y del plano, distancia a drenajes y caminos, precipitación, entre otras) y ajusta la probabilidad de ocurrencia de remociones de acuerdo con su tipo: deslizamientos, caídas y flujos.

El inventario de remociones en masa se realizó utilizando imágenes satelitales de alta resolución disponible en el programa Google Earth. Se identificaron y mapearon un total de 486 remociones en masa, las cuales fueron clasificadas en deslizamientos (50%), flujos (24%) y caídas (26%). Esta clasificación fue realizada considerando el tipo de movimiento predominante y aplicando criterios diagnósticos específicos para cada fenómeno.

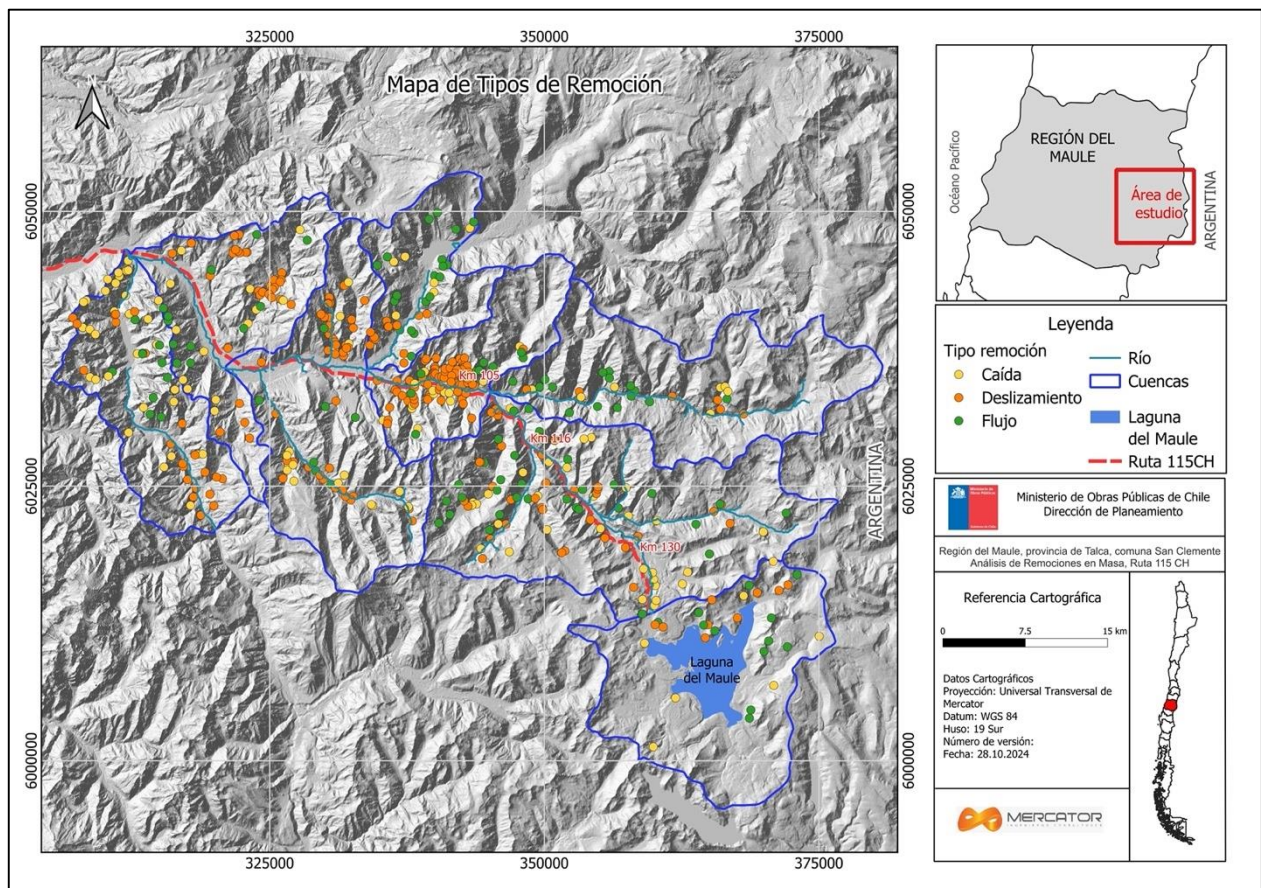


Figura 14 Inventario de remociones en masa por tipo. Fuente: Elaboración propia.

Cuatro variantes del modelo fueron evaluadas, cada una enfocada en un tipo específico de remoción para optimizar la precisión predictiva. El modelo destinado a deslizamientos mostró el mejor rendimiento predictivo (AUROC de 0,82), seguido por los modelos de caídas y flujos, mientras que el modelo general, que considera todos los tipos de remociones, obtuvo un rendimiento moderado (AUROC de 0,74). Estos resultados muestran la importancia de modelos específicos según el tipo de remoción para obtener una representación más precisa de la susceptibilidad.

2. Modelo heurístico simple

El modelo heurístico utilizó modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución obtenidos mediante los vuelos UAV para derivar variables topográficas (pendiente, curvatura del perfil, curvatura planar y orientación) en 20 zonas críticas. Estas variables se combinaron mediante un sistema de ponderación que clasificó las zonas de estudio en categorías de susceptibilidad (baja, media, alta y muy alta).

Si bien este enfoque ofrece una evaluación preliminar rápida y plausible, presenta evidentes limitaciones debido a que el MDE incluye construcciones y vegetación, lo cual tiende a incrementar la pendiente en ciertas áreas, generando una sobreestimación de la susceptibilidad. Por ello, este modelo debe considerarse una herramienta de referencia inicial y no una predicción definitiva.

Conclusiones y recomendaciones

Los modelos empíricos obtenidos al aplicar modelos GAM a los datos proporcionaron una evaluación robusta de los fenómenos en estudio, los que son útiles para reconocer zonas con mayor predisposición a generar remociones en masa.

El modelo heurístico aplicado a 20 zonas críticas, aunque limitado, es una referencia rápida que puede guiar estudios más detallados. Dado que en estas zonas ya se observan eventos de remoción en masa, se recomienda incorporar en estudios futuros técnicas de medición de alta precisión, como GNSS, inclinómetros e interferometría SAR (InSAR), así como realizar inspecciones de campo detalladas y recopilar variables geotécnicas adicionales. Estas medidas pueden contribuir a reducir el sesgo y a mejorar la precisión en la evaluación de susceptibilidad para las zonas críticas del área de estudio.

Finalmente, estos modelos deben entenderse como una representación general del fenómeno y deben servir como base para zonificaciones futuras y estudios específicos, es decir, corresponden a un marco inicial para la planificación y mitigación del peligro en el área de estudio.

3.3.7 Resultados de las simulaciones de susceptibilidad a Caídas de Rocas en la Ruta 115 CH

Este informe examina detalladamente el riesgo geológico asociado a caídas de rocas y deslizamientos a lo largo de distintos tramos de la ruta 115 CH, un corredor vial caracterizado por su vulnerabilidad a movimientos de masa. La ruta, especialmente en zonas con alteración hidrotermal y pendientes pronunciadas, fue objeto de una evaluación exhaustiva mediante simulaciones de trayectorias de rocas basadas en un modelo de fricción de un parámetro. Este modelo, fundamentado en el trabajo de Scheidegger (1975) y mejorado por estudios posteriores, como los de Van Dijke y Van Westen (1990) y Dorren y Seijmonsbergen (2003), permitió simular tanto la velocidad como la trayectoria de las rocas desde su punto de liberación hasta el impacto, considerando factores clave como la inclinación del terreno, la aceleración gravitacional y la pérdida de energía en cada choque.

La evaluación abarcó múltiples tramos de la ruta, seleccionados por sus características geológicas diversas. En estos tramos se utilizaron coeficientes de fricción ajustados a nivel global y local para mejorar la precisión de las simulaciones. Estas simulaciones arrojaron resultados variables en términos de riesgo geológico. Los tramos KM103-104 mostraron estabilidad geológica, mientras que otros, como KM105-106 y KM116, presentaron velocidades de caída de hasta 128,43 m/s y 272,88 m/s respectivamente, evidenciando un riesgo de caída de rocas moderado a alto. En tramos como KM117-120 y KM123, las velocidades de caída de rocas superaron los 272,88 m/s, lo cual señala un nivel de riesgo elevado que podría comprometer la seguridad de la infraestructura y la de las comunidades cercanas. En estos sectores se recomienda implementar barreras de contención y monitoreo constante para reducir el riesgo de eventos catastróficos.

El informe también describe áreas de relativa estabilidad, como el tramo denominado La Mina, en el cual la ausencia de fracturas estructurales y una inclinación controlada del terreno sugieren una alta estabilidad geomecánica. De manera similar, el tramo KM133-134 no presentó actividad significativa de caída de rocas, lo que permite inferir un bajo riesgo en condiciones actuales. Sin embargo, en otros tramos, la alteración hidrotermal y la presencia de fracturas en la roca indican vulnerabilidades que podrían requerir intervenciones preventivas a futuro.

Ejemplo Resultados:

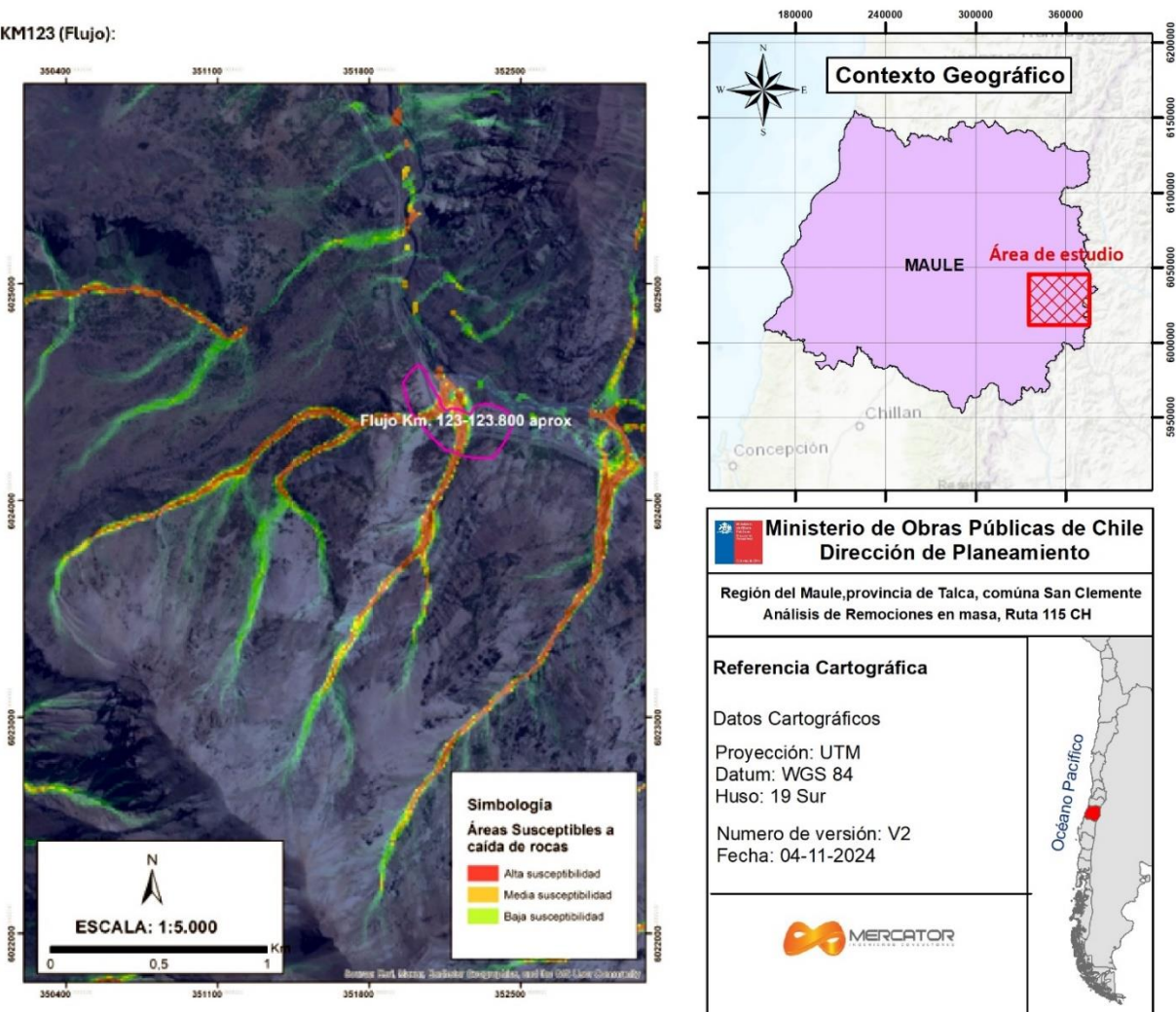
KM123 (Flujo):


Figura 15 Resultados de las simulaciones de caída de rocas km 123 (Flujo)

Conclusiones

A lo largo de la ruta 115 CH, se identificaron diversos niveles de riesgo geológico que se distribuyen en función de la topografía, la composición del terreno y la presencia de alteraciones hidrotermales. Los sectores de alto riesgo, como los tramos KM105-106 y KM116, mostraron velocidades significativas de caída de rocas en las simulaciones, lo cual indica que los bloques rocosos en movimiento tienen el potencial de generar impactos destructivos en infraestructuras vitales como carreteras y líneas eléctricas. En estos casos, el riesgo se asocia a factores como pendientes pronunciadas y la alteración hidrotermal, que reduce la cohesión de la roca y facilita su desplazamiento. La implementación de barreras de contención y redes dinámicas es esencial para mitigar estos riesgos, además de un monitoreo constante que permita una intervención oportuna en caso de detectar signos de inestabilidad.

En contraste, tramos como KM103-104 y KM133-134 mostraron condiciones geomecánicas estables, lo que sugiere que, en ausencia de eventos sísmicos o climáticos extremos, estos sectores tienen un bajo riesgo de caídas de rocas. Esto se atribuye a la estabilidad de la

inclinación del terreno y a la ausencia de fracturas o alteraciones estructurales significativas en la roca. Sin embargo, es recomendable mantener un programa de monitoreo preventivo en estas zonas para anticiparse a posibles cambios en la estabilidad.

Otros sectores, como los tramos KM117-120 y KM128-129, fueron clasificados como zonas de riesgo alto debido a las condiciones “caóticas” observadas. En estos tramos, la combinación de pendientes pronunciadas, fracturas en la roca y velocidades de caída superiores a 272,88 m/s señala la presencia de un entorno altamente inestable. La energía cinética acumulada en estos bloques al caer representa una amenaza considerable, con el potencial de generar impactos severos en infraestructuras y zonas habitadas. En estos casos, la instalación de barreras físicas y redes de contención es indispensable, acompañada de sistemas de alerta temprana para la protección de las comunidades y el personal de mantenimiento de la ruta.

Además, en tramos como KM123 y KM127-128, se identificó una alta probabilidad de eventos de flujo de escombros debido a la combinación de grandes áreas de liberación y velocidades extremas. Estos flujos pueden movilizar grandes volúmenes de material, lo que representa un riesgo significativo para la infraestructura y las comunidades cercanas. Es esencial contar con sistemas de contención robustos y muros de desvío que canalicen el material hacia zonas de menor riesgo.

El informe demuestra la diversidad de condiciones geológicas y geomecánicas a lo largo de la ruta 115 CH, desde áreas de relativa estabilidad hasta tramos con alto riesgo de caída de rocas y deslizamientos. Este análisis permite priorizar las intervenciones de seguridad en la ruta, implementando sistemas de monitoreo continuo y barreras de contención en los tramos más críticos. Estas medidas de mitigación contribuirán a reducir el riesgo de accidentes y a proteger tanto las infraestructuras críticas como las comunidades locales, promoviendo así una gestión más segura y eficiente de la ruta 115 CH.

3.3.8 Recomendaciones de infraestructuras de mitigación basadas en planificación de rutas alternativas que no sean afectadas por la influencia del deslizamiento rotacional para conectar la Ruta 115-CH.

Este estudio se centra en evaluar y mitigar los riesgos de deslizamientos y desprendimientos en sectores específicos de la Ruta 115-CH, considerando factores geológicos, climáticos y de infraestructura. Las actividades principales incluyeron el análisis de susceptibilidad a deslizamientos en áreas críticas mediante modelos predictivos como SHALSTAB, y la formulación de propuestas de intervención que abarcan desde mantenimiento de estructuras existentes hasta la implementación de barreras dinámicas, muros de gaviones y otras infraestructuras de protección.

Conclusiones

El estudio identifica sectores con alta vulnerabilidad a deslizamientos y desprendimientos, como El Médano y Cuesta Los Cóndores, donde los factores ambientales y geológicos aumentan el riesgo de caída de rocas y erosión. En muchos de estos sectores, más del 50% de las áreas presentan alta susceptibilidad a deslizamientos. La necesidad de realizar un monitoreo continuo y la aplicación de medidas preventivas es crítica, especialmente en áreas con antecedentes de inestabilidad. La infraestructura existente, como muros de gaviones y mallas de retención, requiere mantenimiento periódico para mantener su efectividad.

Recomendaciones

Mantenimiento y Mejoras: Realizar mantenciones periódicas de estructuras actuales, incluyendo limpieza de mallas y muros de gaviones, especialmente en sectores con acumulación de material.

Infraestructuras Adicionales: Construir muros de contención y usar pernos lechados con malla en sectores de alta susceptibilidad a deslizamientos, como en la Cuesta La Zorra y otros tramos de riesgo.

Monitoreo Continuo: Implementar un sistema de vigilancia en zonas de alto riesgo, particularmente durante el invierno para gestionar los efectos de la nieve y el hielo.

Estas recomendaciones buscan minimizar los riesgos de deslizamiento y mejorar la seguridad vial en la Ruta 115-CH.



Parte 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4 Conclusiones y Recomendaciones

El estudio sobre la Ruta 115-CH, en la Región del Maule, evidencia áreas con alta vulnerabilidad a deslizamientos y desprendimientos, especialmente en sectores como El Médano y Cuesta Los Cóndores. Los factores geológicos y ambientales, como precipitaciones intensas y acumulación de nieve, incrementan el riesgo de caída de rocas y erosión. En estos sectores, más del 50% de las áreas muestran alta susceptibilidad a deslizamientos. La infraestructura existente, que incluye muros de gaviones y mallas de retención, requiere de un mantenimiento continuo para conservar su efectividad en la mitigación de estos riesgos. Además, el monitoreo en tiempo real es esencial para gestionar el impacto de las condiciones climáticas y detectar señales de inestabilidad en las zonas críticas de la ruta.

Recomendaciones

- **Mantenimiento y Mejoras:** Realizar mantenimiento periódico de estructuras actuales, como la limpieza de mallas y muros de gaviones, con especial atención a áreas con acumulación de material.
- **Implementación de Infraestructuras Adicionales:** Construir muros de contención y utilizar pernos lechados con malla en sectores de alta susceptibilidad, como la Cuesta La Zorra y otros tramos críticos.
- **Monitoreo Continuo:** Establecer un sistema de vigilancia en tiempo real en zonas de alto riesgo, especialmente en invierno, para gestionar adecuadamente la nieve y el hielo.
- **Protocolos de Emergencia y Desvíos:** Desarrollar planes de emergencia, incluyendo protocolos de cierre temporal de la ruta y desvíos en caso de deslizamientos importantes, para proteger a los usuarios y asegurar la continuidad del tránsito en condiciones seguras.

Estas recomendaciones están orientadas a minimizar los riesgos y garantizar la seguridad vial en la Ruta 115-CH, especialmente frente a los desafíos de inestabilidad geológica y climática.



MERCATOR
INGENIEROS CONSULTORES

