



Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile.

Landslide analysis using UAV and LIDAR techniques on Route 115 CH, Paso Pehuenche, Monjes Blancos Sector, Maule Region, Chile.

Historial del artículo

Recibido:

06 de noviembre de 2020

Revisado

01 de junio de 2021

Aceptado:

15 de junio de 2021

César Becerra Baeza^a, Jacqueline De Rurange Espinoza^{bc}

^a Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Planeamiento, Región del Maule, Talca, Chile.

Correo electrónico: cesar.becerra@mop.gov.cl

^b Universidad Tecnológica de Chile, INACAP, Área Construcción, Talca, Chile.

^c Consultora Anaterra www.anaterra.cl

Palabras clave

Deslizamiento, Geomática, LIDAR, multitemporal, UAV

Resumen

Se genera un análisis multitemporal de remociones en masa del tipo deslizamiento rotacional, ubicado en km 135 de la ruta internacional 115 CH, Paso Pehuenche, en sector denominado Monjes Blancos, Región del Maule (Chile), para determinar evolución y seguimiento de este proceso geodinámico, basándose en comparación de Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados de vuelos LIDAR (Light detection and ranging) y UAV (Unmanned Aerial Vehicle), uso de geomática y trabajo de campo. Los resultados obtenidos establecen movimientos superficiales de deslizamientos mayores a un metro, en un periodo de 20 meses, debido a las condiciones óptimas para la generación de estos movimientos como suelos altamente saturados, fuertes pendientes y topografía con intervención antrópica. Los resultados permiten demostrar la eficacia de combinar los métodos UAV – LIDAR para evaluar características geomorfológicas y proceso evolutivo de la inestabilidad. Además, se obtiene información para la gestión territorial de esta ruta internacional de Chile central.

Keywords

Geomatics, landslide, LIDAR, multitemporal, UAV

Abstract

A multitemporal analysis of mass wasting of the rotational landslide is generated, located at Km 135 of the 115 CH international route, Paso Pehuenche, in a sector called Monjes Blancos, Maule Region, to determine evolution and monitoring of this geodynamic process. Methodology was applied to determine surface changes based on comparison of Digital Elevation Models (DEM) processed from LIDAR (Light detection and ranging) and UAV (Unmanned Aerial Vehicle) flights, use of geomatics and field work. The results obtained establish surface movements of landslides greater than one meter, in a range of 20 months, due to the optimal conditions for the generation of these movements as highly saturated soils, steep slopes and topography with anthropic intervention. The results obtained allowed to demonstrate the effectiveness of combining the UAV - LIDAR methods to evaluate geomorphological characteristics and evolutionary process of instability. In addition, a degree of knowledge is obtained for the territorial management of this international route in central Chile.

Introducción

En la actualidad, se ha incrementado el uso y aplicación de las tecnologías geomáticas para el control y seguimiento de los procesos geomorfológicos evolutivos que se presentan en la corteza terrestre, debido al impacto y daño que generan, dando como resultado el planteamiento y desarrollo de diversas técnicas. En este contexto, se encuentran las metodologías de medición a través de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) (Zhao et al., 2018), los métodos fotogramétricos de alta precisión, datos LIDAR (Light detection and ranging, detección por luz y distancia), datos UAV (Unmanned Aerial Vehicle, vehículo aéreo no tripulado), escaneo de láser terrestre entre otros para generación de Modelos de elevación Digital (DEM) con precisión para cuantificar dinámica superficial (Doshida, 2021; Fernández et al., 2015; Golovko, 2018; Guzzetti et al., 2012; Jaboyedoff et al., 2012; Jaboyedoff, 2018; Niethammer et al., 2012; Pellicani et al., 2019; Peppia et al., 2016; Razak, 2011; Rossi et al., 2018; Tarolli et al., 2013)

La problemática que se infiere en el uso de estas tecnologías es que cada sensor presenta sus propias características en término de resolución espacial, espectral, metodología, costo específico, etc. Por lo tanto, se hace complejo elegir la técnica más adecuada y rentable para monitorear un determinado tipo de proceso. Además, la correcta interpretación de los datos es siempre importante y complicada (Fernández et al., 2015; Guzzetti et al., 2012). En el campo de percepción remota, una de las metodologías para caracterizar procesos geomorfológicos es el análisis multitemporal, definido como la comparación de coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas y que permite identificar cambios de las coberturas que han sido clasificadas (Chuvieco, 2010).

Uno de estos procesos geomorfológicos evolutivos son las remociones en masa, definidas como movimientos lentos o rápidos de determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, generados por una serie de factores (Hauser, 1994). Según Cruden & Varnes (1996) son movimientos de una masa de roca, escombros o tierra por una pendiente, bajo la influencia de la gravedad. Este proceso geodinámico es uno de los de origen natural más destructivos que afectan a los seres humanos, causando miles de muertes, daños en las infraestructuras y pérdidas monetarias enormes cada año en todo el mundo (Becerra, 2013; Becerra & De Rurange, 2018; Dragičević et al., 2015; Hamza & Kumar, 2017; Sabokbar et al., 2014;). En Chile, los eventos de remociones

en masa en zonas cordilleranas son comunes, dada la configuración del relieve, causando graves daños en vidas humanas, infraestructura y bienes materiales (Becerra, 2006; Becerra & De Rurange, 2018; Hauser, 1994). Hauser (1994) indica que el agua es uno de los elementos desencadenantes al originar drásticas disminuciones en la resistencia al corte y presiones intersticiales a lo largo de potenciales planos o superficies de ruptura. Becerra & De Rurange (2018) indican que se requieren estudios sobre comportamiento local meteorológico, geomecánica e hidrogeología, para proyectar el comportamiento e interacción de las propiedades físicas-mecánicas del suelo y litología en estos procesos geodinámicos. Un tipo de remoción en masa es el deslizamiento rotacional, definido como un movimiento de masa que se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. La cabeza del movimiento puede moverse hacia abajo dejando un escarpe casi vertical, mientras que la superficie superior inclinarse hacia atrás en dirección al escarpe. Estos movimientos ocurren frecuentemente en masas de material relativamente homogéneo, pero también pueden estar controlados parcialmente por superficies de discontinuidad preexistentes (Cruden & Varnes, 1996).

Para este caso de estudio, se utilizó DEM procesados de vuelos LIDAR y UAV, para caracterizar un deslizamiento rotacional en Km. 135 de ruta internacional 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule, mediante análisis multitemporal, con el objetivo de analizar su dinámica y obtener grado de conocimiento para la toma de decisiones. Con esta metodología, utilizando DEM de alta resolución, se obtiene una representación topográfica y características morfométricas superficiales para detectar, mapear y monitorear deslizamientos (Derron & Jaboyedoff, 2010; Jaukovic & Hunter, 2016; Pellicani et al., 2019; Sugianto, 2018; Zhao & Lu, 2018). Se ha seleccionado esta área de estudio debido a que se desarrollan constantemente estos procesos naturales, siendo un corredor bioceánico de gran importancia para la economía regional que une a la República de Chile y la República de Argentina y además se contribuye a una gestión y planificación territorial de riesgos naturales en zonas cordilleranas (Becerra & De Rurange, 2018).

Materiales y métodos

El área de estudio se localiza en la zona andina de Chile central, ruta internacional 115-CH, Paso Pehuenche, ubicada en Km. 135 de la ruta (figura 1). Las coordenadas geográficas de ubicación son 35° 59' 05'' S y 70° 25' 05'' O. El estudio abarca aproximadamente 7,6 hectáreas y su emplazamiento sobre la ruta es aproximadamente de 600

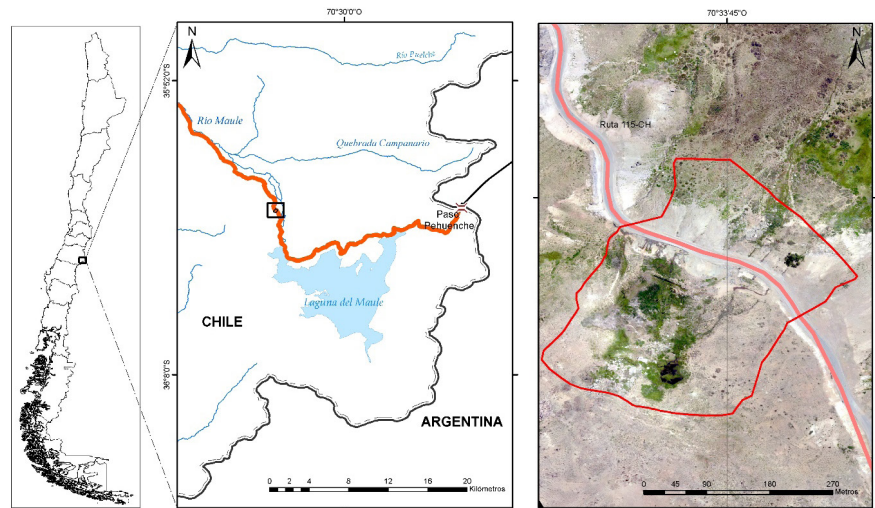


Figura 1. Área de estudio, km 135 de la ruta internacional 115 CH, Paso Pehuenche, en sector Monjes Blancos. Fuente: Elaboración propia (2021).

metros, el cual presenta un desplazamiento lateral con una fuerte dinámica, que se incrementa con los factores que se presentan en la alta montaña. Se deduce que través de un reconocimiento de fotografías aéreas del año 1997, este proceso existía, por lo que representa un riesgo natural reactivado (Becerra, 2013; Dirplan, 2014; INTRAT, 2014).

La geología del sector está constituida principalmente por remociones en masa antiguas (Pleistoceno-Holoceno) y remociones en masa recientes (Holoceno) y con presencia de depósitos aluviales actuales compuestos por bloques, gravas, arenas y en menor cantidad, limos y arcillas. En el límite superior hay presencia de depósitos de avalancha y rocas volcánicas del neógeno superior compuesto por lavas de composición andesítica a riolítica, las que se encuentran intruidas por diques asociados a complejos volcánicos recientes. En los límites del área de estudio hay presencia de ignimbrita que corresponde a una toba de *lapilli* en parte consolidada, que cubren concordantemente a la unidad Basaltos Losa Lo Aguirre. Esta unidad no presenta evidencias morfológicas de acción glaciaria, por lo que se consideran posglaciares y la morfología de erosión se asocia a procesos de erosión pluvial. También es denominada esta litología como “monjes blancos” por la particular forma que adoptó en su formación (INTRAT, 2014).

La geomorfología del sector está fuertemente influenciada por el ambiente de alta montaña. La hidrografía se relaciona con ríos de cursos rápidos, quebradas intermitentes y permanentes y zonas pantanosas asociadas a turberas, bofedales y zonas inundadas por el derretimiento de las nieves. El clima se encuentra fuertemente influenciado por el efecto que ejerce el relieve sobre el comportamiento

climático de la zona, lo cual se manifiesta en toda la región montañosa y particularmente, en el área de estudio. Las precipitaciones invernales son de tipo nival (valores de 1.500 - 2.000 mm), manteniéndose acumulación de nieve entre abril y diciembre. La vegetación está representada por tres pisos vegetacionales: matorral bajo mediterráneo andino alto, que corresponde a un matorral bajo, dominado por arbustos espinosos, matorral bajo mediterráneo andino bajo, considerados como elementos florísticos esenciales del sector alto andino del Maule (Becerra & De Rurange, 2018).

La metodología se basó en la generación de DEM de alta resolución, obtenidos de vuelos procesados de LIDAR y UAV, a través de *softwares* SIG (Sistema de Información Geográfica). Para Vuelo LIDAR se utilizó el vuelo aerofotogramétrico realizado en marzo de 2017, avión CESSNA 206 Turbo, sensor láser Toposys Harrier 56/G4 – Riegel LMS-Q560, cámara Rollei AIC P45 (distancia focal: 47 mm), con altura media del vuelo de 300 metros snmm, con resolución decimétrica. Para UAV se utilizó un vuelo aerofotogramétrico realizado en diciembre de 2018, con dron Phantom 4, con altura media del vuelo de 147 metros snmm, modelo cámara FC330 (3.61 mm), número de imágenes 538, resolución centimétrica. Mediante postproceso se obtuvo de ambos vuelos, imágenes de alta resolución de espectro visible (RGB) y nube de puntos (X, Y, Z). Los datos obtenidos se georreferenciaron en datum mundial WGS84, coordenadas UTM y Huso 19 (tabla 1).

Para la generación del DEM, tanto LIDAR y UAV, se utilizó el método de interpolación TIN (Triangulated Irregular Network) utilizando puntos de elevación, de acuerdo

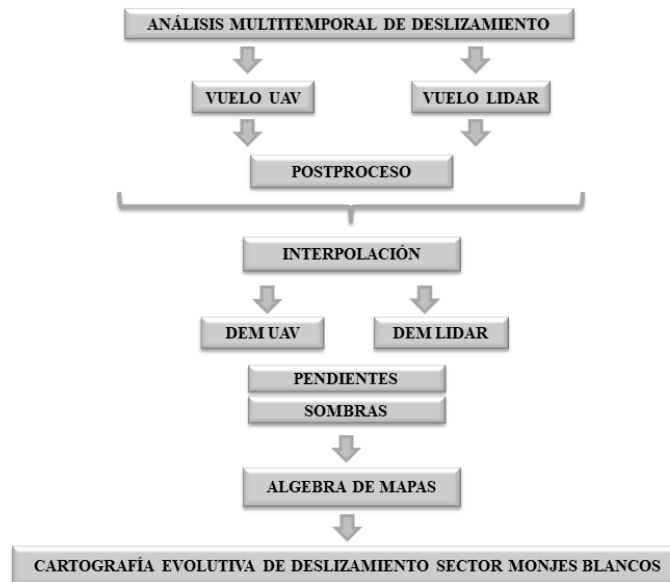


Figura 2. Esquema metodológico para cartografía evolutiva de deslizamiento sector Monjes Blancos.

Fuente: Elaboración propia (2021).

a lo establecido por Felicísimo (1994). Se generaron ráster matricial de tamaño de celda de 10 cm. Con esta matriz se originaron capas ráster de pendientes y sombras. La fotointerpretación de las ortofotos reveló las principales características geomorfológicas. El análisis de sombras (monobanda) y pendientes se realizaron para identificar dinámica en formas y procesos. Los datos obtenidos de trabajo de campo se integran a capa vectorial de deslizamiento rotacional. Se comparan los DEM mediante algebra de mapas, para identificar dinámica en las características geomorfológicas superficiales del deslizamiento en términos de cambios topográficos en la superficie y desplazamientos horizontales. Integrando los datos se generó cartografía evolutiva de deslizamiento de sector Monjes Blancos. En la figura 2 se observa el esquema metodológico.

Resultados

Mediante la aplicación de la metodología, se generaron las cartas temáticas ráster DEM, de pendientes y sombras (figura 3). La toma espacio-temporal entre cada vuelo fue de 20 meses aproximadamente. En características de los DEM, se presentan bajas alteraciones en los datos estadísticos, lo que determina cambios en las formas superficiales (tabla 1).

La cartografía ráster de sombreado (figura 4a y 4b) presenta las principales características morfológicas

Tabla 1

Características de los DEM vuelos LIDAR y UAV.

Características estadísticas	LIDAR	UAV
Área	76773,52 m2	76757,09 m2
H máxima	2146,62 hsnmm	2146,60 hsnmm
H mínima	2039,06 hsnmm	2039,01 hsnmm
Rango	107,50	107,58
Media	2100,1457	2100,1459
Desviación estándar	25,272	25,267

Fuente: Elaboración propia (2021).

del deslizamiento rotacional, principalmente escarpes, regueras, cárcavas y variadas grietas de diferente magnitud, que afectan al deslizamiento rotacional. Para cartografías ráster de pendientes, en sección cercana a la carretera, se presentan fuertes pendientes (30° o más) debido al corte del talud (figura 4c y 4d), las que establecen un rol importante en la inestabilidad de ladera. En la parte inferior izquierda existen fuertes pendientes, las que determinan arrastre de material, desde esas áreas superiores hacia sectores más bajos. Además, existen escarpes desde la base del deslizamiento con pendientes considerables. Al comparar las cartografías, tanto pendientes como

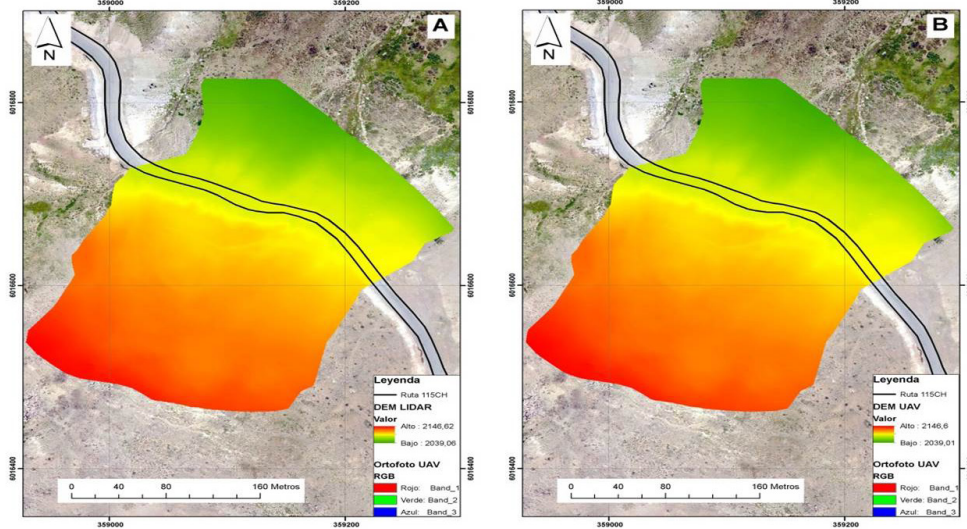


Figura 3. DEM LIDAR (A) Y DEM UAV (B) con Ortofotografía UAV del deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos. Fuente: Elaboración propia (2021).

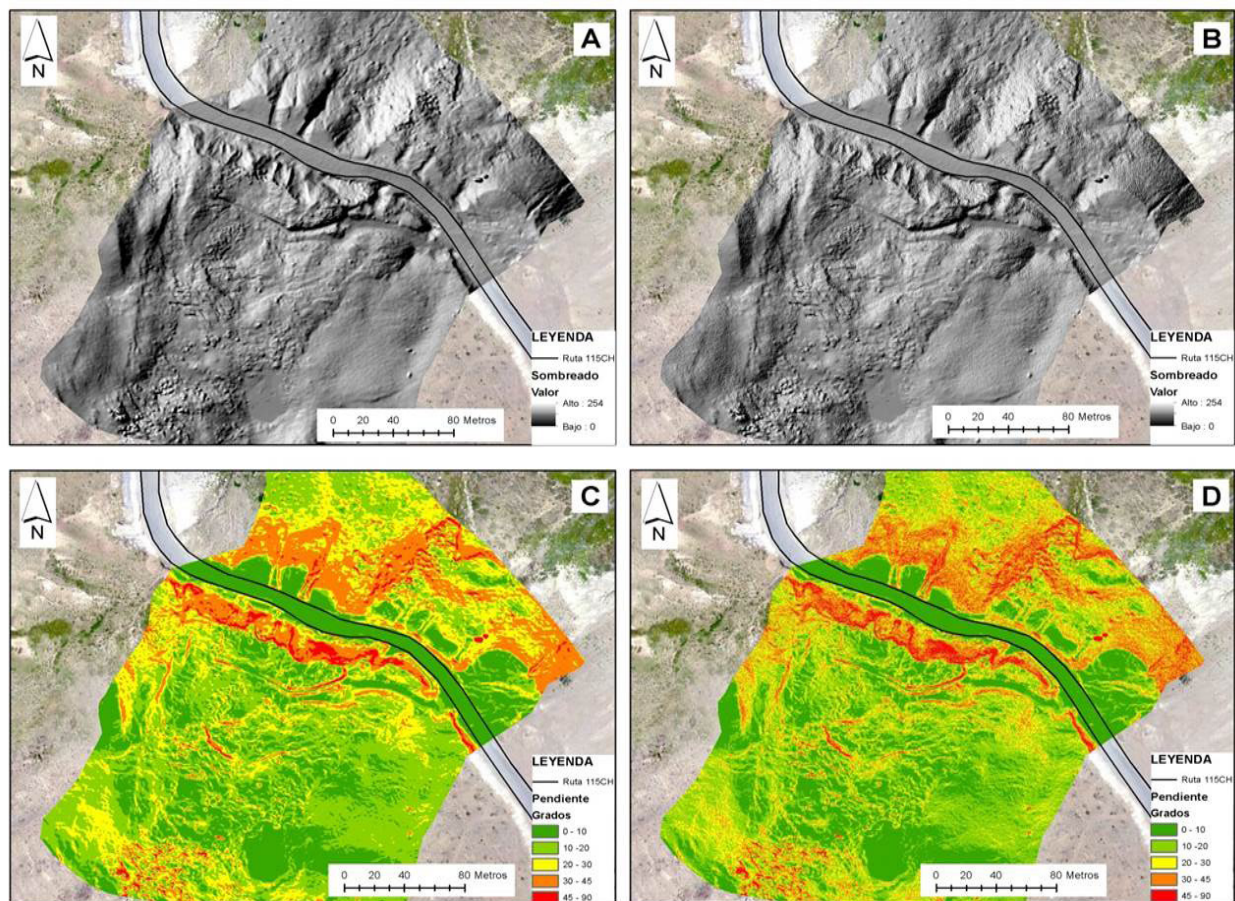


Figura 4. Sombreado DEM LIDAR (A); Sombreado UAV (B); Pendiente LIDAR (C), Pendiente UAV (D) con Ortofotografía del deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos. El análisis de sombras y pendientes demuestra dinámica en formas y procesos del movimiento superficial. Fuente: Elaboración propia (2021).

sombreado, existen diferencias las que inciden en la superficie del deslizamiento y determina cambios en dinámica de geformas.

El uso de imágenes de alta resolución, ortofotos del vuelo LIDAR (4a) y UAV (4b), permite una localización más confiable de características morfológicas de la superficie. El sombreado LIDAR ayuda a la identificación de las características morfológicas de elementos del deslizamiento (figura 4c), donde se detectaron escarpes, regueras, cárcavas y variadas grietas de diferente magnitud. La grieta más profunda es la que se encuentra en escarpe principal de talud, cercano a carretera, de 30 m de longitud. Se identifican dos regueras importantes que provienen de acuíferos permanentes que se desplazan hasta la carretera bordeando el escarpe de talud principal. En el sector inferior izquierdo, se presenta una acumulación detrítica, rocas y pequeñas rocas que determina activación intermitente de flujo detrítico. Además, se concentra una gran cantidad de grietas de diferente magnitud que deforma la superficie. Asimismo, existe una cicatriz de remoción en masa reciente y escarpes con diferentes niveles en pequeñas terrazas en suelo, lo que implica gran dinámica del proceso. En el centro existe subsidencia importante con niveles freáticos altos por cantidad considerable de pequeños acuíferos. La acción antrópica está caracterizada por contrafosos cercanos a grieta principal, que aumenta su profundidad. La vegetación y regueras en cabeceras de talud se mantienen activas (figura 5).

De fotointerpretación de ortofoto UAV en combinación con trabajo de campo (diciembre, 2018), los acuíferos semipermanentes (figura 6a) mantienen vegetación y generan las regueras principales (figura 6b), las cuales saturan el suelo limo arcilloso y material detrítico no consolidado de remociones de masa antiguas y recientes, lo que genera grietas de diferentes magnitudes (figuras 6d y 6e). Estos procesos alteran de manera significativa la superficie generando inestabilidad y desniveles de superficie, las cuales provocan deslizamientos y desprendimientos de suelo, bloques de diferente magnitud y material detrítico (figura 6f) y regueras con cárcavas activas (figura 6g). El deslizamiento en pie de talud provoca remociones en masa caóticas con desprendimientos de material y bloques rocosos; y movimientos que afectan y deforman carpeta asfáltica y obra de arte tipo cajón simple de evacuación hidráulica, que está completamente enterrado en material (figuras 6h y 6i). Para visualización de la deformación superficial del deslizamiento, se realizó modelo 3D utilizando DEM UAV (figura 7).

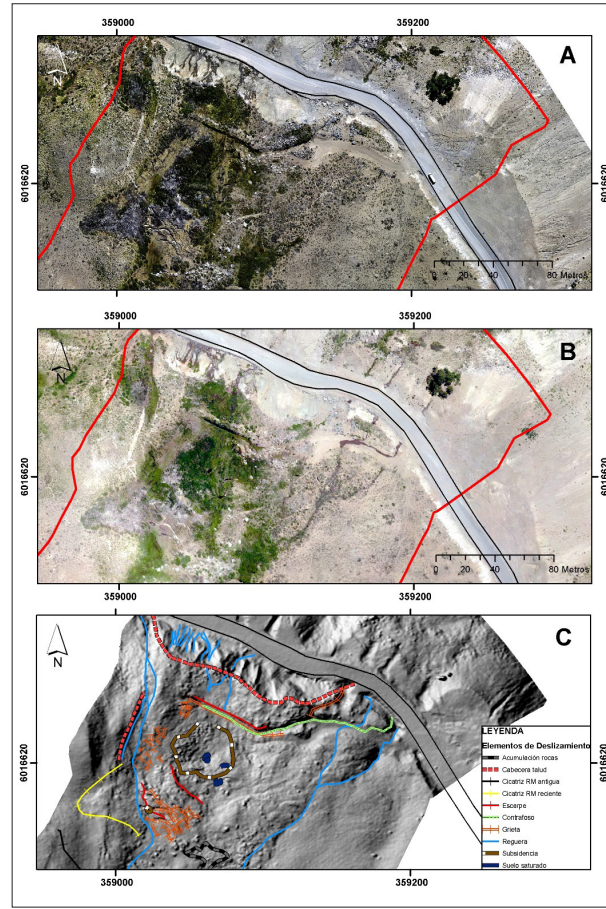


Figura 5. Ortofoto del deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos. A: Vuelo LIDAR, realizado en marzo de 2017. B: Vuelo UAV, realizado en diciembre de 2018. C: Sombreado DEM LIDAR con cartografía de geomorfología de elementos del deslizamiento que caracteriza dinámica superficial del proceso. Fuente: Elaboración propia (2021).

La diferencia superficial multitemporal entre los dos vuelos utilizados en área de estudio (figura 8a) determinó dinámicas constantes del deslizamiento. Se clasificó 5 niveles, los cuales los mayores rangos (75 - 100 cm y 100 - 145 cm) están en menor cantidad, pero su distribución está casi en toda el área de estudio. Los rangos intermedios (50 - 75 cm) están concentrados en su mayoría en cabecera de talud, que se determina en la caracterización geomorfológica (figura 8b). Los menores niveles (0 a 25 cm y 25 a 50 cm) están distribuidos en toda el área del deslizamiento, concentrados principalmente en talud y en acumulación de rocas y pequeñas rocas en sector inferior izquierdo de deslizamiento. La dirección de los movimientos se analizó en trabajo de campo, el cual presenta variadas orientaciones por lo desniveles y deformación de superficie. No fue posible obtener mayor información en los sectores de subsidencia, debido al peligro de desplazamiento por suelos altamente blandos y saturados.

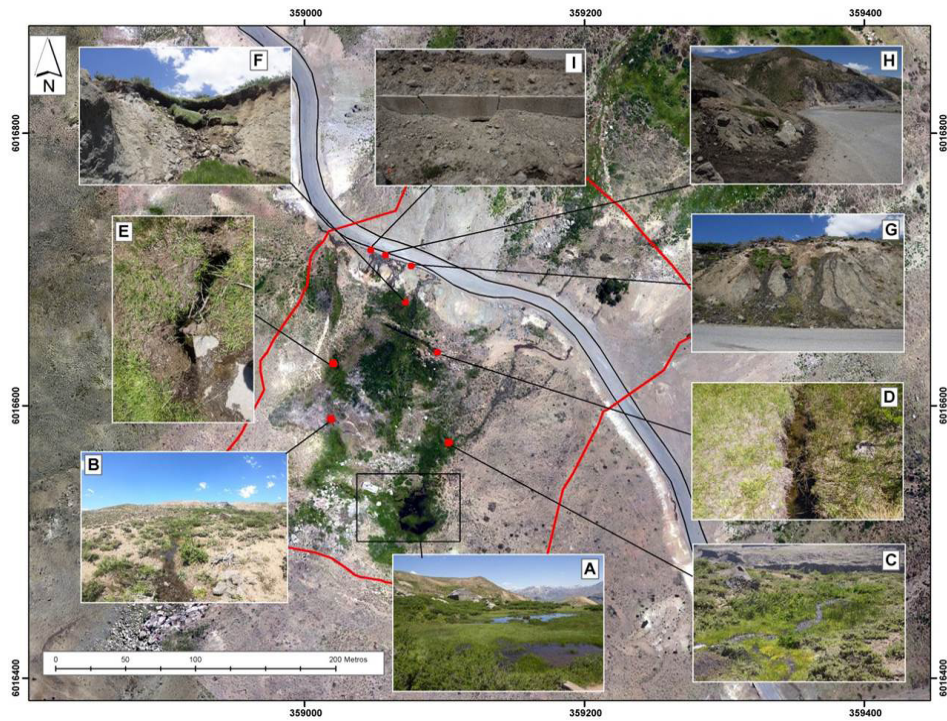


Figura 6. Ortografía de área sector Monjes Blancos, con fotografías de trabajo de campo, identificando las principales características geomorfológicas de deslizamiento rotacional y daños que provoca a infraestructura caminera. Fuente: Elaboración propia (2020).



Figura 7. Modelo 3D utilizando DEM y Ortografía UAV de área de estudio. Fuente: Elaboración propia (2021).

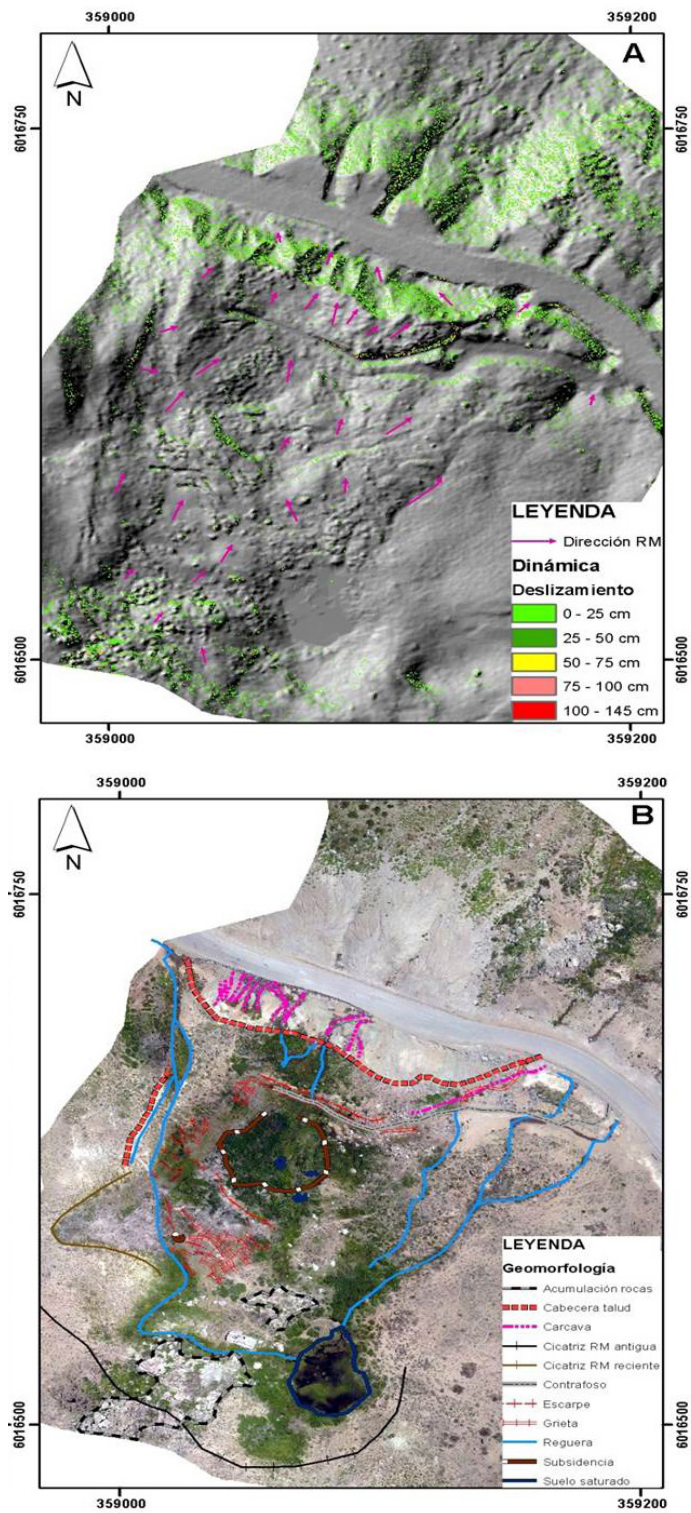


Figura 8. Cartografía evolutiva de deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos. Sombreado con diferencia superficial multitemporal (20 meses) de dinámica de deslizamiento entre modelos DEM LIDAR-UAV. (A). Caracterización geomorfológica de deslizamiento con ortofoto UAV. Fuente: Elaboración propia (2021).

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que existen movimientos superficiales importantes, en un rango de 20 meses en área de estudio, debido a las condiciones óptimas para la generación de estos procesos geodinámicos como suelos altamente saturados, fuertes pendientes, cárcavas activas, alta concentración de grietas superficiales y topografía con intervención antrópica. Se presenta una alta correlación entre las ortofotos, los DEM y trabajo de campo.

El análisis multitemporal es una de las técnicas mejor calificadas para caracterizar procesos geomorfológicos (Chuvieco, 2010; Golovko, 2018; Guzzetti et al, 2012). Becerra & De Rurange (2018) indican la complejidad de caracterizar deslizamientos rotacionales con cualquier técnica debido a su complejidad, tratamiento y análisis de investigación. El análisis multitemporal del estudio demostró ser una herramienta viable y factible para comparar dinámica superficial de deslizamientos rotacionales. Los resultados obtenidos indican que existen diferencias y están supeditadas en sectores de suelos saturados, con fuerte pendiente y gran cantidad de grietas superficiales.

Los DEM y ortofotos, generados por LIDAR, son productos de alta resolución y de alta confiabilidad. Fernández et al. (2015) indican que LIDAR pueden detectar movimientos de taludes con precisión decimétrica. Tanto Jaboyedoff et al. (2012), Schmaltz et al. (2016) y Zhao & Lu (2018) indican que LIDAR genera modelos de alta resolución digital para estudios de deslizamientos. El uso de los DEM UAV depende de variados factores como tipo de dron, altura de vuelo, tipo de cámara, viento, hora de desplazamiento, resolución, puntos de control, etc. Peppia et al. (2016) indican que los vuelos UAV pueden generar modelos aceptables para la evaluación de deslizamientos. Según Niethammer et al. (2012) los vuelos UAV pueden adquirir modelos de alta resolución para deslizamientos de tierra. Rossi et al. (2018) y Sugianto (2018) plantean que la utilización de UAV ha demostrado ser un método fácil y eficaz para el monitoreo de deslizamientos y de topografía. La resolución espacial de los DEM fue de 10 cm, por lo que la consistencia, precisión y resultados de los modelos DEM son satisfactorios. Se presentan leves alteraciones en las imágenes RGB que están determinadas en el tamaño del píxel (LIDAR 15 cm y UAV 10 cm), el cual no altera la fotointerpretación de los resultados.

Pellicani et al. (2019) plantean que sombreado de DEM es una técnica eficaz para visualizar y analizar las características morfológicas y cambios topográficos. La fotointerpretación

y análisis realizado en sombreados de alta resolución nos indica alteraciones detalladas de la superficie y cambios geomorfológicos. Además, indica dinámica subsuperficial reflejada en la profundidad de tonos, que se presentan en grietas de mayor profundidad, comprobados en trabajo de campo.

Según Cruden & Varnes (1996) los movimientos de material son por pendiente, bajo la influencia de la gravedad y Hauser (1994) indica que corresponden principalmente a procesos generados por la gravedad, lo cual provoca que una porción específica del terreno se desplace hacia cotas inferiores a la original. Becerra & De Rurange (2018) estudian tipos de remociones en masa en la ruta 115-CH, cercana a área de estudio y plantean que la pendiente es una de las variables más importantes como factor condicionante, correlacionado la ocurrencia de estos procesos geodinámicos con esta variable. Por lo tanto, la diferencia del factor pendiente es esencial para determinar geodinámicas superficiales para análisis multitemporal del deslizamiento.

La diferencia de los DEM, representadas en cartografía evolutiva, muestra los movimientos superficiales durante un tiempo determinado en área de estudio. Esta información es importante para caracterizar los movimientos de ladera, con el fin de pronosticar el comportamiento de las laderas y taludes (Fernández et al., 2015). Guzzetti et al. (2012) indican que la producción de mapas de deslizamientos de tierra estacionales y multitemporales requiere un tiempo considerable y recursos. El periodo establecido fue de 20 meses entre los dos vuelos, que no concuerdan en fechas establecidas y periodos estacionales. Idealmente se podrían realizar campañas después de la temporada invernal para saber cuánto afecta la dinámica superficial el derretimiento de las nieves en cada año y otra campaña en verano, cuando el factor nival-pluvial no afecta directamente el área de estudio. Cualquier estudio multitemporal, al no presentar dos DEM relativamente parecidos en resolución espacial y espectral, no es posible realizar caracterización evolutiva detallada y precisa.

Conclusiones

El estudio permite realizar un primer análisis multitemporal de deslizamiento rotacional en área de estudio utilizando los DEM de alta resolución y de diferentes plataformas (LIDAR y UAV). Los resultados obtenidos establecen movimientos superficiales de deslizamientos mayores a 1 m, en un rango de 20 meses. Las características geomorfológicas, geológicas y antrópicas del área de estudio, generan condiciones que favorecen el desarrollo

de estos procesos morfogénéticos como deslizamientos del tipo rotacional.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar la eficacia de combinar los métodos UAV – LIDAR para evaluar características geomorfológicas y proceso evolutivo de la inestabilidad. Además, se obtiene un grado de conocimiento para la gestión territorial de esta ruta internacional de Chile central.

Los DEM y las ortofotos son efectivas y coherentes para la correcta fotointerpretación de factores dinámicos superficiales y modelamiento ráster de álgebra de mapas.

El análisis y el seguimiento del comportamiento evolutivo del deslizamiento rotacional, podría complementarse integrando las técnicas de teledetección, como la interferometría radar satelital (InSAR), para una caracterización detallada de las tasas de desplazamiento espacial y de mayor rango temporal.

Los deslizamientos rotacionales son movimientos subsuperficiales complejos de analizar, por lo que se requiere mayores monitoreos multitemporales, análisis de laboratorio, estudios topoclimáticos y generación topografía de campo, para determinar la profundidad de la falla del material y la influencia del nivel de las aguas subterráneas que se relacionan a la pérdida de resistencia del material. La metodología demostró ser una herramienta viable y factible para comparar dinámica superficial del proceso geodinámico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Dirección de Planeamiento, Dirección de Vialidad y Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (MOP), Región del Maule, por trabajo de campo e infraestructura y Mesa de trabajo de riesgos naturales MOP.

Referencias

- Becerra, C. (2006). *Análisis de riesgo natural por remociones en masa, carretera El Cobre, División El Teniente*. Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).
- Becerra, C. (2013). Análisis de Susceptibilidad a procesos de Remociones en masa mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección en ruta internacional Paso Pehuenche, Sector Laguna del Maule [Tesis para optar al título de Magister en Gestión Ambiental Territorial, Centro Geomática, Universidad de Talca, Chile]. http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/9714/2/becerra_baeza.pdf
- Becerra, C., & De Rurange, J. (2018). Modelo de susceptibilidad a procesos de remociones en masa en rutas cordilleranas de Chile Central: Ruta 115 CH, Paso Pehuenche, Región del Maule. *Investigaciones Geográficas*, 55, 89-110. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2018.50799>
- Chuvieco, E. (Ed.). (2010). *Teledetección Ambiental*. Editorial Digital Reasons.
- Cruden, D. M. & Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. En A.K. Turner & R.Schuster (Eds.), *Landslides, investigation and mitigation*, Special report 247 (pp. 36-75). Transportation Research Board.
- Derron, M. H., & Jaboyedoff, M. (2010). Preface "LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization". *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9), 1877-1879. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1877-2010>
- Dirección de Planeamiento. (DIRPLAN). (2014). *Remociones en masa en sectores específicos, Ruta 115-CH, Paso Pehuenche*. Informe Técnico.
- Doshida S. (2021). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra secundarios para la actividad de rescate utilizando datos LiDAR UAV. En F. Guzzetti, S. Mihalić Arbanas, P. Reichenbach, K. Sassa, P.T. Bobrowsky, & K. Takara (Eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. WLF 2020. Contribución de ICL a la reducción del riesgo de desastres por deslizamientos de tierra. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60227-7_31
- Dragičević, S., Lai, T., & Balram, S. (2015). GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat international*, 45, 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031>
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales*. <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>

- Fernández, F., Notti, D., Galve, J. P., Pérez, J. V., Azañón, J. M., Mateos, R. M., & Gómez-López, J. M. (2015). *Técnicas remotas para el análisis multiescala y multitemporal de fenómenos superficiales. Una visión global del Cuaternario: el hombre como condicionante de procesos geológicos*.
- Golovko, D. (2018). *Spatio-temporal analysis of landslide hazard in Southern Kyrgyzstan using GIS and remote sensing data*. PhD Thesis, Technische Universität, Berlin.
- Golovko, D., Roessner, S., Behling, R., Wetzel, H. U., & Kleinschmit, B. (2017). Evaluation of remote-sensing-based landslide inventories for hazard assessment in Southern Kyrgyzstan. *Remote Sensing*, 9(9), 943. <https://doi.org/10.3390/rs9090943>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hamza, T., & Raghuvanshi, T. K. (2017). GIS based landslide hazard evaluation and zonation—a case from Jeldu District, central Ethiopia. *Journal of King Saud University-Science*, 29(2), 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2016.05.002>
- Hauser, A. (1994). Remociones en masa en Chile (mass wasting in Chile). *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 31(3), 159. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)90783-8](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)90783-8)
- INTRAT. (2014). Estudio de sendas de avalanchas, flujos detríticos y otros, en ruta 115-CH, sector La mina-Límite fronterizo. Tramo DM 100 – DM 161.500, Región del Maule.
- Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). *Mapping and Monitoring of Landslides Using LIDAR. Natural Hazards: Earthquakes, Volcanoes, and Landslides*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural hazards*, 61(1), 5-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>
- Jaukovic, I. & Hunter, A. (2016). *Unmanned Aerial Vehicles: A new tool for landslide risk assessment* [Sesión de conferencia]. 11th ANZ Young Geotechnical Professionals Conference, At Queenstown, New Zealand.
- Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- Pachay-Alonzo, L. E., García-Vinces, L. J., & Zevallos-Loor, M. G. (2021). Determinación de zonas susceptibles ante movimientos en masa utilizando metodología INSAR, Análisis Morfométrico y el Índice de Estabilidad (Mohr-Coulomb). Caso: Campus de la Universidad Técnica de Manabí (Portoviejo, Manabí, Ecuador). *Polo del Conocimiento*, 6(56), 1776-1798. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926825>
- Pellicani, R.; Argentiero, I.; Manzari, P.; Spilotro, G.; Marzo, C.; Ermini, R.; Apollonio, C. (2019). UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy). *Geociencias*, 9(6), 248. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060248>
- Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. (2016). *Accuracy assessment of a UAV-based landslide monitoring system*. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B5, 895-902. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-895-2016>
- Razak, K. A., Straatsma, M. W., Van Westen, C. J., Malet, J. P., & De Jong, S. M. (2011). Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. *Geomorphology*, 126(1-2), 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.11.003>
- Rossi, G., Tanteri, L., Tofani, V., Vannocci, P.; Moretti, S.; Casagli, N. (2018). Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization. *Landslides* 15, 1045–1052. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0978-0>

- Sabokbar, F., Shadman, M., & Tazik, E. (2014). Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis. *Geomorphology*, 226, 2014, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.026>
- Schmaltz, E., Steger, S., Bell, R., Glade, T., van Beek, R., Bogaard, T., ... & Pfeifer, N. (2016). Evaluation of shallow landslides in the Northern Walgau (Austria) using morphometric analysis techniques. *Procedia Earth and Planetary Science*, 16, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.10.019>
- Sugianto, A. (2018). UAV and site investigation for evaluation of landslide hazard: a case study in Cipularang Km. 92 Toll Road. *MATEC Web of Conferences*, 229, 04015. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822904015>
- Tarolli, P., Calligaro, S., Cazorzi, F., & Fontana, G. D. (2013). Recognition of surface flow processes influenced by roads and trails in mountain areas using high-resolution topography. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 176-197. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20134610>
- Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides—A review. *Remote Sensing*, 10(2), 279. <https://doi.org/10.3390/rs10020279>
- Zhao, F., Mallorqui, J., Iglesias, R., Gili, J., Corominas, J. (2018). Monitoreo de deslizamientos de tierra mediante interferometría SAR multitemporal con métodos avanzados de identificación de dispersores persistentes e imágenes TerraSAR-X de resolución espacial súper alta. *Remote Sensing*, 10(6), 921. <https://doi.org/10.3390/rs10060921>