

Trópico de Cáncer

Mar Caribe

OCEANO
ATLANTICO

REVISTA **cartográfica**

Número 108 (2024)



INSTITUTO PANAMERICANO DE
GEOGRAFÍA E HISTORIA

**AUTORIDADES DEL
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
2022-2025**

PRESIDENTE	Dra. Patricia Solís (Estados Unidos)
VICEPRESIDENTE	Lic. Rocsanda Pahola Méndez Mata (Guatemala)

SECRETARIO GENERAL
Mtro. Antonio Campuzano Rosales
México

COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA

(Costa Rica)
Presidente:
MSc. Max Lobo Hernández

Vicepresidente:
MSc. Christian Núñez Solís

COMISIÓN DE GEOGRAFÍA

(Chile)
Presidente:
Dr. Hermann Manríquez Tirado

Vicepresidente:
Dr. Rodrigo Barriga Vargas

COMISIÓN DE HISTORIA

(República Dominicana)
Presidente:
Dr. Filiberto Cruz Sánchez

Vicepresidente:
Dra. Reina Cristina Rosario Fernández

COMISIÓN DE GEOFÍSICA

(Ecuador)
Presidente:
Dr. Mario Calixto Ruiz Romero

Vicepresidente:
Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA

Argentina	Agrim. Sergio Rubén Cimbaro
Belice	
Bolivia	Tcnl. DAEN. Jaime R. Paz Soldán Pinto
Brasil	
Chile	Dr. Carlos Mena Frau
Colombia	Ing. Iván Alberto Lizarazo Salcedo
Costa Rica	MSc. Marta Eugenia Aguilar Varela
Ecuador	Tcrn. IGEO Dehivi Rodolfo Salgado Proaño
El Salvador	Lic. Edwin Denis Hernandez
Estados Unidos	Eric van Praag
Guatemala	Ing. Marcos Osmundo Sutuc Carrillo
Haití	Prof. David Telcy
Honduras	Dilma Doris Ortega
México	Ing. Francisco Javier Medina
Nicaragua	Ing. Noel Ramírez
Panamá	Félix Sánchez
Paraguay	Cnel. SG Ing. Arturo Aquino
Perú	Gral. Brig. Fernando Portillo Romero
Rep. Dominicana	Agrim. Rafael Santiago Hernández Batista
Uruguay	Dr. Carlos López
Venezuela	

REVISTA **cartográfica**

número 108 • 2024



INSTITUTO PANAMERICANO DE
GEOGRAFÍA E HISTORIA

REVISTA cartográfica

Publicación anual fundada en 1952. Desde 2016 publicación semestral
Indizada en Latindex, SciELO, DOAJ y Scopus
Disponible en: PERIÓDICA, Cengage Learning, Ebsco y ProQuest
<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Indexada>

La preparación de la *Revista Cartográfica* está a cargo de la editora
Dra. María Ester Gonzalez
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción
Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile
Correo electrónico: editor_revista_cartografica@ipgh.org
www.revistasipgh.org/index.php/rcar

Comité Editorial

Dr. Adolfo Quesada-Román, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)
Dr. Bismarck Jigena Antelo, Universidad de Cadiz (España)
Dr. Carlos Granell Canut, Universidad Jaume I de Castellón (España)
Dr. Carlos López Vázquez, Universidad ORT Uruguay (Uruguay)
Dra. Daniela Ballari, Universidad de Azuay (Ecuador)
Dra. Daniela Moctezuma, CentroGEO (México)
Dr. Francisco Javier Ariza López, Universidad de Jaén (España)
Dr. Francisco de la Barrera, Universidad de Concepción (Chile)
Dr. Jean Francois Mas, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Dr. Joep Crompvoets, KU Leuven Public Governance Institute (Bélgica)
Dr. Miguel Ángel Bernabé Poveda, Universidad Nacional de Catamarca (Argentina)
Dra. Montserrat Gómez Delgado, Universidad de Alcalá (España)
Dr. Sandra Staller Vázquez, Universidad Politécnica de Madrid (España)
Dr. Theofilos Toulkeridis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador)

Canje, venta y distribución, escribir a:
Instituto Panamericano de Geografía e Historia
Secretaría General
Apartado Postal 18879, C.P. 11870 Ciudad de México, México
Teléfonos: (52-55)5277-5888, 5277-5791 y 5515-1910
Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org | <https://revistasipgh.org/> | <http://www.ipgh.org>

Las opiniones expresadas en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la *Revista Cartográfica*, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores. Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia son de la Dirección de la Revista.

En cumplimiento con la resolución IX de la XIV Reunión del Consejo Directivo del IPGH (Buenos Aires, Argentina, julio, 1972.), se advierte que: "Los límites que aparecen en los mapas de esta publicación no están, en algunos casos, finalmente determinados y su reproducción no significa aprobación oficial o aceptación por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)".

Diseño de portada / Cover design: Santiago Mora Van Cauwelaert. <https://tallersiranda.com>

Fuente de la imagen / Source: Reinterpretación de las cuencas tropicales de América: Amazonas y Caribe. Elaboración a partir de la base de datos de *Global Forest Watch*.

© 2024 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Revista Cartográfica, núm. 108, 2024, publicación semestral editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Tels. (52-55)5277-5888, 5277-5791, 5515-1910, www.ipgh.org | <https://revistasipgh.org/> | publicaciones@ipgh.org | Editora: María Ester Gonzalez, correo electrónico: editor_revista_cartografica@ipgh.org | Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2015-090212390600-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor | ISSN (en línea) 2663-3981 | Licitud de título y contenido: en trámite | Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Comunicación Social del IPGH, Ex arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México.

Se autoriza cualquier reproducción parcial o total de los contenidos o imágenes de la publicación, incluido el almacenamiento electrónico, siempre y cuando sea para usos estrictamente académicos y sin fines de lucro, citando la fuente sin alteración del contenido y otorgando los créditos autorales.

REVISTA cartográfica

número 108

2024

CONTENIDO

Artículos

A relação entre o ambiente urbano e o bem-estar: Análise em Lisboa, Portugal, utilizando redes sociais

The relation between urban environment and well-being: Analysis in Lisbon, Portugal, using social networks

Iuria Betco
Jorge Rocha

7

Mapeo espacial-temporal de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina, de 2014 a 2021

Spatial-temporal mapping of snow cover in the Aconquija mountain range, Tucumán and Catamarca provinces, Argentina, from 2014 to 2021

Mario Arnaldo Toledo
Gloria Patricia Ibañez Palacios
Ana Lía Ahumada

29

Normalización de base de datos de remociones en masa en la Región de Aysén, Chile

Standardization of the Landslides database in the Aysén Region, Chile

Constanza Jorquera-Flores
María Ester Gonzalez-Campos

53

Airborne GNSS reflectometry for coastal monitoring of sea state

Monitoreo del estado del mar en zonas costeras usando GNSS reflectometría

Mario Moreno

77

Examinando la relación de la profundidad óptica de aerosoles derivada de imágenes MODIS con contagios por COVID-19 en Santiago, Chile

Examining the relationship of the MODIS-derived optical aerosol thickness with COVID-19 infections in Santiago, Chile

Marco A. Peña

Manuel Fuenzalida

99

Comparación entre los métodos Mora-Vahrson y Lógica difusa en la susceptibilidad a movimientos de tierra en el cantón Morona-Amazonía ecuatoriana

Comparison between the Mora-Vahrson and Fuzzy Logic methods to landslides in the Morona canton-Ecuadorian Amazon

Iván Fernando Palacios Orejuela

117

Reseñas

Métodos de interpolación espacial para el mapeo de la riqueza de especies usando R.

José Ignacio Sánchez Carbonell

139

Historia de la Cartografía. La evolución de los mapas. El mundo medieval, de Bizancio al Renacimiento.

Norberto Jorge Onesti

143

Portada número 108. Las cuencas tropicales de América: Amazonas y Caribe

Santiago Mora Van Cauwelaert

145

Definición de la Revista

121

Normas para Autores

122

ARTÍCULOS

A relação entre o ambiente urbano e o bem-estar: Análise em Lisboa, Portugal, utilizando redes sociais

The relation between urban environment and well-being:
Analysis in Lisbon, Portugal, using social networks

Iuria Betco¹

Jorge Rocha²

Recebido 7 de julho de 2023; aceito 10 de novembro de 2023

RESUMO

Os problemas de saúde mental têm vindo a aumentar em todo o mundo, o que poderá estar associado ao crescimento da população urbana e ao estilo de vida a ela associado. O reconhecimento de que os diversos aspetos do ambiente urbano podem afetar a saúde mental dos indivíduos tem vindo a aumentar, uma vez que, estes são responsáveis por facilitar ou inibir comportamentos e estilos de vida que impactam o sentimento. Neste contexto é importante compreender o potencial impacto do ambiente urbano da cidade de Lisboa. Para tal recorreu-se à análise de sentimentos, utilizado um léxico do NRC Sentiment and Emotion, a partir de dados da rede social X, possibilitando a identificação dos locais em que tanto o sentimento positivo como negativo prevalecem. De seguida fez-se uso de um modelo de machine learning (ML) associado a um modelo-agnóstico de modo a aumentar a compreensão dos fatores do ambiente urbano que podem explicar o sentimento. Foram testados 4 modelos de ML, Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Neural Network (NN), o K-Nearest Neighbour (KNN) e um modelo linear para comparação (Generalized Linear Model-GLM). Os modelos agnósticos aplicados, o Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME) e o SHapley Additive exPlanation (SHAP), desempenharam um papel fundamental neste estudo. Respondendo à questão

¹ Centro de Estudos Geográficos; Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Portugal, e-mail: betcoiuria@edu.ulisboa.pt
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8714-686X>

² Laboratório Associado Terra, Portugal, e-mail: jorge.rocha@edu.ulisboa.pt
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7228-6330>

de partida, as variáveis explicativas que mais se relacionam com o sentimento são a distância a equipamentos fitness, a distância aos espaços verdes, a popularidade dos locais (estimada através da rede social Flickr) e a distância à rede ciclável.

Palavras-chave: bem-estar, redes sociais, análise de sentimento, morfologia urbana, machine learning.

ABSTRACT

Mental health problems have been rising worldwide, possibly associated with urban population growth and related lifestyles. The recognition that the various aspects of the urban environment can affect the mental health of individuals has been increasing since they are responsible for facilitating or inhibiting behaviors and lifestyles that impact the feeling. In this context, it is essential to understand the potential impact of the urban environment of the city of Lisbon. To do so, we resorted to sentiment analysis, using a lexicon from the NRC Sentiment and Emotion, based on data from the social network X, enabling the identification of places where both positive and negative sentiment prevail. Next, an machine learning (ML) model associated with an agnostic model was used to increase the understanding of the factors of the urban environment that can explain the sentiment. Four ML models were tested, Random Forest (RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Neural Network (NN), K-Nearest Neighbour (KNN), and a linear model for comparison (Generalized Linear Model - GLM). The agnostic models applied, the Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME) and the Shapley Additive exPlanation (SHAP), played a crucial role in this study. Answering the starting question, the explanatory variables most related to sentiment are distance to fitness facilities, distance to green spaces, the popularity of locations (estimated through the social network Flickr), and distance to the cycling network.

Key words: well-being; social networks; sentiment analysis; urban morphology; machine learning.

RESUMEN

Los problemas de salud mental han ido en aumento en todo el mundo, lo que puede estar relacionado con el crecimiento de la población urbana y el estilo de vida asociado a ella. Cada vez se reconoce más que los diversos aspectos del entorno urbano pueden afectar a la salud mental de las personas, ya que son responsables de facilitar o inhibir comportamientos y estilos de vida que repercuten en los sentimientos. En este contexto, es importante comprender el impacto potencial del entorno urbano de Lisboa. Para ello, se utilizó el análisis de sentimiento, utilizando un léxico del NRC Sentiment and Emotion, basado en datos de la red social X, lo que permitió identificar los lugares en los que prevalece tanto el sentimiento positivo como el negativo. A continuación, se combinó un modelo de aprendizaje automático (ML) con un modelo agnóstico con el fin de aumentar la comprensión de los factores del entorno urbano que pueden explicar el sentimiento. Se probaron cuatro modelos ML: Random Forest

(RF), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Neural Network (NN), K-Nearest Neighbour (KNN) y un modelo lineal de comparación (Generalized Linear Model - GLM). Los modelos agnósticos aplicados, el Local Interpretable Model-Agnostic Explanations (LIME) y el SHapley Additive exPlanation (SHAP), desempeñaron un papel fundamental en este estudio. En respuesta a la pregunta de partida, las variables explicativas más relacionadas con el sentimiento son la distancia a los gimnasios, la distancia a las zonas verdes, la popularidad de los lugares (estimada mediante la red social Flickr) y la distancia a la red ciclista.

Palabras clave: *bienestar, redes sociales, análisis de sentimientos, morfología urbana, aprendizaje automático.*

1. Introdução

Atualmente, mais de 50% da população em todo o mundo vive em áreas urbanas, é expectável que este número aumente para cerca de 70% em 2050 (United Nations, 2015). À medida que o mundo se torna cada vez mais urbanizado, planeadores e profissionais de saúde vão ficando preocupados com os impactes dos ambientes urbanos no bem-estar mental dos residentes. Apesar de a qualidade de vida em geral ter melhorado em todo o mundo, os problemas de saúde mental aumentaram, principalmente nos países industrialmente desenvolvidos (Hidaka, 2012), devido ao estilo de vida urbano (Reeves et al., 2011).

As evidências empíricas demostraram que os fatores ambientais podem impactar positivamente e/ou negativamente o bem-estar mental, mas existem poucas diretrizes sobre como aumentar ou evitar certos ambientes (Hajrasoulih et al., 2018). Dado que a forma e a morfologia da cidade podem ser determinantes, é fundamental determinar quais os fatores que podem contribuir para alcançar o bem-estar, de modo a projetar a cidade nesse sentido. A questão adicional é, em que medida cada fator é quantitativamente influente, e qual desses critérios terá a maior prioridade e importância (Fathi et al., 2020).

A transformação do espaço urbano simultaneamente com a digitalização da sociedade, veio possibilitar o conhecimento acerca do quanto o bem-estar individual é influenciado pelo ambiente construído envolvente (Romice et al., 2016). Isto é possível, acedendo ao conteúdo gerado pelos internautas nas redes sociais, que fornece informações sobre os utilizadores e o seu ambiente, através de preferências, opiniões e interações (Aloufi et al., 2017).

As pessoas expressam diariamente o seu sentimento através de textos e imagens diretamente nas redes sociais (e.g., Facebook, Twitter e Flickr) (Wang et al., 2014), esta abundância de dados torna desafiante a análise e obtenção de insights, levando a um aumento da procura pela análise de sentimento (Afriliana et al., 2022).

2. Bem-estar

O conceito de bem-estar é ambíguo, carece de uma definição universalmente aceite e apresenta numerosas, e por vezes divergentes interpretações (McGillivray & Clarke, 2006). Pode ser visto como tendo duas dimensões:

objetivo e subjetivo. O bem-estar objetivo é uma medida de aproximação baseada nas necessidades e direitos humanos básicos, incluindo aspetos como a alimentação adequada, a saúde física, a educação e a segurança. O bem-estar subjetivo inclui aspetos como a satisfação com a vida, emoções positivas, e se a vida é significativa (Hajrasoulih *et al.*, 2018), é medido perguntando diretamente às pessoas como pensam e se sentem sobre o seu próprio bem-estar (Hajrasoulih *et al.*, 2018). Segundo Diener (1984). Uma pessoa com elevado bem-estar subjetivo apresenta níveis altos de satisfação com a vida, elevados sentimentos positivos e baixos sentimentos negativos (E. Diener, 1984).

O bem-estar subjetivo caracteriza-se por ser uma dimensão positiva da saúde. Sendo, simultaneamente, um conceito complexo (Galinha & Ribeiro, 2005), porque inclui três tipos de bem-estar interligados: a) hedónico (Deci & Ryan, 2008), b) psicológico (Huppert, 2009) e c) social (Keyes, 1998) (o bem-estar psicológico e social são dois aspetos do bem-estar eudemónico) (Hajrasoulih *et al.*, 2018). O bem-estar psicológico e social (eudemónico) relaciona-se com boas experiências para a pessoa, e tende a ser associado a efeitos a longo prazo e duradouros e o bem-estar hedónico é o mais primitivo e a curto prazo, resultante do prazer e da prevenção da dor (Hajrasoulih *et al.*, 2018).

2.1 Fatores determinantes para o bem-estar

O reconhecimento dos aspetos sociais, físicos e culturais, que podem afetar a saúde mental do indivíduo tem vindo a aumentar, uma vez que, estes são responsáveis por facilitar ou inibir comportamentos e estilos de vida que impactam o bem-estar (Santana *et al.*, 2007).

A forma urbana tem impacte nas três dimensões do bem-estar subjetivo, por exemplo, uma curta caminhada num parque local proporciona um prazer imediato (hedónico), transformar este comportamento numa rotina diária restaura a mente da fadiga mental (psicológica) e proporciona uma grande oportunidade de interação social com os vizinhos (social) (Hajrasoulih *et al.*, 2018). É possível sugerir estratégias de planeamento e design que promovam o bem-estar hedónico, psicológico e social através de intervenções na forma urbana (Hajrasoulih *et al.*, 2018).

A literatura revela a existência de lacunas significativas, ilustradas na Figura 1. Em alguns casos, estas lacunas resultam de informações contraditórias (e.g., a relação entre o modo de transporte e o bem-estar hedónico), enquanto noutros casos resulta de estudos que não conseguiram encontrar relações significativas (e.g., a relação entre o tipo de habitação e o bem-estar psicológico). Noutros casos, a publicação ou estudo não apresenta quaisquer dados (Hajrasoulih *et al.*, 2018).

O autor Hajrasoulih *et al.*, (2018) desenvolveu ainda um esquema conceptual, no qual apresenta o impacte da forma urbana no bem-estar mental. Tendo sido desenvolvido com o propósito de orientar os estudos de forma organizada e preencher as lacunas existentes. O esquema foi inspirado no quadro de sustentabilidade para o design urbano de Larco (2015), adaptado de forma a abordar a natureza complexa e multidimensional dos impactes no bem-estar mental (Hajrasoulih *et al.*, 2018). Szombathely *et al.* (2017) também

desenvolveram um modelo conceptual, no qual relacionam os determinantes de quatro sectores diferentes (indivíduo, sociedade, stressores e morfologia) e associam-nos ao bem-estar urbano relacionado com a saúde (UrbWellth) (Von Szombathely *et al.*, 2017).

		Bem-estar mental		
		Bem-estar hedónico	Bem-estar psicológico	Bem-estar social
Forma urbana	Vegetação	+ Ver e interagir com espaços verdes especialmente jardins ou áreas de paisagem	+ Proximidade a espaços verdes (todas as escalas)	+ Proximidade a espaços verdes >< Abundância de árvores
	Densidade	- Densidade superior	- Densidade superior	><
	Uso do solo		+ Acesso a instalações	+ Espaços comunitários, praças, espaços públicos Uso misto (evidência de conflito)
	Casa		><	+ Idade da habitação e diversidade
	Transporte	><	+ Curto trajeto de viagem	+ Andar mais a pé
	Configuração espacial	+ Vizinhança com design tradicional	+ Elementos fundamentais para o espaço público abertos + Ambiente atrativo + Ambiente aberto + Arquitetura variada - Altura do edificado	- Colinas íngremes + Configuração semifechada + Mobiliário urbano
	Stressores	- Poluição do ar + Ruído >< Cores	- Proximidade às fontes de ruído (e.g., aeroporto) e indústrias perigosas	

Figura 1. Relação entre forma urbana e bem-estar mental; + correlação positiva, - correlação negativa, >< provas contraditórias (Fonte: Hajrasoulih *et al.*, 2018).

3. Área de estudo

Para este estudo selecionou-se como área de estudo o município de Lisboa, que se subdivide em 24 freguesias representadas na Figura 2. A cidade de Lisboa,



Figura 2. Freguesias do município de Lisboa.

capital de Portugal, situa-se junto ao estuário do rio Tejo e apresenta uma área de 86,83 km². Em termos populacionais, alberga 509 515 habitantes (INE, 2021), apresentando uma densidade populacional de 5 868 habitantes por km². A ampla gama de atividades escolhidas pelo turista ao visitar Lisboa é um fator de vantagem competitiva, destacando-se a visita a monumentos e museus, os passeios a pé, a gastronomia e os vinhos, e ainda a vida noturna (Observatório Turismo de Lisboa, 2019).

4. Metodologia

Foi desenvolvido um modelo para compreender os múltiplos fatores que podem ajudar a explicar o sentimento, e como tal o bem-estar subjetivo hedónico em ambientes urbanos. Este modelo inclui quatro fases principais: 1) recolha e pré-tratamento de dados espaciais, 2) diagnóstico da multicolinearidade de dados, 3) construção do modelo ML e 4) aplicação de uma abordagem modelo-agnóstica para a interpretação. O processo de trabalho encontra-se ilustrado na Figura 3.

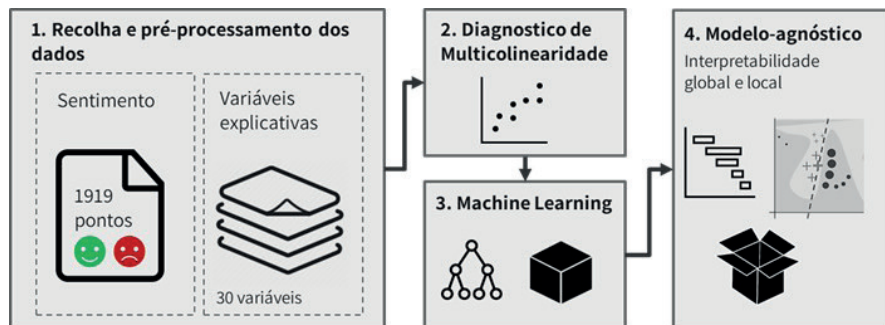


Figura 3. Metodologia do processo de modelação.

4.1 Recolha e pré-processamento dos dados

4.1.1 Variável dependente

Os dados do Twitter permitem uma abordagem mais económica e dinâmica do que o usual inquérito e, sobretudo, a capacidade de adicionar uma dimensão geométrica objetiva ao estudo subjetivo (Cao *et al.*, 2018). Além da informação espacial, o conteúdo dos tweets também fornece informações sobre as opiniões e sentimentos dos utilizadores, permitindo elaborar uma análise do sentimento (Balahur *et al.*, 2014). Portanto, o bem-estar subjetivo foi determinado a partir do sentimento expresso pelos utilizadores na rede social Twitter (atual X), que constituirá variável dependente no modelo ML preditivo.

4.1.1.1 *Análise de sentimento*

Esta fase da metodologia tem como objetivo identificar automaticamente os sentimentos expressos nos comentários publicados pelos utilizadores da rede social X, com recurso a um léxico de sentimentos, isto é, uma lista de palavras manualmente rotuladas com polaridade positiva e negativa. Que, deste modo, veio permitir calcular a pontuação geral do sentimento para cada publicação.

Optou-se pela utilização do léxico *NRC Word-Emotion Association Lexicon (EmoLex)*, porque dispõe de uma lista de palavras em inglês associadas a 8 emoções básicas (raiva, medo, antecipação, confiança, surpresa, tristeza, alegria e repulsa) e 2 sentimentos (negativo e positivo). Dispõe ainda de versões em mais de cem idiomas (Mohammad & Turney, 2015).

Embora, já existam trabalhos que se concentrem em palavras que ‘denotam’ emoção, o EmoLex desenvolvido por Saif Mohammad e Peter Turney (2013) impactou por incluir o maior conjunto de palavras associadas ou que conotam com uma emoção, sendo por isso o maior léxico deste tipo existente atualmente (Mohammad & Turney, 2015). A vantagem deste tipo de método é não precisar de dados de treino (como é o caso do método de machine-learning supervisionado) (Shayaa *et al.*, 2018).

Dos tuites (*tweets*) publicados na cidade de Lisboa selecionaram-se apenas os georreferenciados e públicos, em que o utilizador pôde optar pelo fornecimento das coordenadas exatas. Assim, inicialmente dispunha-se de um conjunto de 16791 dados pontuais georreferenciados, correspondentes a comentários no Twitter publicados na cidade de Lisboa durante o ano de 2019. Destes selecionaram-se apenas os comentários publicados durante o dia, entre as 9h e 19h, ficando-se com 9446, dado ser as horas que correspondem a uma maior utilização do espaço urbano. Estes comentários foram posteriormente submetidos à análise de sentimento e classificação de emoções com recurso ao *EmoLex* no idioma português.

De modo a ser possível introduzir os dados referentes ao sentimento no modelo preditivo, foi necessário transformar a variável de resposta de um sistema de numeração natural para um sistema binário (0 ou 1). Como tal, classificou-se a pontuação resultante das palavras (portuguesas) associadas ao sentimento positivo (1) e negativo (0). Uma vez que a maioria dos comentários apresentava valores de sentimento neutros (*i.e.*, não apresenta pontuações de palavras portuguesas associadas a sentimentos), após implementada a condição ficou-se com apenas 1919 dados binários de sentimento.

4.1.2 Variáveis independentes

A seleção das 30 variáveis independentes (Tabela 1) foi efetuada a partir da literatura, do esquema conceptual da relação entre a forma urbana e bem-estar mental de Hajrasoulih *et al.*, (2018) e do modelo conceptual de bem-estar urbano relacionado com a saúde (UrbWellth) de Szombathely (2017) (Von Szombathely *et al.*, 2017), utilizando variáveis que se inserem nos setores: morfologia, stressores e sociedade.

Tabela 1. Variáveis independentes e a respetiva fonte dos dados

<i>Variável independente</i>	<i>Ano</i>	<i>Fonte dos dados</i>	<i>Bibliografia</i>
Popularidade dos locais (likes/km²)	2019	Flickr	Marsillo <i>et al.</i> , 2022; J. Wang <i>et al.</i> , 2022
Riqueza relativa (Relative richness)	2018	DGT, Carta de Uso e Ocupação do Solo	de la Riva <i>et al.</i> , 2023; Gai <i>et al.</i> , 2022; Marsillo <i>et al.</i> , 2022; Tao <i>et al.</i> , 2022; Zhang <i>et al.</i> , 2021
Diversidade (Diversity)	2018		
Dominância (Dominance Index)	2018		
Fragmentação (Fragmentation index)	2018		
Radiação solar global	2017	Dados Lidar, CML	Jiao <i>et al.</i> , 2021
Largura das ruas	2017	Dados Lidar, CML	Gjerde & Vale, 2022; Mayor & Coleman, 2011
WorldView Built-Up Index (WV-BI)	2017	WorldView-2	He <i>et al.</i> , 2023; Huang <i>et al.</i> , 2022; Schwartz <i>et al.</i> , 2019; Tao <i>et al.</i> , 2022; R. Wang <i>et al.</i> , 2020
WorldView Non-Homogeneous Feature Difference (WV-NHFD)	2017		
WorldView Water Index (WV-WI)	2017		
NDVI	2017		
Poluente O3	2019	Agência Portuguesa do Ambiente (APA)	Du <i>et al.</i> , 2018; He <i>et al.</i> , 2023; R. Wang <i>et al.</i> , 2020; Xiong <i>et al.</i> , 2020
Poluente NO2	2019		
Poluente PM10	2019		
Ruído Global	2020	Câmara Municipal de Lisboa	Abdul-Rahman <i>et al.</i> , 2021; Clark <i>et al.</i> , 2020; Jiao <i>et al.</i> , 2021; Lawton & Fujiwara, 2016
Rede ciclável	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Cebeci <i>et al.</i> , 2023; Lai & Deal, 2023; Leyland <i>et al.</i> , 2019
Desporto Equipamentos Fitness	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Eddolls <i>et al.</i> , 2018
Corredor Verde	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Chen <i>et al.</i> , 2022; Ghahramani <i>et al.</i> , 2021
Elementos de Água	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Tao <i>et al.</i> , 2022; Völker & Kistemann, 2011; White <i>et al.</i> , 2020
Espaços Verdes	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Ayala-Azcárraga <i>et al.</i> , 2019; Chen <i>et al.</i> , 2022; Ghahramani <i>et al.</i> , 2021

<i>Variável independente</i>	<i>Ano</i>	<i>Fonte dos dados</i>	<i>Bibliografia</i>
Imóveis e Monumentos de Interesse Público	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Abdelmoula & Bouayed Abdelmoula, 2023; Aloufi <i>et al.</i> , 2017; Stellacci & Moro, 2022
Imóveis, Monumentos e Conjuntos de Interesse Municipal	2021		
Monumentos Nacionais	2021		
Grandes parques e Jardins de Lisboa	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Lai & Deal, 2023; Schwartz <i>et al.</i> , 2019; Yuen & Jenkins, 2020
Centros Comerciais	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Benabbou & Lee, 2019; Gao <i>et al.</i> , 2022
Centros de Saúde	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Harrison <i>et al.</i> , 2012; Ye <i>et al.</i> , 2022
Alojamentos Hoteleiros	2021	Câmara Municipal de Lisboa	Lipovčan <i>et al.</i> , 2014
Alojamentos Locais	2019	Sistema de Informação Geográfica do Turismo (SIGTUR)	Lipovčan <i>et al.</i> , 2014; Martín-Martín <i>et al.</i> , 2023
Criminalidade	2019	Polícia de Segurança Pública de Lisboa	Lorenc <i>et al.</i> , 2012; Ristea <i>et al.</i> , 2021; Stellacci & Moro, 2022
Idade média ponderada do edificado	2011	BGRI, Instituto Nacional de Estatística (INE)	Abdelmoula & Bouayed Abdelmoula, 2023; Reilly <i>et al.</i> , 2018

4.2 Diagnóstico de multicolinearidade

A segunda fase da abordagem do modelo abrangeu uma análise estatística preliminar, durante a qual se diagnosticou a multicolinearidade das variáveis calculando o fator de inflação da variância (VIF) (Dohoo *et al.*, 1997; Lin, 2008). Calculou-se o VIF utilizando a biblioteca CARET (Classification and Regression Training) do software estatístico R, permitindo assim excluir as variáveis altamente correlacionadas (Naimi *et al.*, 2014). Qualquer variável com um VIF > 5 foi excluída do modelo (G. James *et al.*, 2013; Johnston *et al.*, 2018). Após o cálculo do VIF e a exclusão das variáveis altamente correlacionadas o número final de variáveis incluídas no modelo foi de 10 (exemplificadas na Figura 4).

4.3 Construção do modelo de Machine Learning

O Machine Learning (ML), que é um subcampo da inteligência artificial (IA), supera com sucesso as limitações dos métodos estatísticos. Em comparação aos métodos tradicionais, o ML é reconhecido por alcançar exatidões superiores ou pelo menos equivalentes (Lima *et al.*, 2015; Ren *et al.*, 2020; Shortridge *et al.*, 2016). Por sua vez, as abordagens ML têm muitas vantagens, como a capacidade de lidar com dados de diferentes tipos, estruturas e quantidades (*i.e.*, big data) (Molnar, 2019), não sendo sensíveis à escala das variáveis (o que significa que não há necessidade de as normalizar) (Viana *et al.*, 2021); por conseguinte, é possível combinar dados de diversas fontes para modelar relações não lineares complexas que descrevam a variação do sentimento em ambientes urbanos.

A terceira fase envolveu a construção do modelo de predição utilizando os seguintes algoritmos: Random Forest (RF), Generalized Linear Models (GLM), Neural Networks (NNET), k-Nearest Neighbors (KNN) e o XGBoost (XGB). Os algoritmos foram executados utilizando novamente a biblioteca CARET. Optou-se então por uma divisão dos dados de 90% para o treino e 10% para o teste, o primeiro é responsável pela aprendizagem do modelo e o segundo pela realização dos ajustes.

Tabela 2. Desempenho dos algoritmos ML na predição do sentimento

Algoritmo	Exactidão	Sensibilidade	Especificidade	Predição de positivos	Predição de negativos
RF	0,8125	0,8095	0,8140	0,6800	0,8974
GLM	0,7188	0,2222	0,9612	0,7368	0,7168
NNET	0,7344	0,2222	0,9845	0,8750	0,7216
KNN	0,8021	0,8095	0,7984	0,6623	0,8957
XGB	0,8021	0,8254	0,7907	0,6582	0,9027

Avaliou-se o desempenho dos quatro modelos de machine learning e do modelo linear (GLM) na predição do sentimento. Dos cinco modelos representados na Tabela 2, o algoritmo de *machine learning* RF foi o que alcançou o maior desempenho com uma exatidão de 0,81. Para além da construção do modelo a partir do RF, criou-se ainda um outro modelo de ML utilizando o algoritmo XGB por este permitir aplicar o método de interpretação local SHAP e observar sobre a forma de gráfico a agregação dos *Shapley values* (Lingjærde *et al.*, 2021).

4.4 Modelos-agnósticos

Apesar das potenciais vantagens, os algoritmos ML permanecem principalmente sob uma formulação de ‘caixa negra’, o que significa que sem mais intervenções, não é possível interpretar ou reconstituir diretamente como um modelo executa a inferência ou predição devido aos muitos pesos internos ou informações estruturais (Molnar, 2019).

A Inteligência artificial explicável surgiu recentemente como uma importante área de investigação, que propõe medidas estatísticas avançadas e ferramentas de visualização para melhorar a interpretação do ML (Carvalho *et al.*, 2019; Molnar, 2019; Murdoch *et al.*, 2019). Este é um aspeto crítico quando os resultados do modelo ML são usados para a tomada de decisão (Ribeiro *et al.*, 2016).

No caso dos modelos complexos (e.g., RF e XGB) não podemos usar o modelo original como explicação porque não é fácil de entender. Em vez disso, utiliza-se um modelo de explicação mais simples, que definimos como uma aproximação interpretável do modelo original (Lundberg & Lee, 2017).

Assim, esta fase envolveu a interpretação do modelo ML utilizando a abordagem dos modelos-agnósticos (MA) para aferir a importância das variáveis explicativas. A abordagem MA fornece uma explicação com base nos diferentes comportamentos dos modelos complexos ajustados apresentando a informação a nível global (i.e., o que o modelo aprendeu com as variáveis de entrada) e a nível local (i.e., os racionais que o modelo fornece para cada estimativa) (Viana *et al.*, 2021).

Neste estudo, aplicaram-se modelos agnósticos de métodos globais e locais que facilitam a interpretação global do modelo e a interpretação de observações locais. Para interpretação global do modelo implementou-se os métodos PFI (Permutation Feature Importance) e PDP (Partial Dependence Plot) e para a interpretação local utilizou-se os métodos LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) e o SHAP (Shapley Additive ExPlanations) (Lundberg & Lee, 2017).

5. Análise e discussão dos resultados

5.1 Permutation Feature Importance (PFI)

Os outputs da modelação RF foram examinados utilizando o método PFI para a interpretação global (Figura 4). O método PFI permitiu compreender quais as variáveis que contribuíram para os resultados subjacentes ao modelo ML e quantificar a sua importância.

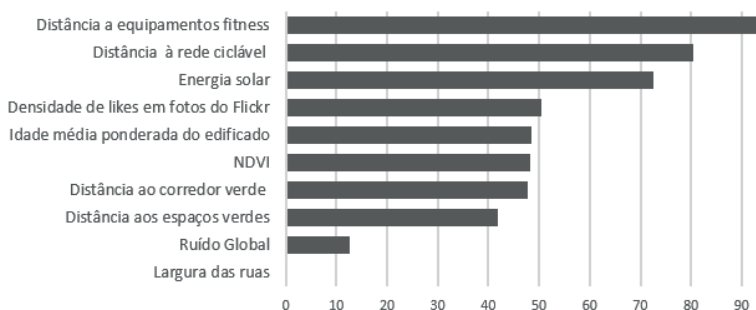


Figura 4. As 10 variáveis mais influentes na explicação do sentimento segundo o método global PFI.

A Figura 4, apresenta as 10 variáveis mais influentes na explicação do sentimento (com uma pontuação de importância > 50). Estas foram a distância a equipamentos fitness, distância à rede ciclável, energia solar e a popularidade dos locais (traduzida por uma grande concentração de likes em fotos do Flickr).

5.2 Partial Dependence Plot (PDP)

O método PDP foi também utilizado para a interpretação global da modelação RF. O PDP é um método de interpretação global, em que o gráfico apresenta o efeito marginal de uma única feature sobre o sentimento predito de um modelo anteriormente ajustado (Friedman, 2001).

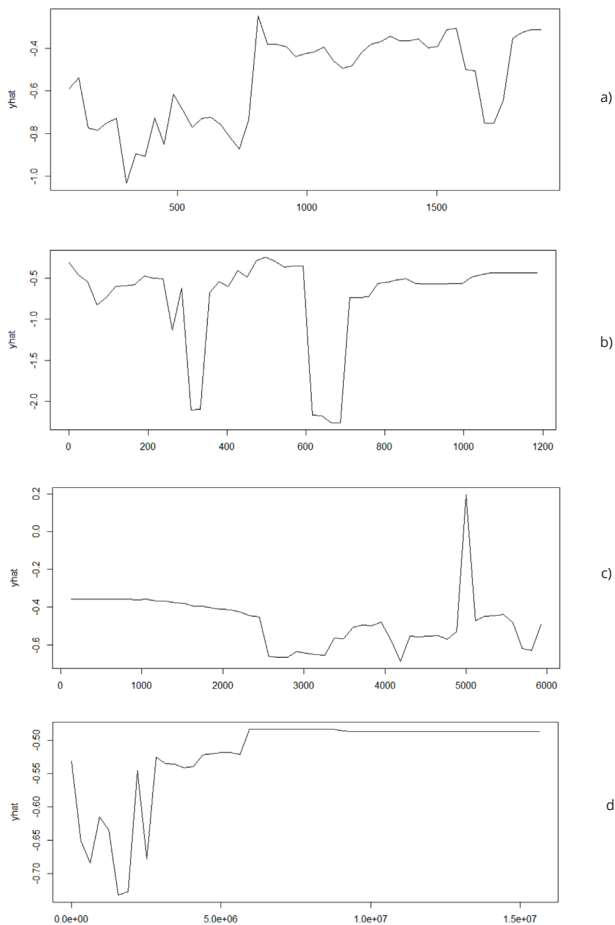


Figura 5. Curvas de resposta das primeiras 4 variáveis mais influentes no incremento do sentimento segundo o método global PDP: a) distância a equipamentos fitness; b) distância à rede ciclável; c) energia solar; d) popularidade dos locais.

A Figura 5 apresenta as curvas de resposta para as primeiras quatro variáveis mais influentes e o quanto estas se traduzem no incremento positivo ou negativo do sentimento. Analisando cada gráfico em particular, pode-se verificar que: (a) a proximidade aos equipamentos fitness não influencia positivamente o sentimento, verificando-se uma preferência por distâncias maiores a estes; (b) a proximidade à rede ciclável influencia de um modo geral positivamente o sentimento; (c) valores muito baixos de energia solar traduzem-se em valores moderados de sentimento, o pico nos 5000 kw-2 traduz uma preferência por espaços com maior exposição solar; (d) a popularidade dos locais (likes/km²) influencia positivamente o sentimento, verificando-se uma preferência por locais mais populares e/ou visualmente mais atrativos.

5.3 Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME)

O método LIME foi utilizado para a interpretação local do modelo de caixa negra *Random Forest*, fornecendo uma explicação ao nível da observação (Elshawi *et al.*, 2019). Este método explica uma predição substituindo o modelo complexo por um modelo de substituição localmente interpretável (Molnar, 2019).

Efetuuou-se uma representação visual das primeiras duas observações individuais (7 e 23) dos dados do subconjunto local, por serem as que melhor justificam os resultados (Figura 6). Cada gráfico apresenta a probabilidade predita de cada observação como sentimento positivo ou negativo. Da mesma forma, apresenta as cinco variáveis que mais contribuem para a explicação da predição do modelo no local de cada observação e se estas variáveis aumentam (suportam) ou diminuem (contradizem) a probabilidade de sentimento (Salami *et al.*, 2020).

A Figura 6-a) apresenta a explicação da predição da observação 7 como sentimento positivo (*label* = 1), com uma forte probabilidade de 0,81. Com estes resultados, podemos deduzir que, para o caso 7 a probabilidade de ser um sentimento positivo é de 81%. Neste caso, a explicação LIME foi criada com base nas cinco variáveis: *Normalized Distance Vegetation Index* (NDVI), densidade de likes (popularidade do local), distância à rede ciclável, distância aos espaços verdes e distância aos equipamentos fitness. Estas contribuem positivamente para a explicação do sentimento positivo, à exceção do NDVI que contradiz a felicidade. Os valores de NDVI inferiores a 0,0352 referem-se a áreas com pouca ou nenhuma clorofila (*e.g.*, áreas artificializadas), estando negativamente correlacionadas com o sentimento positivo.

A tristeza (sentimento negativo; *label*= 0) é mais difícil de prever que a felicidade (sentimento positivo; *label*= 1), por apresentar valores de probabilidade inferiores (0,19 e 0,24) como se pode verificar na Figura 6-b e 6-d).

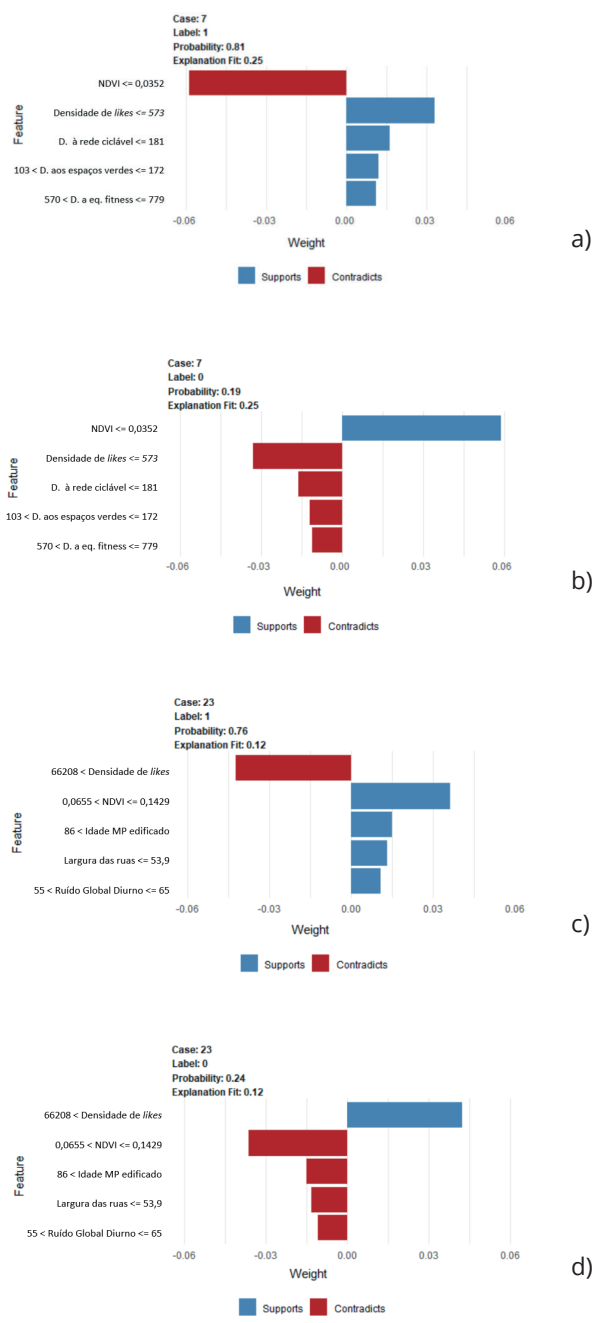


Figura 6. Interpretação do LIME para a instância 7 (a e b) e 23 (c e d) como sentimento positivo (a e c) e negativo (b e d).

5.4 Kernel SHAP

Para a interpretação local do modelo de caixa negra Xgboost utilizou-se o Kernel SHAP. O output do modelo indica-nos a contribuição das variáveis (i.e., ruído = 60) para predição do sentimento para cada subconjunto, através do cálculo da diferença entre a presença e ausência da variável para o subconjunto, efetuando a média ponderada de todas as contribuições (contribuição marginal) (Molnar, 2019). Representou-se graficamente duas observações individuais (7 e 23) dos dados do subconjunto local (Figura 7). Cada gráfico apresenta a probabilidade predita de cada observação como sentimento positivo e as variáveis que mais contribuíram para essa predição local. Indicando também se essas variáveis aumentam (suportam) ou diminuem (contradizem) a probabilidade de sentimento positivo.

A Figura 7-a) mostra a explicação Shapley da observação 7 com base nas 10 variáveis explicativas. Sendo que, a distância aos espaços verdes, energia solar, distância à rede ciclável, NDVI e ruído global são as variáveis que mais contribuíram para a predição do sentimento (positivo). As explicações mostram que valores de distância a espaços verdes de 122 metros suportam o sentimento positivo, contrariamente aos valores de NDVI de -0,0269 e de ruído global de 55 dB que contradizem.

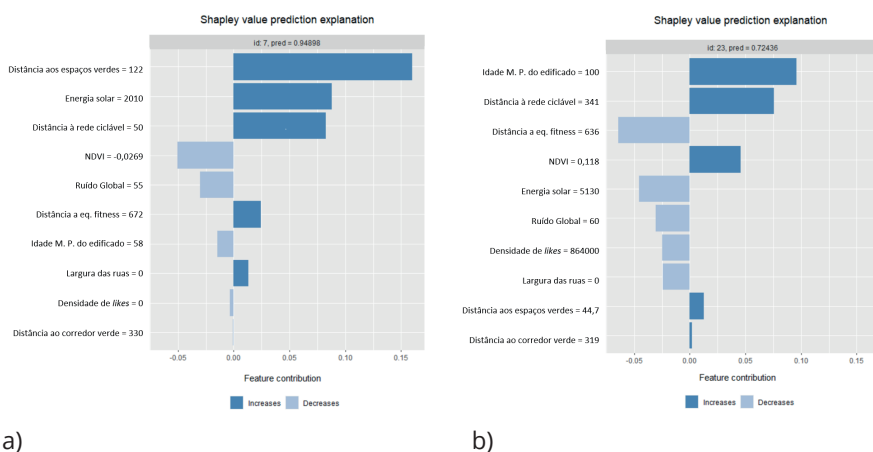


Figura 7. Interpretação Kernel SHAP para a instância 7 (a) e 23 (b) como sentimento positivo.

5.5 SHAP Summary Plot

O SHAP é um método de interpretação local, no entanto também é possível obter interpretações globais válidas agregando as predições individuais. Esta abordagem possibilita aprofundar um pouco mais a complexidade dos resultados do modelo preditivo, enquanto permite explorar as relações entre as features para a observação predita (Molnar, 2019).

A partir do modelo XGB, elaborou-se o Shap Summary Plot (Figura 8) para o conjunto de dados de sentimento. Pode-se verificar que valores mais elevados de distância aos equipamentos fitness estão associados a valores positivos de sentimento predito. Por outras palavras, as pessoas estão felizes se estiverem distantes dos equipamentos fitness. Quando o ruído é elevado, o SHAP value é positivo. Ou seja, as pessoas estão felizes quando o ruído é mais elevado, o que parece contraintuitivo. Contudo, isto poderá dever-se ao facto de a generalidade do ambiente urbano apresentar valores mais elevados de ruído.

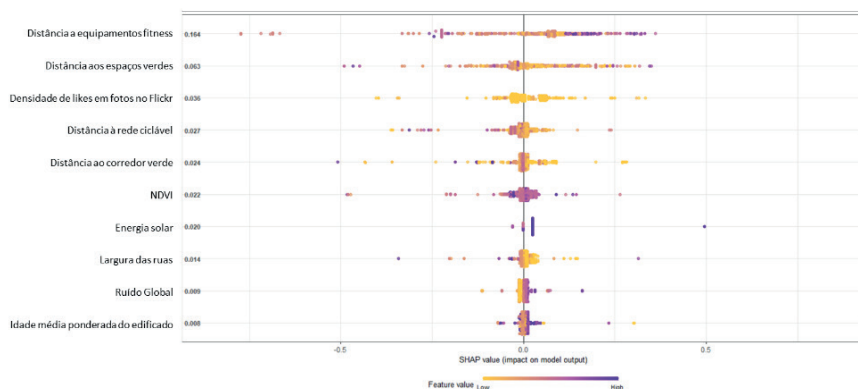


Figura 8. SHAP Summary plot.

6. Conclusões e limitações

Os dados do Twitter são um bom proxy para a análise de sentimento, uma vez que são atribuídos códigos aos utilizadores, assim sabemos quantos são, mas não sabemos quem são, não havendo problemas de confidencialidade. Os dados da localização são públicos nos casos em que o utilizador dá autorização, sendo possível em análises futuras seguir os utilizadores e ter uma perspetiva espacial e temporal do seu comportamento. A permissão para o acesso à localização do utilizador no momento da publicação para além de constituir uma vantagem no âmbito da proteção de dados, é uma desvantagem para a análise de sentimento. Isto, porque a maioria dos utilizadores não autoriza o acesso, acabando por não se considerar uma grande parte dos comentários para a análise.

A utilização de um léxico para a análise de sentimento é um processo facilmente replicável em R, pois basta invocar a biblioteca 'syuzhet' e escolher o método (NRC), não requerendo a execução de etapas intermedias, tais como a atribuição manual de rótulos para a criação de documentos de treino (e.g., abordagem de *machine learning* com método supervisionado).

As 10 variáveis mais influentes na explicação do sentimento, segundo o método global PFI, vão de encontro à Figura 1 de Hajrasoulihi *et al.*, (2018), na qual são apresentadas as relações verificadas entre a forma urbana e o bem-estar

mental. Nomeadamente, a interação com o espaço verde, o design tradicional do bairro, idade e diversidade do edificado e o ruído, que se equiparam com as variáveis mais influentes, NDVI, distância ao corredor verde e espaços verdes, e idade média ponderada do edificado. Para além destas, entre as variáveis mais influentes (com uma pontuação de importância >50) na explicação do sentimento constam ainda a distância a equipamentos fitness, distância à rede ciclável, energia solar e a popularidade dos locais (densidade de likes em fotos no *Flickr*).

Os modelos agnósticos, principalmente o SHAP, desempenham um papel fundamental neste tipo de análise. Para além de explicar as predições individuais dos modelos de *machine learning*, também permite obter explicações globais válidas agregando as predições individuais. Respondendo à questão de partida, as variáveis que se relacionam mais com o sentimento, segundo este modelo, são a distância a equipamentos *fitness*, a distância aos espaços verdes, a popularidade dos locais e a distância à rede ciclável.

Este tipo de estudos são uma mais-valia para os planeadores, políticos, profissionais de saúde, que com a ajuda das interpretações do modelo de ML podem tomar decisões. Possibilitando desenvolver novas estratégias para reduzir as desigualdades e promover melhor a saúde e o bem-estar urbanos. Estes profissionais possuem um conhecimento prévio sobre o bem-estar em ambiente urbano, que podem utilizar para determinar se aceitam ou rejeitam uma predição.

7. Financiamento do projeto

The Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) supported this research via Grant No. 2022.11665.BD to Iúria Betco. The Centre for Geographical Studies - Universidade de Lisboa and FCT supported this research via Grant No. UIDB/00295/2020 + UIDP/00295/2020. We thank the GEOMODLAB —Laboratory for Remote Sensing, Geographical Analysis and Modelling— of the Centre for Geographical Studies (CEG) and Institute of Geography and Spatial Planning (IGOT) for providing the required equipment and software.

Bibliografia

- Abdelmoula, E., & Bouayed Abdelmoula, N. (2023). Promoting health and wellbeing through building the relationship with build and cultural heritage. *European Psychiatry*, 66(S1), S988–S988. DOI: <https://doi.org/10.1192/j.eurpsy.2023.2100>
- Abdul-Rahman, M., Chan, E. H. W., Wong, M. S., Irekponor, V. E., & Abdul-Rahman, M. O. (2021). A framework to simplify pre-processing location-based social media big data for sustainable urban planning and management. *Cities*, 109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102986>
- Afriliana, N., Iswari, N. M. S., & Suryasari. (2022). Sentiment Analysis of User-Generated Content: A Bibliometric Analysis. *Journal of System and Management Sciences*, 12(6), 583–598. DOI: <https://doi.org/10.33168/JSMS.2022.0634>
- Aloufi, S., Zhu, S., & El Saddik, A. (2017). On the Prediction of Flickr Image Popularity by Analyzing Heterogeneous Social Sensory Data. *Sensors*, 17 (3). DOI: <https://doi.org/10.3390/s17030631>

- Ayala-Azcárraga, C., Diaz, D., & Zambrano, L. (2019). Characteristics of urban parks and their relation to user well-being. *Landscape and Urban Planning*, 189, 27–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04.005>
- Benabbou, R., & Lee, H. (2019). Exploring the evolution of urban emotions in the City of Seoul using social media information. *International Journal of Knowledge-Based Development*, 10 (3), 232–248. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2019.103208>
- Cebeci, H. İ., Güner, S., Arslan, Y., & Aydemir, E. (2023). Barriers and drivers for biking: What can policymakers learn from social media analytics? *Journal of Transport and Health*, 28 (November 2022), 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101542>
- Chen, S., Liu, L., Chen, C., & Haase, D. (2022). The interaction between human demand and urban greenspace supply for promoting positive emotions with sentiment analysis from twitter. *Urban Forestry and Urban Greening*, 78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127763>
- Clark, C., Crumpler, C., & Notley, H. (2020). Evidence for environmental noise effects on health for the United Kingdom policy context: A systematic review of the effects of environmental noise on mental health, wellbeing, quality of life, cancer, dementia, birth, reproductive outcomes, and cognition. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17020393>
- De la Riva, E. G., Ulrich, W., Batáry, P., Baudry, J., Beaumelle, L., Bucher, R., Čerevková, A., Felipe-Lucia, M. R., Gallé, R., Kesse-Guyot, E., Rembiałkowska, E., Rusch, A., Seufert, V., Stanley, D., & Birkhofer, K. (2023). From functional diversity to human well-being: A conceptual framework for agroecosystem sustainability. *Agricultural Systems*, 208 (November 2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103659>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2008). *Hedonia, eudaimonia, and well-being: an introduction*. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10902-006-9018-1>
- Dohoo, I. R., Ducrot, C., Fourichon, C., Donald, A., & Hurnik, D. (1997). An overview of techniques for dealing with large numbers of independent variables in epidemiologic studies. *Preventive Veterinary Medicine*, 29(3), 221–239. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(96\)01074-4](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(96)01074-4)
- Du, G., Shin, K. J., & Managi, S. (2018). Variability in impact of air pollution on subjective well-being. *Atmospheric Environment*, 183 (April), 175–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.018>
- Eddolls, W. T. B., McNarry, M. A., Lester, L., Winn, C. O. N., Stratton, G., & Mackintosh, K. A. (2018). The association between physical activity, fitness and body mass index on mental well-being and quality of life in adolescents. *Quality of Life Research*, 27 (9), 2313–2320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11136-018-1915-3>
- Elshawi, R., Al-Mallah, M. H., & Sakr, S. (2019). On the interpretability of machine learning-based model for predicting hypertension. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 19 (1), 146. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12911-019-0874-0>
- Fathi, S., Sajadzadeh, H., Sheshkal, F. M., Aram, F., Pinter, G., Felde, I., & Mosavi, A. (2020). The role of urban morphology design on enhancing physical activity and public health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (7), 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072359>
- Friedman, J. H. (2001). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*, 29 (5), 1189–1232.

- Gai, Z., Fan, C., Shen, S., Ge, Y., Shi, Z., Li, S., Zhang, Y., & Cao, Y. (2022). Using Social Media Data to Explore Urban Land Value and Sentiment Inequality: A Case Study of Xiamen, China. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/1456382>
- Galinha, I., & Ribeiro, J. L. P. (2005). História e Evolução do Conceito de Bem-Estar Subjectivo, *Psicologia, Saúde & Doenças*, 6 (2), 203-214.
- Gao, Y., Chen, Y., Mu, L., Gong, S., Zhang, P., & Liu, Y. (2022). Measuring urban sentiments from social media data: a dual-polarity metric approach. *Journal of Geographical Systems*, 24 (2), 199–221. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10109-021-00369-z>
- Ghahramani, M., Galle, N. J., Duarte, F., Ratti, C., & Pilla, F. (2021). Leveraging artificial intelligence to analyze citizens' opinions on urban green space. *City and Environment Interactions*, 10 (February), 100058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100058>
- Gjerde, M., & Vale, B. (2022). An examination of people's preferences for buildings and streetscapes in New Zealand. *Australian Planner*, 58 (1-2), 36-48. DOI: <https://doi.org/10.1080/07293682.2022.2029922>
- Hajrasoulih, A., del Rio, V., Francis, J., & Edmondson, J. (2018). Urban form and mental wellbeing. *Journal of Urban Design and Mental Health*, 5 (1), 10. DOI: <https://www.urbandesignmentalhealth.com/journal-5---urban-form-and-mental-wellbeing.html>
- Harrison, P. L., Pope, J. E., Coberley, C. R., & Rula, E. Y. (2012). Evaluation of the relationship between individual well-being and future health care utilization and cost. *Population Health Management*, 15(6), 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1089/pop.2011.0089>
- He, H., Sun, R., Li, J., & Li, W. (2023). Urban landscape and climate affect residents' sentiments based on big data. *Applied Geography*, 152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102902>
- Hidaka, B. H. (2012). Depression as a disease of modernity: explanations for increasing prevalence. *National Institutes of Health*, 140 (3), 205–214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2011.12.036>. Depression
- Huang, S., Zhu, J., Zhai, K., Wang, Y., Wei, H., Xu, Z., & Gu, X. (2022). Do Emotional Perceptions of Visible Greeneries Rely on the Largeness of Green Space? A Verification in Nanchang, China. *Forests*, 13 (8). DOI: <https://doi.org/10.3390/f13081192>
- Huppert, F. A. (2009). *Psychological Well-being: Evidence Regarding its Causes and Consequences*. 1 (2), 137-164. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1758-0854.2009.01008.x>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *Springer Texts in Statistics An Introduction to Statistical Learning* (Springer (ed.); 7th ed.). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7138-7>
- Jiao, Y., Li, C., & Lin, Y. (2021). Can urban environmental problems be accurately identified? A complaint text mining method. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(9). DOI: <https://doi.org/10.3390/app11094087>
- Johnston, R., Jones, K., & Manley, D. (2018). Confounding and collinearity in regression analysis: a cautionary tale and an alternative procedure, illustrated by studies of British voting behaviour. *Quality & Quantity*, 52 (4), 1957-1976. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0584-6>

- Keyes, C. L. E. M. (1998). Social well-being. *Social Psychology Quarterly*, 61 (2), 121–140.
- Lai, S., & Deal, B. (2023). Parks, Green Space, and Happiness: A Spatially Specific Sentiment Analysis Using Microblogs in Shanghai, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15 (1). DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010146>
- Lawton, R. N., & Fujiwara, D. (2016). Living with aircraft noise: Airport proximity, aviation noise and subjective wellbeing in England. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 42, 104–118.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.11.002>
- Leyland, L. A., Spencer, B., Beale, N., Jones, T., & van Reekum, C. M. (2019). The effect of cycling on cognitive function and well-being in older adults. *PLoS ONE*, 14 (2), 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211779>
- Lin, F.-J. (2008). Solving Multicollinearity in the Process of Fitting Regression Model Using the Nested Estimate Procedure. *Quality & Quantity*, 42 (3), 417–426.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9055-1>
- Lingjærde, C., Jullum, M., & Sellereite, N. (2021). *Explaining individual machine learning predictions with Shapley values*.
- Lipovčan, L. K., Brajša-Žganec, A., & Poljanec-Borić, A. S. (2014). What is good for tourists should be good for residents too: The relationship between the quality of the touristic offer and subjective well-being of residents. *Tourism Analysis*, 19 (6), 719–730. DOI: <https://doi.org/10.3727/108354214X14146846679448>
- Lorenc, T., Clayton, S., Neary, D., Whitehead, M., Petticrew, M., Thomson, H., Cummins, S., Sowden, A., & Renton, A. (2012). Crime, fear of crime, environment, and mental health and wellbeing: Mapping review of theories and causal pathways. *Health and Place*, 18 (4), 757–765.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2012.04.001>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. Section 2*, 1–10.
- Marsillo, L., Suntorachai, N., Karthikeyan, K. N., Voinova, N., Khairallah, L., & Chronis, A. (2022). Context Decoder Measuring urban quality through artificial intelligence. *Proceedings of the International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe*, 2 (September), 237–246.
DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.2.237>
- Martín-Martín, J. M., Prados-Castillo, J. F., Jiménez Aguilera, J. de D., & Porras González, E. (2023). Interferences generated on the well-being of local communities by the activity of online platforms for tourist accommodation. *Journal of Sustainable Tourism*, 31(2), 483–503. <https://doi.org/10.1080/09669582.2020.1861455>
- Mayor, J., & Coleman, B. (2011). *The Social and Emotional Benefits of Good Street Design*. August.
- McGillivray, M., & Clarke, M. (2006). *Understanding human well-being*. United Nations University.
- Mohammad, S., & Turney, P. (2015). *NRC Word-Emotion Association Lexicon (aka EmoLex)*. <https://saifmohammad.com/WebPages/NRC-Emotion-Lexicon.htm>
- Molnar, C. (2019). *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. Independently published.
- Naimi, B., Hamm, N. A. S., Groen, T. A., Skidmore, A. K., & Toxopeus, A. G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography*, 37(2), 191–203.
DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x>

- Reeves, W. C., Strine, T. W., Pratt, L. A., Thompson, W., Ahluwalia, I., Dhingra, S. S., McKnight-Eily, L. R., Harrison, L., D'Angelo, D. V., Williams, L., Morrow, B., Gould, D., & Safran, M. A. (2011). *Mental Illness Surveillance Among Adults in the United States*. 60.
- Reilly, S., Nolan, C., & Monckton, L. (2018). *Wellbeing and the Historic Environment: Threats, Issues and Opportunities for the Historic Environment*. 01.
- Ristea, A., Leitner, M., Resch, B., & Stratmann, J. (2021). Applying spatial video geonarratives and physiological measurements to explore perceived safety in baton rouge, louisiana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (3), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031284>
- Romice, O., Thwaites, K., Porta, S., Greaves, M., Barbour, G., & Pasino, P. (2016). City form and wellbeing. In O. Fleury-Bahi, Ghazlane, Pol, Enric, Navarro (Ed.), *The Handbook of Environmental Psychology and Quality of Life Research* (Issue January, pp. 241–273). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7_14
- Salami, D., Sousa, Carla A., Martins, M. do R. O., & Capinha, C. (2020). Predicting dengue importation into Europe, using machine learning and model-agnostic methods. *Scientific Reports*, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66650-1>
- Santana, P., Nogueira, H., & Santos, R. (2007). *Melhorar a saúde na Amadora Intervindo no Ambiente Físico e Social* (pp. 239–254).
- Schwartz, A. J., Dodds, P. S., O'Neil-Dunne, J. P. M., Danforth, C. M., & Ricketts, T. H. (2019). Visitors to urban greenspace have higher sentiment and lower negativity on Twitter. *People and Nature*, 1 (4), 476–485. DOI: <https://doi.org/10.1002/pan3.10045>
- Shayaa, S., Jaafar, N. I., Bahri, S., Sulaiman, A., Wai, P. S., Chung, Y. W., Piprani, A. Z., & Al-garadi, M. A. (2018). Sentiment Analysis of Big Data : Methods , Applications , and Open Challenges. *IEEE Access*, 6 (December 2019), 37807–37827. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851311>
- Stellacci, S., & Moro, S. (2022). Travellers' perspectives on historic squares and railway stations in Italian heritage cities revealed through sentiment analysis. *Journal of Urban Design*. DOI: <https://doi.org/10.1080/13574809.2022.2097903>
- Tao, J., Yang, M., & Wu, J. (2022). Coupling Coordination Evaluation of Lakefront Landscape Spatial Quality and Public Sentiment. *Land*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/land11060865>
- United Nations. (2015). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*. ST/ESA/SER.A/366
- Viana, C. M., Santos, M., Freire, D., Abrantes, P., & Rocha, J. (2021). *Evaluation of the factors explaining the use of agricultural land: A machine learning and model-agnostic approach*. 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108200>
- Völker, S., & Kistemann, T. (2011). The impact of blue space on human health and well-being - Salutogenetic health effects of inland surface waters: A review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214 (6), 449-460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.05.001>
- Wang, J., Wu, Y., & Xia, Y. (2022). A study on the distribution of 5A attractions and the Spatio-temporal characteristics of tourists' emotions in China. *International Conference on Geoinformatics*, 2022-Augus, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/Geoinformatics57846.2022.9963808>
- Wang, R., Yang, B., Yao, Y., Bloom, M. S., Feng, Z., Yuan, Y., Zhang, J., Liu, P., Wu, W., Lu, Y., Baranyi, G., Wu, R., Liu, Y., & Dong, G. (2020). Residential greenness, air

pollution and psychological well-being among urban residents in Guangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 711, 1-12.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134843>

White, M. P., Elliott, L. R., Gascon, M., Roberts, B., & Fleming, L. E. (2020). Blue space, health and well-being: A narrative overview and synthesis of potential benefits. *Environmental Research*, 191 (August), 110169.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110169>

Xiong, Y., He, Y., Huang, H., Yu, C., & Jing, X. (2020). Air Quality Statistics and Prediction Based on Urban Agglomerations and Sentiment Analysis of People Under Different Pollutants. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 628 LNEE, 78-87.

DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4163-6_10

Ye, Z., Li, R., & Wu, J. (2022). Dynamic Demand Evaluation of COVID-19 Medical Facilities in Wuhan Based on Public Sentiment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127045>

Yuen, H. K., & Jenkins, G. R. (2020). Factors associated with changes in subjective well-being immediately after urban park visit. *International Journal of Environmental Health Research*, 30(2), 134-145.

DOI: <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1577368>

Zhang, J., Li, X., Bao, T., Li, Z., Liu, C., & Xu, Y. (2021). Linking demographic factors, land use, ecosystem services, and human well-being: Insights from an sandy landscape, uxin in Inner Mongolia, China. *Sustainability (Switzerland)*, 13 (9).

DOI: <https://doi.org/10.3390/su13094847>

Mapeo espacial-temporal de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina, de 2014 a 2021

Spatial-temporal mapping of snow cover in the Aconquija mountain range, Tucumán and Catamarca provinces, Argentina, from 2014 to 2021

Mario Arnaldo Toledo¹

Gloria Patricia Ibañez Palacios²

Ana Lía Ahumada³

Recibido 16 de junio de 2023; aceptado 16 de enero de 2024

RESUMEN

El clima de montaña desempeña un papel significativo en la distribución de los recursos hídricos, debido a la altitud y a la circulación atmosférica regional. En estas áreas, las temperaturas promedio son más bajas y se presentan con frecuencia precipitaciones en forma de granizo y/o nieve. Estas condiciones climáticas tienen una marcada influencia en la preservación de los glaciares de escombros emplazados en las cumbres y que contienen importantes reservorios de recursos hídricos congelados conocidos como “permafrost de montaña”. El presente trabajo tuvo como objetivo delimitar espacialmente y temporalmente las áreas cubiertas por nieve entre los años 2014 y 2021, con el propósito de identificar zonas criogénicas nivales estacionales, que favorecerían su permanencia. Para el mapeo de la nieve se consideró el índice NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada) de las escenas satelitales Landsat 8 OLI-TIRS

¹ Instituto de Geología del Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Argentina, correo electrónico: matoledo@lillo.org.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1138-7089>

² Instituto de Geología del Cuaternario y Paleoclimas, Fundación Miguel Lillo, Argentina, correo electrónico: gpibanezpalacios@lillo.org.ar ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9256-5558>

³ CONICET, Argentina, correo electrónico: anaa.gavri@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9256-5558>

y Sentinel 2A y el producto MOD10A2. Estas escenas se circunscriben a la sierra del Aconquija, límite natural entre las provincias de Tucumán y Catamarca. Se obtuvieron las áreas cubiertas de nieve para cada año y las alturas máximas y mínimas, con software libre Qgis 3.12.1 y el Modelo Digital de Elevación SRTM1S28W066V3 con resolución de 1segundo de arco. Los mapas obtenidos muestran que las nevadas se presentaron entre los meses de enero a mayo. La mayor nevada cubrió un área total de 46569,7 ha y un Área Máxima de 4 3030,3 ha. Las Alturas Máximas de nieve no han tenido grandes variaciones, presentándose entre los 4998 y 5534 msnm, pero las Alturas Mínimas han variado notablemente, entre los 4347 y 2649 msnm. Los resultados proporcionan datos innovadores y significativos para comprender de manera más exhaustiva la distribución de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija. Los mismos pueden constituir la fundamentación de diversos estudios hidrológicos en la alta cuenca.

Palabras clave: *Sierra del Aconquija, Cobertura nival, Índice NDSI, Glaciares de escombros, Sensores remotos.*

ABSTRACT

Mountain climate plays a significant role in the distribution of water resources due to altitude and regional atmospheric circulation. In these areas, average temperatures are lower, and hail and/or snowfall frequently occur. These climatic conditions have a marked influence on the preservation of rock glaciers located on the summits, which contain important frozen water resources known as "mountain permafrost." The objective of this study was to spatially and temporally delimit the snow-covered areas between 2014 and 2021 to identify seasonal snow cryogenic zones that would support their persistence. The Normalized Difference Snow Index (NDSI) of Landsat 8 OLI-TIRS and Sentinel 2A satellite scenes, as well as the MOD10A2 product, were used for snow mapping. These scenes are located in the Aconquija mountain range, a natural boundary between the provinces of Tucumán and Catamarca. Snow-covered areas for each year and maximum and minimum elevations were obtained using specific open-source software QGIS 3.12.1 and the SRTM1S28W066V3 Digital Elevation Model with a 1-second arc resolution. The maps obtained show that snowfall occurred between January and May. The largest snowfall covered a total area of 46569,7 ha, with a maximum area of 43030,3 ha. Maximum snow heights have not varied significantly, ranging from 4998 to 5534 masl, but minimum heights have varied notably, between 4347 and 2649 masl. The results provide innovative and significant data to better understand snow cover distribution in the Aconquija Mountain Range, serving as the foundation for various hydrological studies in the upper basin.

Key words: *Aconquija mountain range, Snow cover, NDSI index, Rock glaciers, Remote sensors.*

1. Introducción

La posibilidad de obtener los cambios estacionales de la cobertura de nieve en las áreas cumbres es importante para estudios hidrológicos. Los sensores remotos que trabajan en el rango de longitud de onda del visible e infrarrojo son una excelente herramienta para el monitoreo de nieve en condiciones libres de nubosidad. Las precipitaciones nivas son componentes de la criósfera, que es la parte de la Tierra que incluye las regiones con permafrost, suelo permanentemente congelado, áreas con hielo al descubierto y regiones sujetas a temperaturas por debajo de 0° C gran parte del año (Trombott Liaudat *et al.*, 2005). Las precipitaciones nivas juegan un rol fundamental en la preservación de los glaciares de escombros, los cuales son una variable que suma reservorio al registro de recursos hídricos conocidos y son importantes en la regulación de caudales de alta y media montaña (Ahumada *et al.*, 2013). Los glaciares de escombros sirven como reservorios de agua a largo y corto plazo y también juegan un papel crucial en la regulación del flujo de los ríos (Brenning, 2003). Durante el invierno temprano, retienen agua en forma de hielo subterráneo, principalmente de la fusión diurna, que se libera en el verano siguiente. Este proceso contribuye al ciclo del agua líquida, y también hay cambios diarios de congelación y descongelación (Brenning, 2003).

El avance de la geoinformática permite actualmente implementar el monitoreo continuo de la criósfera, tanto a nivel anual como mensual a alta resolución espacial y en donde los softwares gratuitos asociados a la BigData se presentan como herramientas útiles para propósitos de observación de los recursos naturales (Leal Parra, 2020).

El uso de la teledetección con un amplio abanico de sensores con diferente resolución espacial y temporal, proporcionan una información muy amplia para su conocimiento (Cea López *et al.*, 2006). En efecto, la utilización de la teledetección ha resultado ser una herramienta metodológica ideal para el monitoreo sistemático de grandes extensiones de terreno por lo general inaccesibles, como es el caso que aquí se analiza. Además, ha abierto la posibilidad de adquirir datos en intervalos regulares proporcionando información sobre el estado y la cobertura de la nieve. Por lo tanto, el uso de información satelital permite registrar algunos de estos cambios e inclusive expresarlos en mapas e índices de cobertura de nieve (Ariza, 2006).

Los métodos para el estudio de la cobertura niva por teledetección han dado lugar a numerosas publicaciones. Por ejemplo, Dozier (1989) analiza la firma espectral de la capa de nieve alpina utilizando el mapeador temático Landsat; Klein *et al.* (2002) mapean la capa de nieve en los bosques mediante la reflectancia del dosel; Cea *et al.* (2007) determinan la superficie nivosa del Pirineo Catalán mediante el uso de imágenes Landsat y MODIS. El producto MOD10A2 de MODIS de alta resolución fue utilizado por Hall *et al.* (2006); Hall *et al.* (2007) evalúan la precisión de los productos de nieve MODIS; Paudel y Andersen (2011) monitorean la variabilidad de la cubierta de nieve en un área de la región transhimalaya de Nepal utilizando datos MODIS; Huang *et al.* (2011)

validan los productos MODIS con imágenes Landsat y mediciones terrestres en Xinjiang, China; Dahri *et al.* (2011) estudian la distribución altitudinal, espacial y temporal de la cubierta de nieve en el Himalaya paquistaní, Rittger *et al.* (2013) evalúan metodologías para mapear la capa de nieve con el sensor MODIS; Telesca *et al.* (2014) caracterizan la dinámica temporal del manto de nieve en las cadenas montañosas del Líbano; Tahir *et al.* (2015) estudian y comparan las capas de nieve de las cuencas Astore (Himalaya occidental) y Hunza (región de Karakoram); Thapa y Muhammad (2020) analizan los cambios de nieve en la región de Karakoram entre 2003 y 2018.

Trabajos referidos a la temática se llevaron a cabo en Argentina por autores como Ostertag *et al.* (2008), quienes analizan el estado nival de las cuencas Limay y Neuquén por teledetección y SIG; Cogliati *et al.* (2013) realizan estudios de la cubierta de nieve en el norte de la provincia de Neuquén a partir de productos MOD10A2; Cogliati *et al.* (2015) realiza estudios en la cuenca alta del río Neuquén; Cara *et al.* (2016) estudian la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza con imágenes MODIS; Finessi y Cogliati (2018) estudian el área cubierta de nieve en el norte de Neuquén con información satelital; Aumassanne *et al.* (2019) estudian la cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y Aumassanne *et al.* (2022) analizan la dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado.

En esta investigación se realiza el cálculo de las áreas cubiertas de nieve, y se analiza su importancia en la preservación de los glaciares de escombros en la sierra del Aconquija, desde enero 2014 hasta abril de 2021. Para llevar a cabo este estudio se emplearon sensores remotos Landsat 8, Sentinel 2A y el producto de nieve MOD10A2, debido a las dificultades de acceso al área y su gran extensión territorial.

2. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en las cumbres de la sierra del Aconquija, abarcando los sectores más elevados de las cuencas ubicadas en las laderas orientales, occidentales y sur. Esta sierra que se extiende en dirección NE-SW, según se muestra en la Figura 1.a, se encuentra ubicada aproximadamente entre las latitudes 26° 41'13" y 27° 41'31" sur. Es la elevación más prominente de la provincia de Tucumán y límite tanto político como natural con la provincia de Catamarca. Su extremo septentrional es el Abra del Infiernillo y el Alto del Rumiarco, con una altitud de 3039 msnm. Hacia el sur, se encuentran las altas cumbres del Cerro Muñoz, que superan los 4000 msnm (Alderete, 1998). La Sierra presenta un marcado relieve topográfico, alcanzando su punto más elevado en el cerro El Bolsón, con una altitud de 5552 msnm, mientras que su punto más bajo se encuentra en la transición entre el piedemonte inferior y la llanura, a una altitud de 400 msnm.

2.1 Geología

La sierra del Aconquija forma parte del Sistema de Sierras Pampeanas, está constituida por un basamento cristalino, compuesto de rocas metamórficas, ígneas y mixtas, del Precámbrico y Cámbrico Inferior (Aceñolaza y Alonso, 2001). En el piedemonte se encuentran sedimentitas cretácicas, paleógenas y neógenas. Los bloques de basamento que constituyen esta sierra fueron levantados por grandes fallas inversas lítricas, según el esquema propuesto por González Bonorino (1950).

2.2 Suelos

En la cuenca alta la intensa meteorización, producto del clima frío y seco se traduce en el predominio de suelos Torriortentes Xéricos (Leptosoles Eútricos) en las áreas de relieve glaciar/periglacial y de Torriortentes Líticos (Leptosoles Líticos), desarrollados sobre depósitos coluviales y laderas descubiertas (Sayago *et al.*, 1998). En esta área las pendientes son tan fuertes que predomina la erosión sobre los procesos pedogenéticos (Puchulu, 2000).

2.3 Vegetación

Según Santillán de Andrés y Ricci (1980), por arriba de los 2000 msnm crecen pastizales de altura. Las siringas, cortaderas y los chaguales tapizan las paredes rocosas desde de los 3 000 msnm, estos se mezclan con plantas leñosas como la yareta, las gentianas, líquenes y musgos a partir de los 3600 msnm. Por arriba de los 4500 msnm desaparecen las matas gramíneas, solo se encuentran líquenes y musgos hasta el dominio de los afloramientos rocosos.

2.4 Clima

Las masas de aire cálido y húmedo ascienden por la influencia orográfica de la sierra del Aconquija, produciéndose un enfriamiento adiabático, con un primer nivel de condensación entre los 1500 y los 2000 msnm, por lo que es muy grande el aumento de las precipitaciones sobre sus laderas orientales, el piedemonte y la llanura (Bianchi *et al.*, 2005). Dando lugar a una de las zonas más húmedas de la provincia de Tucumán, con registros que superan los 1000 y 1200 mm anuales, alcanzándose en ciertos lugares por su exposición más favorable, registros cercanos a los 2 000 mm anuales. Una vez transpuesta la alta barrera montañosa (de lado catamarqueño), se produce un importante efecto orográfico negativo, disminuyendo bruscamente las lluvias, que alcanzan valores menores a 100 mm en el bolsón Campo del Arenal (Bianchi *et al.*, 2005).

Debido a que los registros térmicos en la región están directamente relacionados con la altitud, las temperaturas medias anuales descienden hacia las cumbres con un gradiente térmico regional de 0,55° C cada 100m. En función de este gradiente y tomando como referencia la temperatura media anual de 17,1° C de la estación meteorológica de Tafí del Valle (la de mayor altura en la región: 1976 msnm), la temperatura media anual extrapolada para 4000 msnm

sería de 2,1° C (Ahumada *et al.*, 2013). La toporregión desde los 4000 hasta los 5 000 msnm o más, corresponde a un clima seco de alta montaña o polar de altura, EB de tipo I de la clasificación de Köppen (1923), que sería equivalente al clima de Tundra, ET de la clasificación de Köppen (1931). En este tipo de clima el suelo está frecuentemente congelado hasta considerables profundidades. La temperatura mínima media de enero se encuentra cercana a 0° C y la de julio en el orden de los -10° C, con más de 200 días con heladas al año (Minetti *et al.*, 2005). En la zona cumbre de la sierra de Aconquija las precipitaciones níveas son esporádicas o ausentes en invierno y las precipitaciones de granizo y/o graupel se registran desde diciembre a marzo. No existen mediciones de estos eventos (Ahumada *et al.*, 2013). La radiación global fue estimada a partir de la radiación entrante en el borde superior de la atmósfera y la medición de la heliofanía relativa, con un valor para la región de altura en estudio de 180Kcal/cm² al año (Minetti *et al.*, 2005). La evapotranspiración potencial media anual calculada por Minetti *et al.* (2005) está entre los 900 y 1000 mm para la franja altitudinal de trabajo.

2.5 Los glaciares de escombros de la Sierra del Aconquija

Durante el Holoceno se desarrollaron los glaciares de escombros de la sierra por arriba del límite inferior de las morenas y por debajo del límite de la línea de nieve permanente actual (Ahumada *et al.*, 2013).

Ibañez Palacios (2007), siguiendo los conceptos de Corte (1983) y Haeberli (1983), evaluó las formas geocriogénicas de la Sierra del Aconquija como parámetros para determinar permafrost de montaña definiendo dos asociaciones geomorfológicas con actividad criogénica: (1) entre los 2000 y 4 000 msnm con procesos periglaciares estacionales, y (2) por encima de los 4000 msnm con permafrost, marcado por la base de los glaciares de escombros activos, caracterizado por la presencia de permafrost discontinuo y por intensos procesos de criofragmentación y crioflujo de laderas. Con el ascenso de la línea de nieves permanentes, a través del tiempo, también fue elevándose progresivamente el límite inferior del permafrost (Ahumada *et al.*, 2013).

El primer inventario de glaciares de escombros en la sierra de Aconquija, utilizado en este trabajo, fue publicado por Ahumada *et al.* (2013). La distribución, localización y dimensiones de estas geoformas fueron determinadas en el ámbito de cuencas mayores y subcuencas. Mediante la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de la zona. Se reconocieron glaciares de escombros intactos y glaciares cubiertos. Los resultados mostraron que el límite inferior de permafrost de montaña en la sierra de Aconquija es indicado por los glaciares de escombros intactos que ocurren en los 4000 ± 200 msnm.

Los glaciares de escombros de la sierra de la sierra del Aconquija se ubican en las cabeceras de las subcuencas situadas en las laderas, produciendo aportes hídricos a los cauces, debido al descongelamiento estacional de la capa activa.

En la ladera oriental (provincia de Tucumán) se ubican las subcuencas: Pisavil, Las Cañas, Cochuna, Conventillo, Solco y Pueblo Viejo, en la ladera

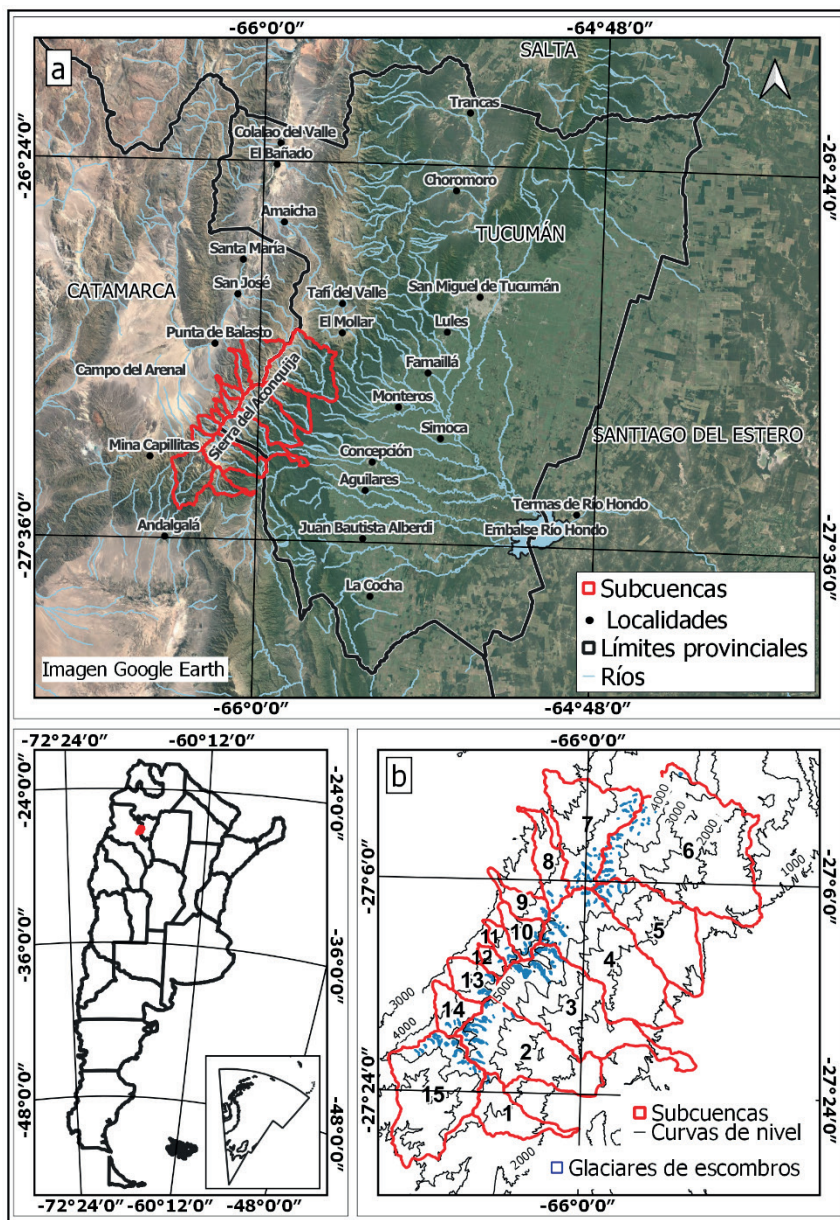


Figura 1.a) Ubicación de las subcuencas en el contexto regional, b) Sub. orientales: 1-Pisavil, 2-Las Cañas, 3-Cochuna, 4-Conventillo, 5-Solco, 6-Pueblo Viejo. Sub. occidentales: 7-La Horqueta, 8-Pajanguillo, 9-Chiflón, 10-Cerrillos, 11-Buey Muerto, 12-El Zarzo, 13-Potrerillos, 14-El Arenal. Sub. Sur. 15-Andalgala.

occidental (provincia de Catamarca), las subcuencas: La Horqueta (Ampajango), Pajanguillo, Chiflón, Cerrillos, Buey Muerto, El Zarzo, Potrerillos y Arenal y en la ladera sur la subcuenca Andalgalá (Figura 1.b).

La altura y orientación de la Sierra del Aconquija (NNE-SSW) condiciona la entrada de los vientos húmedos de dirección Norte, Sur y Sureste, originando condiciones de humedad diferentes entre las laderas orientales, occidentales y sur.

Las subcuencas orientales reciben las mayores precipitaciones, por lo que el aporte hídrico estacional de los glaciares de escombros hacia los cauces fluviales es mínimo en relación a los caudales generados por las precipitaciones, las cuales alimentan a los principales sistemas fluviales que discurren aguas abajo por el piedemonte, llanura aluvial y deprimida, hasta desaguar en el Embalse río Hondo.

Por el contrario, las subcuencas occidentales y sur reciben menores precipitaciones por lo que tienen deficiencia de agua, los arroyos presentan caudales irregulares en los períodos de sequía, con volúmenes bajos. Ocasionalmente se presentan lluvias intensas. Los arroyos son fuente de aprovisionamiento hídrico básico en esta región (Ahumada *et al.*, 2013), para los pobladores que dependen de este recurso para la cría de ganado y consumo personal. El agua de estos arroyos es embalsada en represas, y si no es aprovechada se insume en los sedimentos cuaternarios del pie de la Sierra.

3. Metodología

Se analizó la cobertura nival en la cuenca alta de la Sierra del Aconquija a través del índice NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada) de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS y Sentinel-2A, descargadas de la plataforma <https://eos.com/landviewer> y el producto denieve MOD10A2, descargado de la plataforma <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

El índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), es una medida de la magnitud relativa de la diferencia de reflectancia entre el rango visible del espectro (verde) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Este índice controla la varianza de dos bandas (una en el infrarrojo cercano o en el infrarrojo de onda corta y otra en las partes visibles del espectro). El NDSI es útil para el mapeo de nieve, la cual no solo es muy reflectante en las partes visibles del espectro electromagnético sino también muy absorbente en el infrarrojo cercano (NIR) o en la parte infrarroja de onda corta del espectro electromagnético, mientras que la mayor parte de la reflectancia de las nubes sigue siendo alta en las mismas partes del espectro, lo que permite una buena separación de la mayoría de las nubes y la nieve (Earth Observing System, 2021).

Durante el proceso de selección de las imágenes, se observó que las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A presentan dificultades para determinar correctamente el índice NDSI debido a la constante nubosidad sobre las cumbres de sierra y la resolución temporal de las imágenes (16 días para Landsat 8 y 10 días para Sentinel 2A), lo que implica un amplio rango de días sin observaciones. Se

seleccionaron y descargaron solo las bandas b3 y b6 del satélite Landsat 8, y las bandas b3 y b11 del satélite Sentinel2A, de las escenas libres de nubosidad, lo que permitió el cálculo de la extensión de la cobertura nívea a través del índice NDSI y las alturas máximas, medias y mínimas de nieve. En la Tabla 1, se detallan las fechas de adquisición de las escenas, y su resolución espacial y temporal.

Tabla 1. Fechas y resoluciones de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A)
(Re:Resolución espacial; Rt: Resolución temporal)

Landsat 8 (Path:231; Row:079)				Sentinel 2A		
Año	Día / Mes	Año	Día / Mes	Año	Tilin grid	Día/Mes
2014	27 / Enero	2017	25 / Abril	2019	19JGK	06 / Abril
	27 / Noviembre		12 / Junio		20JKR	
2015	30 / Enero		05 / Diciembre	2021	19JGK	30 / Abril
	04 / Abril	2018	22 / Enero		20JKR	
	10 / Agosto		23 / Febrero	Landsat 8: Re=30m; Rt=16 días Sentinel 2A: Re=10m; Rt:10 días		
	30 / Noviembre	2020	29 / Diciembre			
2016	02 / Febrero	2021	15 / Febrero			

La metodología empleada para procesar las bandas de los satélites Landsat 8 y Sentinel2A se encuentra detallada en el diagrama de flujo de la Figura 2.

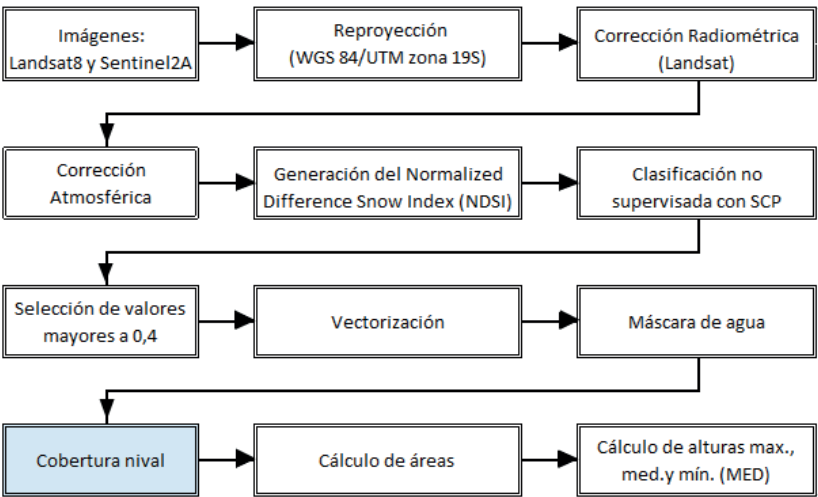


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología aplicada.

Descripción de la metodología:

Reproyección: Las escenas fueron reproyectadas al sistema WGS 84/UTM zona 19S, para ubicarlas en el espacio geográfico de trabajo e integrarlas con otras capas de información en un entorno SIG, utilizando el método cúbico (polinomio de grado 3). **Corrección radiométrica:** con el complemento SCP (Semi-Automatic Classification Plugin del software libre Qgis) se realizó la conversión de DN a niveles de reflectancia TOA solo en las imágenes Landsat 8, dado que los productos Sentinel 2A contienen niveles de reflectancia BOA, que ofrecen datos de reflectancia más próximos a la realidad y niveles de color más realistas. **Corrección atmosférica:** se llevó a cabo con SCP. **Generación del Índice NDSI:** se generó con la calculadora raster, aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{NDSI} = (\text{Green-SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR})$$

Para las imágenes Landsat 8 el canal Green corresponde a la banda 3 y el canal SWIR a la banda 6 y para las imágenes Sentinel 2A el canal Green corresponde a la banda 3 y el canal SWIR a la banda 11. El Índice NDSI toma valores entre -1 y 1, fueron clasificados como nieve aquellos píxeles cuyos valores son mayores a 0,4, propuesto por Dozier, (1989), para la determinación de la cubierta nival mediante datos de teledetección. **Clasificación no supervisada:** se realizó con el módulo SCP. *Selección de valores >0,4:* se seleccionó como cubierta nival todas las celdas cuyo valor es superior a 0,4 del índice NDSI. Este procedimiento discrimina la superficie nevada de otras cubiertas. **Vectorización:** se realizó con la herramienta Conversión “Poligonizar Raster a Vectorial” y con las herramientas de Filtro y Edición se discriminaron las áreas cubiertas con nieve en formato SHP para cada escena. **Máscara de agua:** con la capa vectorial de cursos fluviales, vegas y lagunas (digitalizada previamente sobre imágenes ópticas combinación tierra/agua), se eliminaron zonas clasificadas erróneamente durante el proceso como cobertura nieve, utilizando la herramienta “Diferencia”, para obtener la cobertura nival. El **Cálculo de áreas** que ocuparon las coberturas níveas para el período considerado se realizó con la herramienta calculadora de campos. **Cálculo de alturas máximas, medias y mínimas:** Se procesaron los polígonos que representan las áreas en formato shape (.shp) para calcular las alturas máximas, medias y mínimas de las superficies cartografiadas. En el proceso se excluyeron valores menores a 0,09 ha, ya que la resolución espacial de Landsat 8 y Sentinel 2A (30m y 10m respectivamente) identifican áreas mayores a este valor. Para este propósito, se utilizó la herramienta “Estadística de zona” utilizando el Modelo Digital de Elevación Shuttle Radar Topography Mission SRTM1S28W066V3 con resolución espacial de 1segundo de arco, aproximadamente 30 metros.

Con los datos obtenidos en el procedimiento anterior, y el propósito de determinar las máximas coberturas de nieve relacionadas a las fechas de las observaciones realizadas sobre las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A, se procesó el producto de nieve MOD10A2 del sensor MODIS. Este producto, de nivel 3, estima la extensión máxima de la cubierta de nieve de ocho días (Hall *et al.*, 2001; 2006), con una resolución espacial de 500 metros y temporal

de dos días. Cada píxel indica de manera cualitativa la presencia o ausencia de nieve, registrada al menos en uno de los ocho días considerados. Se procesó el archivo "Maximum Snow Extent" del producto MOD10A2, disponible en formato de archivo multiobjeto.hdf (formato de datos jerárquicos), que contiene datos y metadatos. Los archivos se convirtieron a formato GeoTIFF con el software Hdf-Eos to GIS Conversion Tool (HEG) descargado de <https://hdfeos.org/software/heg.php>, para ser procesados de forma similar al diagrama de flujo de la Figura 2, el cual se resume de la siguiente manera: **Reproyección (WGS 84/UTM zona 19S)-Clasificación no supervisada -Vectorización-Máscara de agua-Cálculo de áreas-Cálculo de alturas máximas, medias y mínimas.**

Además, se generaron tablas y gráficas complementarias al texto utilizando Microsoft Excel (2013). Las tablas obtenidas incluyen las siguientes métricas: el Área Total (que suma todos los polígonos de nieve), el Área Media, el Área Máxima (la mayor extensión de una cobertura), el Área Mínima (la menor extensión de una cobertura), la Altura Máxima (mayor altura alcanzada por la nieve), la Altura Mínima (la menor altura que alcanzó la nieve) y la Altura media. Los gráficos representan los valores sobresalientes de las tablas, tales como: Área total, Área máxima, Altura máxima, Altura media y Altura mínima.

4. Resultados y Análisis

4.1 Distribución de las áreas nevadas

La Figura 3, Figura 4 y Figura 5, muestran la distribución espacial de las coberturas néveas obtenida a partir de imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A (en color blanco), las obtenidas de imágenes MODIS (en color celeste) y los glaciares de escombros (representados por polígonos de color azul). La máxima extensión de cobertura névea se observó el 06 de abril de 2019, la cual cubrió toda la superficie cumbre.

En segundo lugar, en términos de extensión se encuentra la fecha 10 de agosto de 2015, caracterizada por una distribución más uniforme hacia ambas laderas. La mínima cobertura de nieve se observó en fecha 30 de noviembre de 2015 con 652,8 ha. El área con mayor frecuencia de nevadas se localizó en el sector centro-sur de la cumbre y cuenca alta.

4.2 Cálculo de áreas y alturas

4.2.1 Imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos durante el proceso descrito en la sección de Metodología y en la Figura 6 se pueden apreciar las relaciones entre las Áreas Totales y las Áreas Máximas. La fecha con la mayor de Área Total registrada (36,459 ha) corresponde al 06 de abril de 2019, con un valor de Área Máxima de 30503,6 ha. Por otro lado, la fecha con la menor Área Total (652,8 ha) es el 30 de noviembre de 2015, con un Área Máxima de 125,9ha.

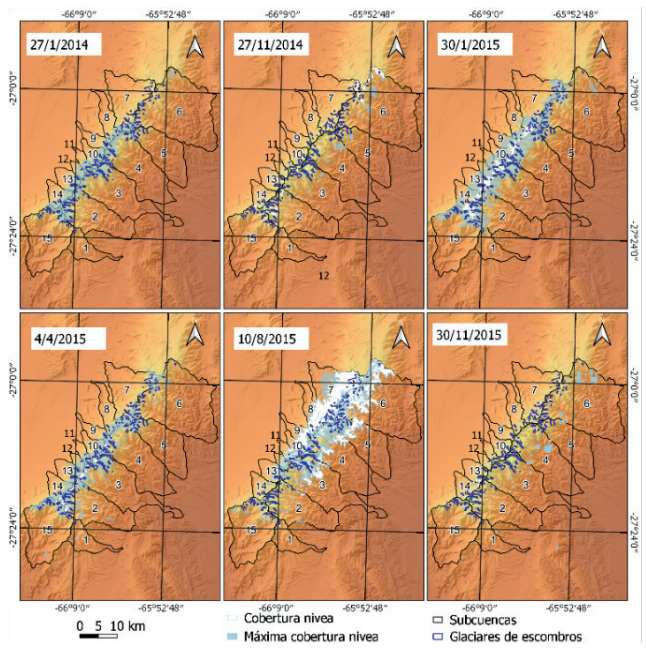


Figura 3. Mapas de coberturas nivales (enero 2014-noviembre 2017).

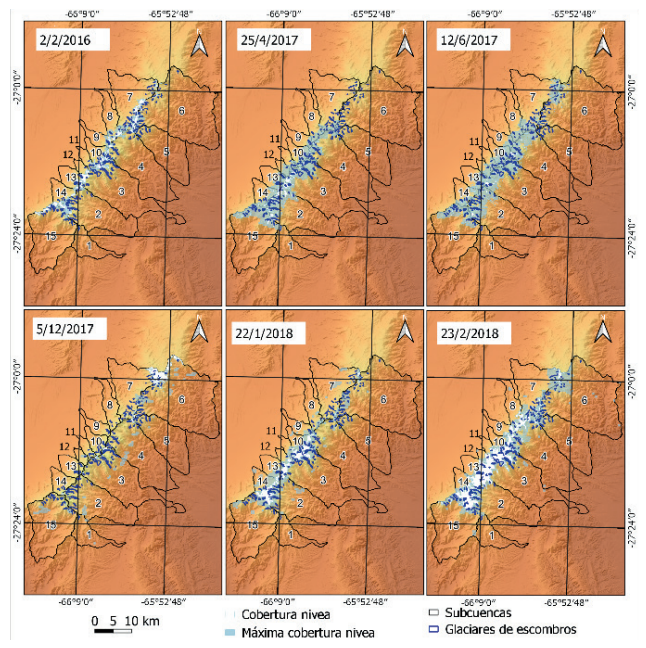


Figura 4. Mapas de coberturas nivales (febrero 2016- febrero 2018).

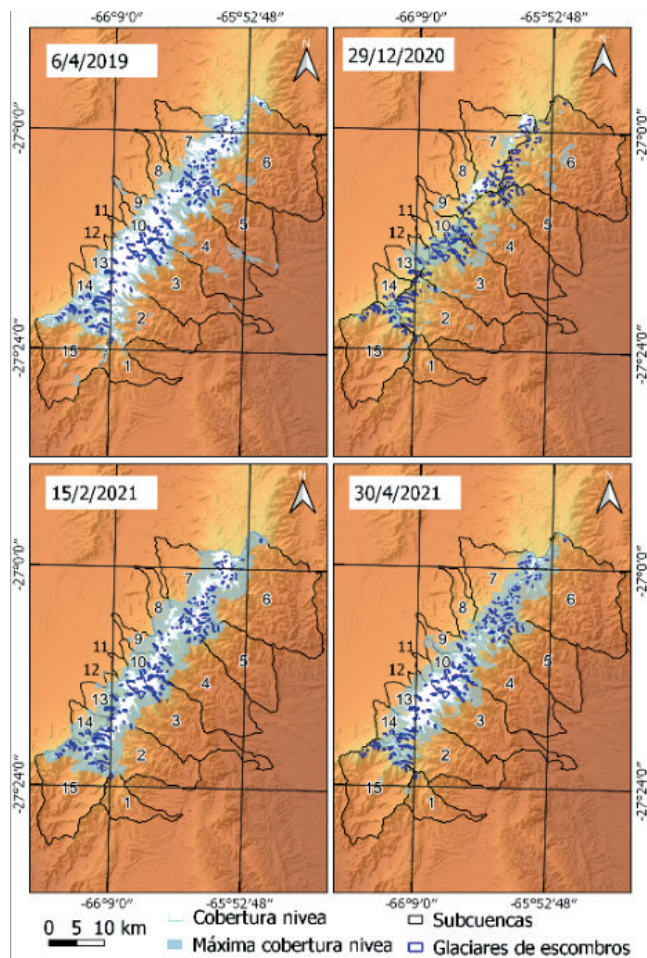


Figura 5. Mapas de coberturas nivales (abril 2019-abril 2021).

En cuanto a las alturas Máximas, estas no han experimentado grandes variaciones, y tienden a manifestarse en las áreas cumbreales, con una altura promedio de 5476,25 msnm. En contraste, las Alturas Mínimas han experimentado notables fluctuaciones. Destaca la Altura Mínima de 2544 msnm observada el 10 de agosto de 2015, en contraposición a la altura mínima de 4622 msnm observada el 22 de enero de 2018.

Durante la máxima nevada que tuvo lugar el 06 de abril de 2019, la cobertura nieve se extendió principalmente en las zonas cumbreales, con una altura mínima de 3467 msnm.

Tabla 2. Fechas, áreas (ha) y alturas (msnm) de las coberturas níveas obtenidas de las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A

Fecha	Area Total	Area Máxima	Area Media	Area Mínima	Altura Máxima	Altura Media	Altura Mínima
27/01/2014	1162,5	379,0	20,39	0,81	5302	4252,0	3202
27/11/2014	1617,3	678,8	9,29	0,64	5500	4631,0	3762
30/01/2015	3160,0	746,2	65,83	1,49	5500	4839,5	4179
04/04/2015	1215,5	228,6	15,99	1,57	5534	5069,5	4605
10/08/2015	30605,7	19925,1	28,9	0,63	5506	4025,0	2544
30/11/2015	652,8	125,9	9,74	1,15	5100	4672,5	4245
02/02/2016	4752,9	810,2	21,7	0,36	5503	4918,0	4333
25/04/2017	3056,3	707,4	10,64	0,7	5534	4719,5	3905
12/06/2017	3458,5	194,7	4,08	1,21	5503	4459,5	3416
05/12/2017	3007,5	2292,8	19,66	0,42	5534	4763,5	3993
22/01/2018	4584,2	1733,4	52,09	0,36	5534	5078,0	4622
23/02/2018	13111,0	8674,0	51,01	0,63	5534	4820,0	4106
06/04/2019	36459,0	30503,6	19,87	0,16	5537	4502,0	3467
29/12/2020	2573,0	857,3	31	0,64	5430	4703,0	3976
15/02/2021	16379,8	14630,6	57,27	0,36	5534	4660,0	3786
30/04/2021	14478,2	10031,0	10,74	0,16	5535	4635,0	3735

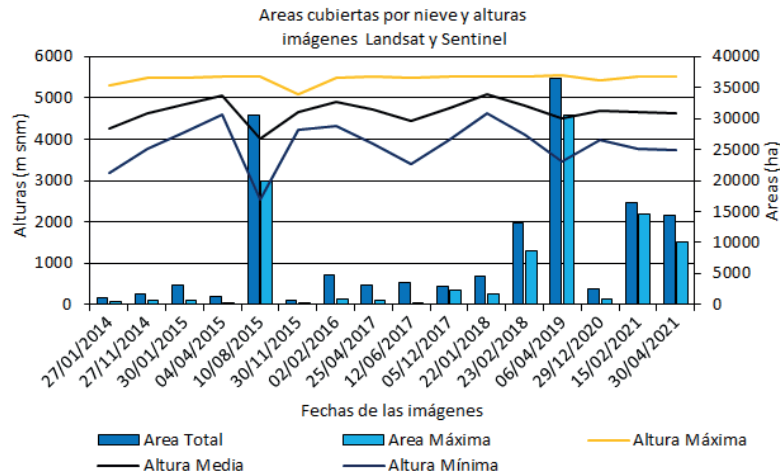


Figura 6. Áreas y alturas de nieve (imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A).

En la Tabla 3 se muestran las áreas que ocupan los glaciares de escombros en las laderas de la sierra, así como los sectores de estas que fueron cubiertos por eventos de nieve. La elaboración de la Tabla 3 se basó en la selección de siete fechas específicas, elegidas en función de extensión superficial y distribución espacial de las coberturas níveas.

Tabla 3. Áreas que ocupan los glaciares de escombros (ha), fechas de los eventos de nieve y superficie cubierta por nieve sobre los glaciares de escombros (ha)

Sierra del Aconquija	Area GE	Nieve 10/08/2015	Nieve 23/02/2018	Nieve 22/01/2018	Nieve 06/04/2019	Nieve 29/12/2020	Nieve 15/02/2021	Nieve 30/04/2021
CN/GE Ladera Sur	197,07	2,19	57,19	8,85	93,61		43,71	2,54
CN/GE Ladera Occidental	484,23	347,64	220,86	43,61	381,35	58,29	181,31	221,8
CN/GE Ladera Oriental	1337,95	211,19	298,97	72,38	1078,73		551,21	692,29

En la Figura 7 se presentan los datos extraídos de la Tabla 3. A partir de la interpretación de los mismos, se desprende que, en la fecha 6 de abril de 2019, la cobertura nívea máxima alcanzó un área de 1078,73 ha, lo cual representa el 80,68% de las 1337,95 ha que abarcan los glaciares de escombros en la ladera oriental. En contraste, la cobertura nívea mínima se registró en fecha 22 de enero de 2018, con una extensión de 72,38 ha. La media de cobertura nívea fue de 484,13 ha.

Los glaciares de escombros de la ladera occidental abarcan una superficie total de 484,23 ha. La máxima extensión de cobertura nívea se alcanzó el 06 de abril de 2019, con un área de 381,35 ha, mientras que la cobertura mínima se registró el 22 de enero de 2018, con tan solo 43,61 ha. En promedio, la cobertura nívea fue de 207,84 ha. Por otro lado, los glaciares de escombros en la ladera sur ocupan una superficie de 197,07 ha. La máxima cobertura nívea se observó el 6 de abril de 2019, alcanzando 93,67 ha, en contraste con la mínima registrada el 10 de agosto de 2015, que fue de 2,19 ha. La cobertura media en esta zona se situó en 29,73 ha.

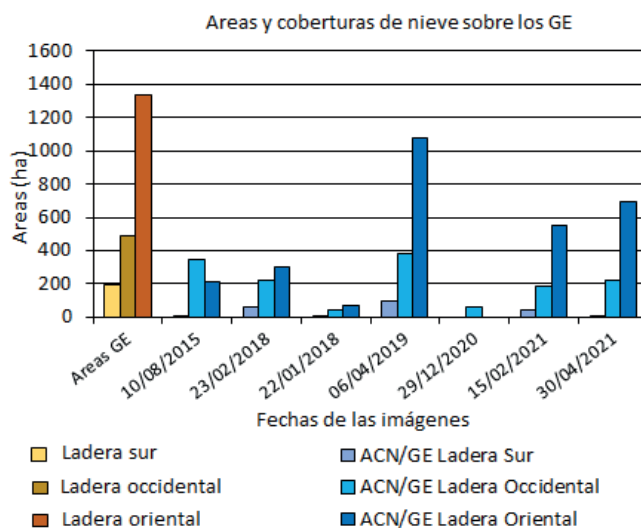


Figura 7. Áreas (ha) GE (Glaciares de Escombros), y ACN/GE (Áreas Cubiertas de Nieve/GE).

4.2.2 Producto de nieve MOD10A2

La Tabla 4 relaciona las fechas de las nevadas observadas en imágenes de Landsat 8 y Sentinel 2A con periodos de ocho días del producto MOD10A2. Se han excluido tres de los 16 periodos analizados (27 de noviembre de 2014, 30 de noviembre de 2015 y 5 de diciembre de 201), debido a su distribución espacial dispersa y su mínima influencia en los glaciares de escombros. En la Figura 8 se representan gráficamente los valores de Área total y Máxima de

la Tabla 4. El período con el mayor valor de Área Total (46569,7 ha) fue del 30 de marzo al 6 de abril de 2019, que incluyó la mayor nevada registrada en las cuencas, observada en imagen Sentinel 2A, con un Área Máxima de 43030,3 ha. El período con menor Área Total (10030,9 ha) fue del 26 de diciembre de 2019 al 2 de enero de 2020, con un Área Máxima de 4451,6 ha.

Las alturas Máximas se mantuvieron constantes en 5534 msnm, cerca de la máxima altitud de la sierra (cerro El Bolsón, 5 550 msnm). Las Alturas Mínimas variaron desde 2740 msnm en el período de 5 al 12 de agosto de 2015 hasta 4347 msnm en el período 30 de marzo al 6 de abril de 2015. La mayor nevada del período 30 de marzo al 6 de abril de 2019 tuvo una Altura Mínima de 3421 msnm.

Tabla 4. Fechas, áreas (ha) y alturas (msnm) de las coberturas níveas, obtenidas con el producto de nieve MOD10A2

Imágenes Landsat y Sentinel	Producto (8días) MOD10A2	Orden	Area Total	Area Máxima	Area Media	Area Mínima	Altura Máxima	Altura Media	Altura Mínima
27/01/2014	25/01-01/02-2014	1	14187,8	13930,6	1418,78	21,43	5534,0	4245,00	3696,00
30/01/2015	25/01-01/02-2015	2	30942,4	30428,4	3094,24	20,96	5534,0	4336,00	3481,00
04/04/2015	30/03-06/04-2015	3	19080,7	16467,1	657,95	19,04	5534,0	4772,23	4347,00
10/08/2015	05/08-12/08-2015	4	25934,2	23654,3	1037,37	18,47	5534,0	4373,38	2740,00
02/02/2016	02/02-09/02-2016	5	22639,6	754,7	359,36	0,2	5534,0	4830,14	3847,00
25/04/2017	23/04-30/04-2017	6	20630,7	20459,2	2947,24	21,43	5534,0	4552,98	3624,00
12/06/2017	10/06-17/06-2017	7	22663,5	20739,3	2060,32	5,59	5534,0	4552,85	3875,00
22/01/2018	17/01-24/01-2018	8	15021,0	11423,0	357,64	14	5534,0	4669,93	3913,00
23/02/2018	18/02-25/02-2018	9	24838,1	19918,5	887,07	0,92	5534,0	4497,44	3554,00
06/04/2019	30/03-06/04-2019	10	46569,7	43030,3	1225,5	13,26	5534,0	4531,32	3421,00
29/12/2020	26/12-02/01-2020	11	10030,9	4451,6	218,06	21,43	5534,0	4396,50	3260,00
15/02/2021	10/02-17/02-2021	12	45216,9	44485,2	1965,95	21,43	5534,0	4540,41	3376,00
30/04/2021	23/04-30/04-2021	13	31628,9	30692,9	1437,68	0,9	5534,0	4388,42	3237,00

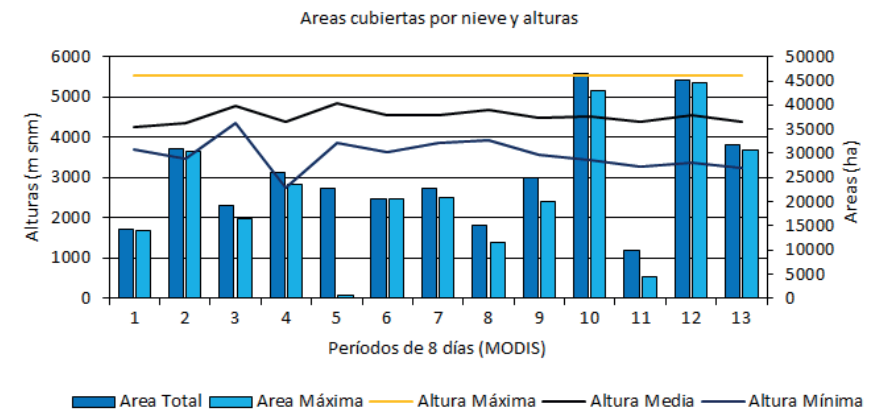


Figura 8. Áreas y alturas de nieve (producto de nieve MOD10A2).

En relación con la extensión máxima de nieve detectada mediante el producto MOD10A2 sobre los glaciares de escombros, se presentan los valores de cobertura en la Tabla 5 y se ilustra gráficamente en la Figura 9.

Tabla 5. Áreas que ocupan los glaciares de escombros (ha), fechas de los eventos de nieve y superficie cubierta por nieve sobre los glaciares de escombros (ha)

Sierra del Aconquija	Áreas GE	MODIS (Períodos de 8 días)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ACN/GE Ladera Sur	197,07	47,59	169,3	132		30,55	193,01	121,54	85	150,5	168,17	33,23	181,8	58,98
ACN/GE Ladera Occidental	484,23	262,7	389,3	306,7	306,6	144,16	265,83	345,71	195	357,5	468,38	94,67	468,4	348,6
ACN/GE Ladera Oriental	1337,95	523,3	988,5	708,6	211,2	157,91	818,14	748,85	508	720,4	1215,5	232,9	1197	855,2

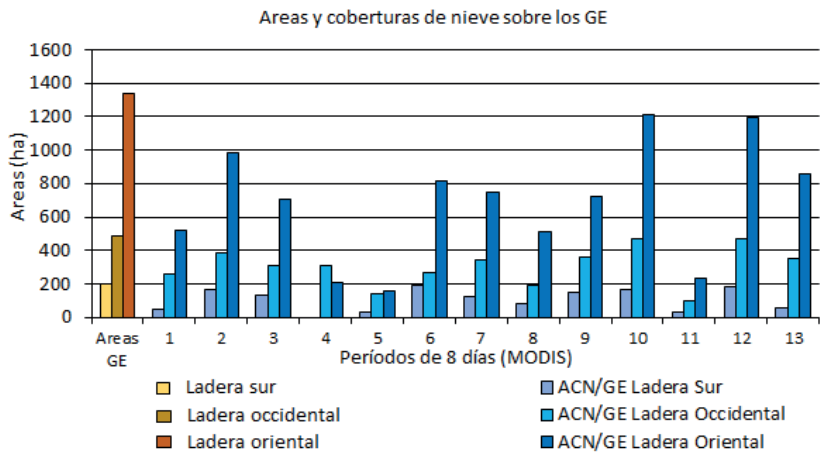


Figura 9. Áreas (ha) GE (Glaciares de Escombros), y ACN/GE (Áreas Cubiertas de Nieve / GE).

Las coberturas de nieve registradas a través del producto MOD10A2 han tenido un impacto más significativo en los glaciares de escombros en la ladera oriental de la sierra. Durante el período de mayor extensión superficial, del 30/03-06/04-2019, se cubrieron 1215,52 ha de las 1337,95 ha que ocupan los glaciares de escombros en esta ladera. La cobertura mínima se registró en el período del 2 al 9 de febrero de 2016, con 157,91 ha cubiertas, mientras que la cobertura promedio fue de 683,53 ha. En lo que respecta a los glaciares de escombros en la ladera occidental, que ocupan 484,23 ha, la cobertura máxima alcanzó las 468,38 ha, mientras que la mínima se observó en el período 26 de diciembre de 2019 al 2 de enero de 2020, con solo 94,67 ha cubiertas. La cobertura media fue de 304,11 ha.

Por último, en el caso de los glaciares de escombros en la ladera sur, que abarcan 197,07 ha, la máxima cobertura se registró en el período 23 al 30 de abril de 2017, con 193,01 ha cubiertas, mientras que la se dio en el período 2 al 9 de febrero de 2016, con solo 30,55 ha. La cobertura media fue de 105,52 ha.

4.2.3 Comparación de cubiertas de nieve entre las imágenes

Landsat 8 y Sentinel 2A y el producto de nieve MOD10A2

En la Tabla 6. se compara en porcentaje (%) las cubiertas de nieve entre las imágenes Landsat 8, Sentinel 2A y el producto MODIS. Los valores positivos

indican el porcentaje en que la cobertura nival de MODIS supera a Landsat 8 y Sentinel 2A, mientras que los valores negativos indican lo contrario. Como puede observarse, entre los años 2014-2021 solo en tres eventos de nieve (valores negativos en celda de color naranja) la cobertura de MODIS fue inferior a la cobertura de Landsat 8 y Sentinel 2A.

Tabla 6. Comparación entre las coberturas obtenidas con imágenes Landsat 8 y Sentinel 2 A con el producto de nieve MOD10A2

Landsat y Sentinel		MODIS		%
Fecha	Áreas Totales	Período	Área Total	
27/01/2014	1162,5	25/01-01/02-2014	14187,8	91,81
27/11/2014	1617,3	25/11-02/12-2014	1114,8	-31,07
30/01/2015	3160,0	25/01-01/02-2015	30942,4	89,79
04/04/2015	1215,5	30/03-06/04-2015	19080,7	93,63
10/08/2015	30605,7	05/08-12/08-2015	25934,2	-15,26
30/11/2015	652,8	25/11-02/12-2015	1664,0	60,77
02/02/2016	4752,9	02/02-09/02-2016	22639,6	79,01
25/04/2017	3056,3	23/04-30/04-2017	20630,7	93,19
12/06/2017	3458,5	10/06-17/06-2017	22663,5	84,74
05/12/2017	3007,5	03/12-10/12-2017	2871,9	-4,51
22/01/2018	4584,2	17/01-24/01-2018	15021,0	69,48
23/02/2018	13111,0	18/02-25/02-2018	24838,1	47,21
06/04/2019	36459,0	30/03-06/04-2019	46569,7	21,71
29/12/2020	2573,0	26/12-02/01-2020	10030,9	74,35
15/02/2021	16379,8	10/02-17/02-2021	45216,9	63,78
30/04/2021	14478,2	23/04-30/04-2021	31628,9	54,22

5. Discusión

La cobertura nival es un elemento físico esencial en las cuencas altas de los sistemas hídricos y constituyen importantes reservorios de agua, especialmente en estado sólido. Los glaciares de escombros acumulan el agua infiltrada que proviene de la fusión diurna de la nieve, lo que contribuye al crecimiento del permafrost durante el invierno (Brenning, 2003). Por lo tanto, el monitoreo del estado de la cobertura de nieve es fundamental para evaluar la existencia del permafrost de montaña.

Este estudio se centró en analizar la extensión de la cobertura de nieve y su relación espacial con los glaciares de escombros, con el objetivo de determinar hasta qué punto las precipitaciones nivas influyen en la preservación de estas geoformas. Aunque el período bajo consideración (2014-2021) no abarca un lapso extenso, el análisis realizado permitió obtener información preliminar de la cobertura nival en la sierra del Aconquija.

La creación de cartografía se logró mediante técnicas de teledetección, aprovechando la respuesta espectral característica de la nieve que la distingue de otras cubiertas. Los resultados obtenidos a partir de la metodología aplicada con imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A han sido altamente satisfactorios. Se seleccionaron imágenes con sumo cuidado, priorizando escenas libres de nubes y sin sombras de nubes sobre las cumbres. Sin embargo, es importante destacar que debido a la resolución temporal de las imágenes (16 días para Landsat

8 y 10 días para Sentinel 2A), además de la exclusión de numerosas escenas debido a la presencia de nubes, se han generado intervalos prolongados sin observaciones disponibles.

Una vez realizados los cálculos de superficie se comprobó como la resolución espacial de las imágenes influyó en la calidad de la información gráfica obtenida. En el caso de las imágenes Landsat 8, que cuentan con una resolución espacial de 30m, se lograron excelentes resultados. Sin embargo, los resultados obtenidos con las imágenes Sentinel2A, que poseen una resolución espacial de 10m, superaron de manera significativa a los de Landsat 8. La aplicación de la metodología con imágenes Sentinel 2A ofrece una clasificación de mayor calidad. Además, el uso de máscaras de agua contribuye significativamente a una diferenciación precisa, reduciendo así la posibilidad de confusiones en la clasificación.

El producto de nieve MOD10A2 de 8 días tiene una resolución espacial de 500 metros y una resolución temporal de 1 a 2 días, lo que facilitó la obtención de una mayor cantidad de información sobre la superficie. Sin embargo, su clasificación es menos detallada, lo que puede dar lugar a errores notables al calcular la extensión de la cobertura de nieve. Los mayores errores se presentaron en la detección de cubiertas de nieve menores, a causa de su resolución espacial, lo que afectan los resultados finales. A pesar de lo mencionado, se utilizó este producto para analizar la extensión máxima que tuvieron las precipitaciones níveas, relacionadas con las fechas de ocurrencia de los eventos de nieve registrados en las imágenes de Landsat8 y Sentinel 2A. Aunque no es posible una comparación perfecta de las superficies obtenidas con estos satélites debido a sus diferentes resoluciones espaciales, en la mayoría de los casos, la superficie calculada utilizando el producto MOD10A2 resultó ser mayor que la calculada con las imágenes de Landsat 8 y Sentinel 2A. Los datos de la Tabla 6 muestran que solo en tres ocasiones la cobertura de nieve detectada por Landsat 8 y Sentinel 2A superó a la del producto MOD10A2.

El estudio destaca una alta correlación espacial entre la ubicación de los glaciares escombros en la cuenca alta de la Sierra del Aconquija y las áreas de máxima extensión de nieve durante el año. Esto sugiere que los glaciares de escombros no solo recibieron el aporte hídrico de la fusión de la nieve acumulada en su superficie, sino también de la nieve acumulada aguas arriba en los sectores que drenan hacia estos, tales como sus áreas de aporte.

Los datos recopilados sobre la evolución y distribución de nieve enriquecen nuestro entendimiento de las precipitaciones níveas en la sierra del Aconquija y sirven de base para investigaciones futuras que permitan combinarla con información sobre la orientación de los valles donde se emplazan los glaciares de escombros y las características del relieve que crean las condiciones para la preservación del permafrost. Un dato esencial es la información sobre la temperatura, la cual podrá ser obtenida de sensores remotos específicos.

6. Conclusiones

- La metodología empleada en este estudio ha posibilitado la cartografía de las áreas cubiertas por nieve desde enero 2014 a abril 2021, mediante el

uso de sensores remotos en bandas ópticas e infrarrojas. Sin embargo, se presentaron limitaciones debido a la presencia de nubes en las cumbres, lo que obstaculizó la correcta visualización de la cobertura nival en las imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2A. Esto resultó en la imposibilidad de observar algunas escenas que habrían sido relevantes en el análisis temporal.

- Mediante el procesamiento de los datos del producto de nieve MOD10A2 del sensor MODIS, se pudo determinar la extensión máxima de las cubiertas de nieve en períodos de 8 días. Estos períodos se seleccionaron en función de las fechas de las imágenes capturadas por los satélites Landsat 8 y Sentinel 2A.
- La comparación de los resultados obtenidos al calcular las áreas entre las Imágenes Landsat y Sentinel con el producto MOD10A2, revela que MOD10A2 ha superado estos valores en un rango de 21,71% al 91,81% en relación a los eventos de nieve registrados en las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A. En contraste, en solo tres casos, los eventos de nieve de Landsat 8 y Sentinel 2A superaron la cobertura de nieve de 8 días de MODIS, con un rango de valores entre 4,51 a 31,7%.
- El área con mayor frecuencia de nevadas se presentó en el sector centro-sur de la cumbre y cuenca alta de ambas laderas.
- Durante los meses de enero a abril, se registraron extensiones de nieve significativas en las cumbres. Destacan especialmente las siguientes fechas y áreas nevadas: el 06 de abril de 2019 (46569,7 ha), el 15 de febrero de 2021 (45216 ha) y el 30 de abril de 2021 (31628,9 ha). Otros eventos importantes de precipitaciones níveas incluyen el 10 de agosto de 2015 (25934,2 ha) y el 12 de junio de 2017 (22663,5 ha).
- Las alturas máximas de nieve no han tenido grandes variaciones, oscilando entre 5100 msnm y 5534 msnm. Sin embargo, se han observado notables variaciones en las alturas mínimas, que han fluctuado entre 2740 msnm y 4347 msnm.
- Las precipitaciones níveas beneficiaron principalmente a los glaciares de escombros en la ladera oriental, seguidos en importancia por los glaciares de escombros en la ladera occidental y en la ladera sur.
- -La máxima precipitación de nieve registrada en imagen Sentinel 2A del 6 de abril de 2019, cubrió un área de 1535,69 ha de las 2019,25 ha de glaciares de escombros. Por otro lado, durante período 30 de marzo al 6 de abril de 2019, la máxima extensión de nieve captada por MODIS, abarcó 1852,07 ha de glaciares de escombros.
- Puede concluirse que durante el lapso analizado en las imágenes Landsat 8 y Sentinel 2A los glaciares de escombros tuvieron una cobertura nívea de 652,53 ha, lo que representa el 32,31% de la superficie total de los glaciares de escombros. Mientras que el producto MODIS indica una cobertura nívea media de 1093 ha., lo que representa el 54,13%.
- Los resultados obtenidos indican que los glaciares de escombros han sido parcialmente cubiertos por las precipitaciones níveas, lo que sugiere que han experimentado aportes hídricos debido a la fusión de la nieve.

Sin embargo, no es posible cuantificar el aporte, ya que en la zona no se encuentran estaciones meteorológicas que permitan estimar los espesores y la evaporación potencial.

Agradecimientos

A la Fundación Miguel Lillo por haber brindado los fondos para la realización de este trabajo, encuadrado en el proyecto G-0032-1: "Los glaciares de escombros en el Holoceno del NW Argentino. Implicancias paleoclimáticas y connotaciones en las actividades humanas actuales".

Bibliografía

- Aceñolaza, F. G., & Alonso, R. N. (2001). Ichno-asociaciones de la transición Precámbrico/Cámbrico en el noroeste de Argentina. *Journal of Iberian Geology*, 27, 11-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=273865>
- Ahumada, A. L., Páez, S. V., & Ibáñez Palacios, G. P. (2013). Los glaciares de escombros en la sierra de Aconquija, Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 25 (1-2), 49-68. DOI: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/26724>
- Alderete, M. C. (1998). Unidades fisiográficas. En M. Gianfrancisco, M.E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y G.F. Aceñolaza (eds.), *Geología de Tucumán* (pp. 29-40). Publicación Especial Colegio Graduados en Ciencias Geológicas, Tucumán.
- Ariza, A. (2006). Análisis del retroceso de glaciares tropicales en los Andes centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. *Revista Politecnica*, 13 (1), 7-23. https://www.researchgate.net/publication/313345265_Analisis_del_Retroceso_de_Glaciares_Tropicales_en_los_Andes_Centrales_de_Colombia_Mediante_Imagenes_Landsat
- Aumassanne, C. M., Beget, M. E., Di Bella, C. M., Oricchio, P., & Gaspari, F. J. (2019). Cobertura de nieve en las cuencas de los ríos Grande y Barrancas (Argentina) y su relación con la morfometría. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 5 (3). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8198726>
- Aumassanne C., Beget M.E., Oricchio P., Di Bella C.M., Gaspari F.J., & Babinec, F. (2022). Dinámica anual e interanual de la cobertura de nieve en la cuenca alta del río Colorado (Argentina) y su relación con el caudal. *Meteorológica*, 47 (2). DOI: <https://doi.org/10.24215/1850468Xe015>
- Bianchi, A. R., Yañez, C. E., & Acuña, L. R. (2005). *Base de datos mensuales de precipitaciones del noroeste argentino*. Proyecto Riesgo Agropecuario: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro Regional Salta-Jujuy. http://www.ora.gob.ar/informes/atlas_noa_precipitaciones.pdf
- Brenning, A. (2003). La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la cordillera de Santiago: Fundamentos y primeros resultados. *Revista Norte Grande*, (30), 7-22. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/article/view/42865>
- Cara, L., Masiokas, M., Viale, M., & Villalba, R. (2016). Análisis de la cobertura nival de la cuenca superior del río Mendoza a partir de imágenes MODIS. *Meteorológica*, 41, 21-36. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-468X2016000100002&lng=es&tln=es

- Cea López, C., Cristóbal Rosello, J. & Pons Fernández, X. (2006). Mejoras en la determinación de la cubierta nival mediante imágenes Landsat y Modis. En M. T. Camacho Olmedo, J. A. Cañete Pérez y J. J. Lara Valle (eds.), *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas* (65-78). Universidad de Granada. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8133122>
- Cea, C., Cristóbal, J., & Pons, X. (2007). Determinación de la superficie nival del pirineo catalán mediante imágenes Landsat y MODIS [Conferencia]. 7ª Semana de Geomática, Barcelona, España. https://www.researchgate.net/publication/239926802_Determinacion_de_la_superficie_nival_del_pirineo_catalan_mediante_imagnes_Landsat_y_MODIS
- Cogliati, M. G., Groch, D., & Finessi, F. G. (2013). Estimación de la cubierta de nieve en el norte de la provincia del Neuquén. *Boletín Geográfico*, 35, 47-58. Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Comahue. ISSN 0326-1735; e-ISSN 2313-903X. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4839823>
- Cogliati, M. G., Groch, D., & Finessi, F. G. (2015). Utilización de productos Terra-Modis para el cálculo de la superficie nival en la Cordillera del Viento (Neuquén, Argentina). En Cynthia Hucailuk, C., y M., Iara (comps.), *Actas de trabajos completos E-ICES 10.- 1a ed.*, Comisión Nacional de Energía Atómica-CNEA. ISBN 978-987-1323-39-5
- Corte, A. E. (1983). Los conceptos: geocriogénicos-parageocriogénicos y glacial-paraglacial en los Andes Centrales de Argentina, latitud 30°. *Anales Instituto Argentino de Nivología y Glaciología*, 83, 43-63.
- Dahri, Z. H., Ahmad, B., Leach, J.H., & Ahmad, S. (2011). Satellite-Based Snowcover Distribution and Associated Snowmelt Runoff Modeling in Swat River Basin of Pakistan. *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences*, 48 (1), 19-32. https://www.researchgate.net/publication/286328119_Satellite-based_snowcover_distribution_and_associated_snowmelt_runoff_modeling_in_Swat_River_Basin_of_Pakistan
- Dozier, J. (1989). Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 28, 9-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90101-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90101-6)
- Finessi F. G. & Cogliati M. G. (septiembre de 2018). Cálculo del área cubierta de nieve en el norte neuquino, con información satelital [conferencia]. XI Jornadas Patagónicas de Geografía y I Congreso Internacional de Geografía de la Patagonia argentino-chilena. Neuquén, Argentina. Eje 5. Ambientes patagónicos: procesos, complejidad y riesgos. https://www.researchgate.net/publication/328367663_CALCULO_DEL_AREA_CUBIERTA_DE_NIEVE_EN_EL_NORTE_NEUQUINO_CON_INFORMACION_SATELITAL
- González Bonorino, F. (1950). *Descripción Geológica de la Hoja 13e, Villa Alberdi, Provincia de Tucumán*. Dirección Nacional de Minería, Boletín 74, 106.
- Haeberli, W. (1983). Permafrost-glacier relationships in the Swiss Alps, today and in the past. IV International Conference on permafrost, National Academy Press Proceedings, 415-420.
- Hall, D.K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2001). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms*. NASA/Goddard Space Flight Center.
- Hall, D.K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 181-194. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00095-0)

- Hall, D. K., Riggs G. A. & Salomonson, V. V. (2006). *MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version5*. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
https://nsidc.org/sites/default/files/mod10_l2-v005-userguide.pdf
- Hall D. K. & Riggs G. A. (2007). Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes*, 21, 1534-1547. <https://doi.org/10.1002/hyp.6715>
- Huang, X., Liang, T., Zhang, X. & Guo, Z. (2011). Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001–2005 snow seasons over Northern Xinjiang, China. *International Journal of Remote Sensing*, 32 (1), 133-152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160903439924>
- Ibáñez Palacios, G. P. (2007). Zonación altitudinal de los procesos criogénicos en la cuenca alta del Río Conventillo, Tucumán, Argentina. *Acta Geológica Lilloana*, 20 (1), 73-82. <https://lillo.org.ar/revis/geo/2008/v20n1/v20n1a06.pdf>
- Klein, A.G. & Stroeve J., (2002). Development and validation of a snow albedo algorithm for the MODIS instrument. *Annals of Glaciology*, 34, 45-52.
DOI: <https://doi.org/10.3189/172756402781817662>
- Köppen, W. (1923). *Die Klimate der Erde. Grundriss der Klimakunde*. Berlin und Leipzig, 369.
- Köppen, W. (1931). *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter Co. XII. Berlin und Leipzig, 388.
- Leal Parra, G. J. (2020). *Una aproximación al mapeo de la línea de nieve mediante la plataforma google earthengine en la zona glaciológica sur de los andes de Chile* [Tesis Grado Geógrafo, Universidad de Concepción Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/548/1/Tesis_Una_Aproximacion_al_Mapeo.Image.Marked.pdf
- Minetti, J. L., Acuña, L. R. & Nieva, J. I. (2005). El régimen pluviométrico del Noroeste Argentino. En Minetti, J. L. (ed.), *El clima del Noroeste Argentino* (169-186), Laboratorio Climatológico Sudamericano. Fundación Carl C. ZonCaldenius.
- Ostertag, G., Frassetto, F., Solorza, R. & Salcedo, A. P. (2008). Determinación del estado nival de las cuencas del Limay y Neuquén a través de la aplicación de teledetección y SIG. *Boletín Geográfico*, 31, 27-41.
<https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/130>
- Paudel, K. P. & Andersen, P. (2011). Monitoring snow cover variability in an agropastoral area in the Trans Himalayan region of Nepal using MODIS data with improved cloud removal methodology. *Remote Sensing of Environment*, 115 (5), 1234-1246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.006>
- Puchulu, M. E. (2000). Clasificaciones de suelos, recopilación, actualización y compilación. En: Muruaga, C.M. y Grosse, P. (eds.), *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. Relatorio del XX Congreso Geológico Argentino*, San Miguel de Tucumán: 874-912. ISBN 978-987-42-6666-8
- Rittger, K., Painter, T. H. & Dozier, J. (2013). Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources*, 51, 367-380.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.002>
- Santillan de Andres, S. E. & Ricci, T. R. (1980). *Geografía de Tucumán*. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional de Tucumán, 1299, 1-175.
- Sayago, J.M., Neder L. & Puchulu, M. E. (1998). Suelos. En M. Gianfrancisco, M. E. Puchulu, J. Durango de Cabrera y G. F. Aceñolaza (eds.), *Geología de Tucumán* (275-284). Publicación Especial Colegio Graduados en Ciencias Geológicas, Tucumán.
- Tahir, A. A., Chevallier, P., Arnaud, Y., Ashraf, M. & Bhatti, M. T. (2015). Snow cover trend and hidrological characteristics of the Astore River basin (Western Himalayas)

and its comparison to the Hunza basin (Karakoram region). *Science of the Total Environment*, 505, 748-761.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.065>

Thapa, A. & Muhammad, S. (2020). Contemporary snow changes in the Karakoram region attributed to improved MODIS data between 2003 and 2018. *Water*, 12 (10), 2681. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12102681>

Tapia, A. 1925. Apuntes sobre el glaciarismo pleistocénico del Nevado del Aconquija. *Anales de la Sociedad Argentina de Geografía*, 1, 313-365.

Telesca, L., Shaban, A., Gascoin, S., Darwich, T., Drapeau, L., Hage, M. E. & Faour, G. (2014). Characterization of the time dynamics of monthly satellite snow cover data on Mountain Chains in Lebanon. *Journal of Hydrology*, 519, 3214-3222.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.037>

Trombotta Liaudat, D. & Ahumada, A. L. (2005). Los fenómenos periglaciares. Identificación, determinación y aplicación. *Opera Lilloana*, 45, 9-131. <https://www.lillo.org.ar/editorial/index.php/publicaciones/catalog/download/400/437/15?inline=1>

Trombotta Liaudat, D., Wainstein, P., Arenson, L. U. (2014). *Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana=Terminological Guide of the South American Geocryology*. 1a ed.-Luján de Cuyo, 128 p. ISBN 978-987-33-5235-5. https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Guia%20terminologica%20geocriologia%20Sudamericana.pdf

Normalización de base de datos de remociones en masa en la Región de Aysén, Chile

Standardization of the Landslides database in the Aysén Region, Chile

Constanza Jorquera-Flores¹

María Ester Gonzalez-Campos²

Recibido 20 de septiembre de 2023; aceptado 20 de diciembre de 2023

RESUMEN

Las remociones en masa (RM) son un tipo de peligro geológico que afectan frecuentemente a la población y conectividad en el área urbana y rural. La toma de decisiones frente a este peligro geológico implica la gestión de datos geográficos. Para ello se requieren bases de datos (BBDD) fáciles de usar y/o actualizar para el análisis frente a eventos de RM. En el Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile se utilizan BBDD que, han sido desarrolladas con distintos objetivos y profesionales, por lo tanto, las mismas no cuentan con una estructura estandarizada y normalizada. Esto dificulta la comprensión y actualización de los distintos campos definidos por los creadores y por consiguiente se crea una nueva BBDD a petición de cada nuevo usuario. Con el objetivo de dar respuesta a esta problemática, este trabajo propone la normalización de una BBDD temática de RM, tomando como referencia elementos de la Norma ISO 19115-1: 2014 y el contexto de aplicación en la región de Aysén. Se definieron listas de dominio para determinados campos y se confeccionó un Diccionario de Datos, recursos que permiten entender e identificar claramente el propósito, alcance y significado de cada campo de la BBDD. La propuesta de BBDD de RM se evaluó y validó a través de una prueba de usabilidad basada en tareas que sea aplicó a diez usuarios con un perfil específico (geólogo, con experiencia en SIG y actualización de BBDD), obteniéndose resultados de las medidas de eficacia y eficiencia. La BBDD se puede utilizar y/o actualizar sin dificultad (eficacia), utilizando los recursos que complementan la misma (eficiencia). La medida de satisfacción se obtuvo

1 Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, e-mail: constanza.jorquera@sernageomin.cl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2758-6104>

2 Universidad de Concepción, Chile, e-mail: mariaesgonzalez@udec.cl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6312-5757>

a partir de la adaptación y aplicación del cuestionario SUS (System Usability Scale) y las puntuaciones indican una valoración de bueno a excelente (>82).

Palabras clave: Base de datos, normalización, ISO 19115-1:2014, remociones en masa, usabilidad.

ABSTRACT

Landslides (LS) are a type of geological hazard that frequently affect the population and connectivity in urban and rural areas. Decision-making in the face of this geological hazard involves the management of geographic data. This requires databases (DB) that are easy to use and/or actualize for the analysis of LS events. The National Geology and Mining Service of Chile uses databases that have been developed with different objectives and by various professionals; therefore, they do not have a standardized and normalized structure. This complicates the understanding and updating of the different fields defined by the creators, resulting in a new database being created at the request of each new user. To address this issue, this study proposes the normalization of a thematic LS database, drawing on elements from the ISO 19115-1:2014 standard and the application context in the Aysén region. Domain lists were defined for certain fields, and a Data Dictionary was compiled, resources that allow for a clear understanding and identification of the purpose, scope, and meaning of each field in the database. The proposed LS database was evaluated and validated through a usability test based on tasks applied to ten users with a specific profile (geologists, experienced in GIS, and database updating), yielding results regarding effectiveness and efficiency measures. The database can be used and/or updated without difficulty (effectiveness), using complementary resources (efficiency). Satisfaction was measured through adaptation and application of the SUS (System Usability Scale) questionnaire, and scores indicate a rating from good to excellent (>82)

Key words: Database, standardization, ISO 19115-1:2014, landslides, usability.

1. Introducción

La región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (Chile) se caracteriza a su vez por su régimen de precipitaciones intenso, con grandes cuencas hidrográficas y de características tormentosas. Los procesos de remociones en masa (RM) son fenómenos naturales muy frecuentes, particularmente en la parte occidental de la región, que reúne las condiciones favorables para que ocurran: relieves montañosos, fuertes pendientes, un suelo muy delgado con escasa cohesión al sustrato y una cobertura vegetal de alta densidad. Todas estas características sumado a las precipitaciones facilitan la ocurrencia de deslizamientos y aluviones (Galilea, 2020). En los últimos 20 años el proceso más común que afecta a la población y conectividad son las remociones en masa. Lo que se traduce en cortes de caminos, suspensión de servicios básicos, daños a infraestructura, fallecidos y lesionados.

El ente técnico público encargado de servir en materias relacionadas con los peligros geológicos es el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Según lo establecido en el Artículo 11 de la Ley N°3.525 de 1980 (Biblioteca del Congreso Nacional, 1980), este organismo técnico tiene entre sus objetivos

la celebración de convenios con el fin de obtener asistencia técnica, brindar servicios, y realizar estudios, investigaciones o asesoramientos técnicos en diversas áreas de la geología. Además, tiene la responsabilidad de emitir alertas relacionadas con la actividad volcánica, erupciones y deslizamientos que puedan afectar a la población, en términos de alcance y gravedad, comunicándolas de manera oportuna y adecuada según lo estipulado en los protocolos establecidos para este fin, al Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED), según lo dispuesto en el Artículo 50 del Decreto Ley 21.364 de 2021 (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021). Esta colaboración entre el organismo técnico y la protección civil subraya la importancia de la información geográfica como elemento crucial en la toma de decisiones.

SERNAGEOMIN dispone de una serie de bases de datos (BBDD) espaciales diseñadas para temáticas geológicas, dentro de las cuales la única que cumple con estándares internacionales es la de Geología Básica. Sin embargo, en el caso de BBDD para los peligros geológicos, estas han sido desarrolladas conforme a diversos objetivos y por distintos profesionales, por lo tanto, carecen de una estructura normalizada o estandarizada que facilite compartirlas y actualizarlas sin la orientación o información previa de sus creadores.

En este contexto, ante la falta de normalización o estandarización de las BBDD sobre eventos de RM, en este artículo se presenta una propuesta de BBDD que permita actualizar y registrar los eventos de RM de forma más ordenada y automatizada, contribuyendo a ahorrar esfuerzos y recursos en la generación de productos que responden a las necesidades particulares de los usuarios. Esta propuesta se contextualiza en la Oficina Técnica de Coyhaique (OTC), generando la estructura de una BBDD normalizada/estandarizada que contenga toda la información de RM para la región de Aysén. Finalmente, la BBDD de RM se evaluó y validó a través de una prueba de usabilidad basada en tareas que sea aplicó a usuarios con un perfil específico, obteniéndose resultados de las medidas de eficacia, eficiencia y satisfacción.

2. Bases de datos e inventarios de RM

Fell *et al.* (2008) define un inventario de remociones en masa como un elemento fundamental para la zonificación de remociones. González de Vallejo (2012) propone que los inventarios son básicamente una localización y distribución espacial de los procesos actuales y pasados y/o zonas afectadas. Debe incluir información de: la ubicación, clasificación, volumen, alcance, estado de actividad, fecha en que ocurrió el evento en una determinada área y otras características de la remoción.

En el caso de Chile se han realizado estudios de inventario en zonas acotadas como el caso de Puerto Aysén, a raíz del terremoto de 2007 en los fiordos, generaron deslizamientos que provocaron tsunamis (Naranjo *et al.*, 2009; Sepúlveda *et al.*, 2010). Serey *et al.* (2019) publicaron un estudio de mapeo puntual de remociones en masa entre los 33°-38° S producto del terremoto del año 2010. Además, en el norte grande de Chile se ha levantado un inventario

poligonal de remociones en masa abarcando un área de 220x80 km² entre Arica e Iquique (Crosta *et al.*, 2014)

En SERNAGEOMIN, el Visor Portal Geomin es el catálogo nacional de información geológica y minera. Esta herramienta incluye las ubicaciones de referencia de numerosas publicaciones, así como el catastro nacional de RM que se limita exclusivamente a los informes de asistencias técnicas realizadas por funcionarios del servicio. Es importante destacar que este registro no es fotointerpretativo, no muestra los inventarios mencionados y no refleja la totalidad de remociones en el territorio. Es importante tener en cuenta que el Visor Portal Geomin, como su nombre lo indica, está diseñado principalmente para la visualización y no permite la descarga de archivos en formato vectorial.

El SERNAGEOMIN dispone de una BBDD creada con el propósito de almacenar el catastro nacional de RM, a la que se puede acceder a través del visualizador de mapas del PortalGEOMIN (Figura 1). Esta BBDD corresponde a una capa vectorial de puntos donde se localizan las asistencias técnicas geológicas que han sido respaldadas por un informe técnico. Los campos de las BBDD se despliegan al seleccionar previamente en el árbol de capas Remociones en Masa/Catastro Remociones en Masa

Si bien, en la parte superior del PortalGEOMIN se indica “Catálogo Nacional de Información Geológica y Minera” se debe indicar que las funcionalidades del visualizador no se corresponden con las que debe ofrecer un servicio de Catálogo (Catalog Service Web - CSW) según el estándar de Open Geospatial Consortium (OGC). El servicio de catálogo o de localización ofrece una de las funcionalidades básicas: el descubrimiento o localización de recursos de información geográfica (datos y servicios). Los servicios de catálogo desempeñan una función de intermediario entre los productores, o proveedores de información, y los clientes

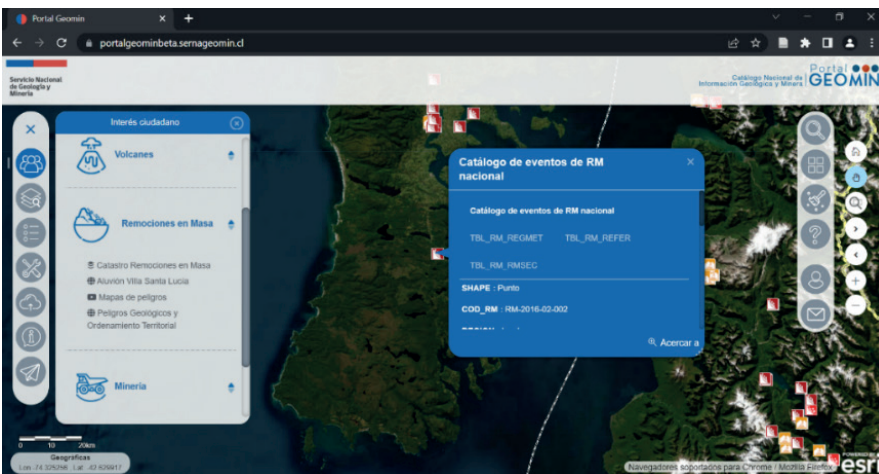


Figura 1. PortalGEOMIN: Vista de campos de BBDD catastro nacional RM.

Fuente: <https://portalgeominbeta.sernageomin.cl>

o consumidores, facilitando la labor de localización y acceso a los productos y servicios (Iniesto & Núñez, 2021).

Basándonos en la estructura de BBDD del catastro nacional del SERNAGEOMIN, se han creado bases prácticamente idénticas para su uso en diversas actividades, como prácticas con estudiantes de pregrado y para otros propósitos a nivel de direcciones y departamentos.

Como contexto de aplicación de la propuesta de BBDD se considera los registros de RM de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Esta región (Figura 2) presenta una vasta extensión, 108.494,40 km² (Biblioteca Nacional, 2005), cuenta con una población total de 103.158 habitantes (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2017), por lo que la densidad poblacional es bastante menor comparado con otras regiones del país. Sumado al hecho de que Coyhaique, la capital regional, alberga a más de la mitad de esa población 57.818 habitantes (INE, 2019).

La región la componen cuatro provincias: Aysén, Coyhaique, General Carrera y Capitán Prat, con una total de 10 comunas: Las Guaitecas, Cisnes, Aysén, Lago Verde, Coyhaique, Río Ibáñez, Chile Chico, Cochrane, Tortel y O'Higgins.

Respecto a los eventos de RM en la región de Aysén, entre 1994 y 2019 se han registrado 25 eventos por SERNAGEOMIN, todos respaldados por los correspondientes informes técnicos. Durante el año 2021, se realizaron cuatro solicitudes de asistencia técnica por RM, y en el transcurso de 2022, se sumaron otros siete eventos adicionales.

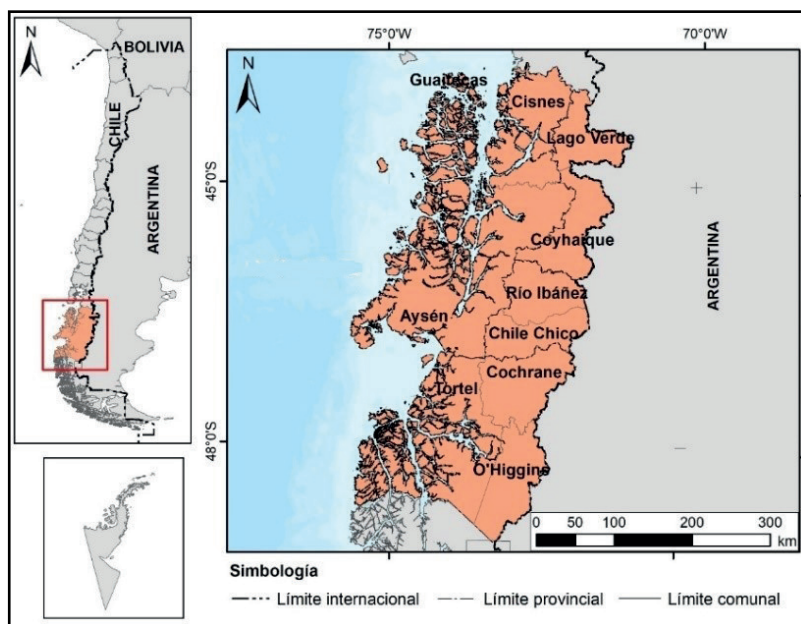


Figura 2. Localización Región de Aysén.

Fuente: <https://portalgeominbeta.sernageomin.cl>

Sin embargo, es importante señalar que, a pesar de estos registros, cada año se reportan más eventos de los que se tienen informes técnicos, principalmente debido a desprendimientos en carreteras y rutas, los cuales suelen ser rápidamente atendidos por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP). Además, existen casos en los que se producen eventos de Riesgo Geológico en áreas no habitadas, aisladas y sin intervención humana directa. De los informes técnicos se desprende que el tipo de movimiento más frecuente corresponde al de flujo y deslizamiento, mientras que el factor desencadenante más común son las precipitaciones y aportes de agua.

3. Materiales y métodos

3.1. Estructura de la base de datos

Se realizó una exhaustiva revisión de las bases de datos temáticas relacionadas con RM disponibles en el SERNAGEOMIN. Este proceso de diagnóstico proporcionó un sólido punto de partida para la propuesta de una nueva BBDD que se presenta en el contexto de este trabajo.

Además, se organizaron múltiples reuniones con los profesionales del Departamento de Geomática del SERNAGEOMIN a nivel nacional. El objetivo de estas reuniones fue comprender las dificultades que enfrentan en la generación de BBDDD, dado que diversos usuarios emplean criterios e intereses particulares en su creación. La falta de normalización/estandarización en estos procedimientos conlleva a la duplicación de recursos y tiempo, pero fundamentalmente afectan la actualización e intercambio eficiente de datos e información.

A partir de la evaluación de las BBDD disponibles, consultas, análisis y trabajo conjunto con profesionales del Departamento de Geología Aplicada de la unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial y de la Unidad de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas a nivel nacional, se consideró como referencia la BBDD del catastro nacional de RM para plantear la propuesta que se presenta en el marco de este trabajo. En la Figura 3 se presenta el modelo lógico de la BBDD del catastro nacional de RM SERNAGEOMIN que presenta la siguiente estructura:

- TBL_RMSEC: Remociones en masa secundarias generadas a partir del evento principal.
- TBL_RM_REGMET: Datos de precipitaciones previo o durante el evento de remoción en masa.
- TBL_RM_REFER: Fuente de información, literatura, prensa, referencia bibliográfica del evento.

Todas las subclases mantienen una cardinalidad 1...* con la superclase, es decir, un evento de RM puede tener muchos datos o ninguno en las tablas relacionadas. Por ejemplo, un evento de RM puede tener varias remociones secundarias asociadas o ninguna, desde cero a varios datos de precipitaciones dependiendo de las estaciones que registren y/o una o varias fuentes de la información que acrediten el evento.

La relación de herencia establece que las tablas secundarias o subclases asociadas a la superclase, en este caso PG_RM_Catálogo, heredan todos los atributos de esta última, evitando así la duplicidad de información. Por otro lado, la relación de composición establece que no puede existir una subclase sin la superclase, lo cual se ve reflejado para las remociones secundarias.

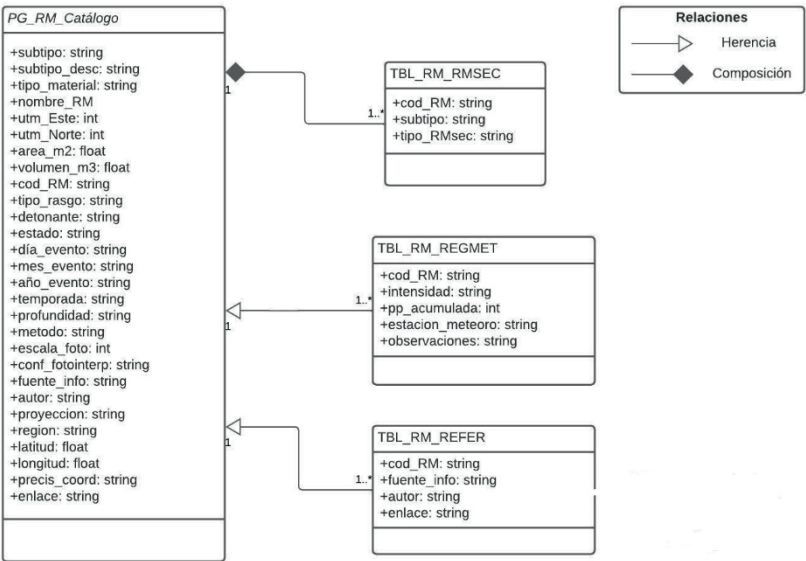


Figura 3. Modelo lógico BBDD catastro nacional de RM SERNAGEOMIN.

Nota: subtipo: Tipo de remoción en masa/ subtipo_desc: Descripción tipo de remoción en masa.

A partir del modelo lógico, surgen diversas observaciones y cuestionamientos relacionados con la comprensión de la estructura de la base de datos. Se plantean interrogantes sobre cómo se completan y actualizan los distintos campos, si existe algún grado de normalización y, sobre todo, si es factible que cualquier usuario con conocimientos técnicos pueda agregar nueva información o actualizar la base de datos.

En varios campos se utiliza el formato “string”, para completar los atributos, cuando se podría normalizar a números según corresponda. Este formato definido para varios atributos de la BBDD, no permite filtros de búsqueda, consultas específicas y hacer estadística con la información almacenada. Además, a partir observaciones e indagaciones realizadas a usuarios se evidencian dificultades para actualizar y/o ampliar la BBDD por cualquier usuario que no sea el creador o previa consultas al mismo.

El objetivo de esta base de datos es almacenar eventos de RM georreferenciados para brindar apoyo en la toma de decisiones previo y durante una emergencia, principalmente en la identificación de aquellas zonas donde

sea más frecuente este tipo de evento. Es importante destacar que, ante el aviso de un evento meteorológico de precipitación importante y en corto periodo de tiempo, se tomen los cursos de acción de manera preventiva en rutas y sectores que han sido afectados previamente por eventos de RM. Como consecuencia es importante que los usuarios que ingresen nueva información a la BBDD sean expertos en la parte técnica geológica para realizar una correcta clasificación de las RM, además, de tener conocimiento en el manejo de software SIG (Sistemas de Información Geográfica) que les permita utilizar la BBDD sin dificultad.

3.2 Estructura de la base de datos

3.2.1 Selección de elementos ISO 19115-1:2014 para normalizar en BBDD

A partir de la revisión y observaciones de los campos de la BBDD de RM y las propuestas de normalización de campos según ISO 19115-1:2014 se han considerado las siguientes 6 secciones de las 18 que conforman la Norma.

- Información de Metadatos
- Información de Identificación
- Información de Linaje
- Información de Sistema de Referencia
- Información de Distribución

En la Tabla 1 se detallan los elementos considerados de las seis secciones seleccionadas para la normalización de la BBDD de RM.

Tabla 1. Elementos ISO 19115-1: 2014 para la propuesta BBDD

Secciones	Entidades	Elementos	Definición del elemento ISO 19915-1:2014	Nombre para propuesta de BBDD de RM
Información del Metadato	MD_Metadata	Identificador del fichero	Identificador único para este registro de metadato (OB)	ID_RM
		Información de la fecha	Fecha (Date; OB): devuelve valores para el año, el mes y el día. La codificación de caracteres de una fecha es una cadena que deberá cumplir el formato para la fecha especificada por ISO 8601: AAAA-MM-DD. Nota: Se debería proporcionar la fecha de creación, también se puede incluir otras	FECHA
		Organización	Nombre de la organización (OB)	ORGANIZACIÓN

Continuación Tabla 1

Secciones	Entidades	Elementos	Definición del elemento ISO 19915-1:2014	Nombre para propuesta de BBDD de RM
		Contacto	Información de contacto (OP)	CONTACTO
		Rol	Función realizada por la parte responsable (OP) Nota: se definen en listas controladas para catálogo, lista de dominio para BBDD	ROL
		Enlace a los metadatos	Sitio en línea donde está disponible el metadato (OP)	ENLACE
Información de identificación	MD_Identification	Extensión	Extensión geográfica (OP): área espacial del recurso resultado de la realización del hecho o proceso de determinar la extensión, dimensiones o cantidad de alguna entidad	EXTENSION_AREA_M2
Información de Linaje	MD_Linaje	Fuente	Linaje (OP): Una descripción de la fuente(s) y el proceso(s) de producción utilizado(s) en la producción del recurso. Fuente (C): información sobre la fuente de datos usada en la creación de los datos especificados en el ámbito	FUENTE
Información del sistema de referencia	MD_ReferenceSystem	Sistema de referencia	Información sobre el sistema de referencia	SIST_REF
		Identificador	Identificador y espacio de códigos (codespace) para el sistema de referencia	ID_SIST_REF
Información de distribución	MD_Distribution	Enlace	Proporciona información sobre los métodos técnicos y los soportes para obtener un recurso de su distribuidor. Enlace (OB): localización (dirección) para el acceso en línea usando una dirección del Localizador de Recurso Uniforme (URL) o un esquema de dirección similar	ENLACE

Fuente: elaboración propia.
Nota: OB: Obligatorio – OP: Opcional.

Para el código de identificación del registro (COD_RM) se propone un formato que considere los aspectos más generales del evento, que tenga una estructura lógica y que a su vez sea lo suficientemente específico para poder realizar búsquedas por filtros de manera rápida y sencilla. En la Figura 4 se presenta la propuesta de codificación para el campo COD_RM que incluye las siglas ‘RM’ que indican ‘Remoción en Masa’, seguidas del número de la región en numeración romana, un guion medio para separar el tercer elemento que representa el año del evento de la Remoción en Masa, y otro guion medio que finaliza con el número correlativo de ingreso a la Base de Datos. Esta estructura permite abarcar los aspectos más generales sin repetir información ya incluida en otros campos de la BBDD.



Figura 4. Estilo codificación de registro de RM.
Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Definición de listas de dominio

Se han definido 10 listas de dominio para los campos de la propuesta de la base de datos. Estas listas abarcan: Tipo de Movimiento, Tipo de Material, Factor Detonante, Actividad, Rol, Comuna, Código Único Territorial, Estación Meteorológica, Tipo de Rasgo y Clasificación de RM. Se proporciona un resumen de estas listas y sus fuentes en la Figura 5.

Tipo de Movimiento	Tipo de Material	Factor Detonante
•Caída •Volcamiento •Deslizamiento •Propagación •Flujo •Deformación gravitacional profunda •Compuesto	•Roca •Suelo/Sedimento •Roca y Suelo/Sedimento •Otro •Información no colectada	•Sismos •Precipitaciones y aportes de agua •Intervención antrópica •Erupción volcánica •Cambios en la geometría •Aplicación de cargas •Acción climática •Otro
Varnes (1978) WP/WLI (1990) Cruden y Varnes (1996) Hungr et al (2001) PMA (2007)	Varnes (1978) PMA (2007) GNS Landslide Database (http://data.gns.cri.nz/landslides/)	González de Vallejo (2012)

Figura 5. Listas de dominio para propuesta de BBDD de RM.

Tipo de Movimiento		Tipo de Material	Factor Detonante	
•Caída •Volcamiento •Deslizamiento •Propagación •Flujo •Deformación gravitacional profunda •Compuesto		•Roca •Suelo/Sedimento •Roca y Suelo/Sedimento •Otro •Información no colectada	•Sismos •Precipitaciones y aportes de agua •Intervención antrópica •Erupción volcánica •Cambios en la geometría •Aplicación de cargas •Acción climática •Otro	
Varnes (1978) WP/WLI (1990) Cruden y Varnes (1996) Hungr et al (2001) PMA (2007)		Varnes (1978) PMA (2007) GNS Landslide Database (http://data.gns.cri.nz/landslides/)	González de Vallejo (2012)	

Actividad	Rol	Comuna y Código Único Territorial Comunal	Estación Meteorológica
•Activo •Reactivado •Suspendido •Inactivo •Sin información	• Autor • Conservador • Creador • Distribuidor • Editor • Investigador principal • Procesador • Propietario • Proveedor del recurso • Punto de contacto • Usuario	•Aysén - 11201 •Cisnes - 11202 •Las Gualtecas - 11203 •Coyhaique - 11101 •Lago Verde - 11102 •Cochrane - 11301 •Tortel - 11302 •O'Higgins - 11303 •Chile Chico - 11401 •Río Ibáñez - 11402	•Listado con estaciones meteorológicas vigentes en la región de Aysén (Ver Anexo II)
WP/WLI (1993) Cruden y Varnes (1996) PMA (2007)	Norma ISO 19115 (2014)	https://www.bcn.cl/sitio/mapoteca/comunas https://www.subdere.gub.cl	Meteochile DGA CIREN

Tipo de Rasgo	Clasificación RM		
•Cicatriz •Cuerpo principal •Corona •Cabeza •Cima •Escarpe principal •Escarpe secundario •Flanco derecho/izquierdo •Pie •Punta •Perímetro del pie •Superficie original del terreno •Superficie de separación •Superficie de falla •Material desplazado •Zona de generación/ arranque/ desprendimiento •Zona de acumulación •Reducción/Depresión •Masa deprimida •Acumulación •Zona de transporte/ propagación/ erosión •Geometría indeterminada	•Caída de roca •Caída de bloque/detrito/arena/limo •Volcamiento de bloque de roca •Volcamiento de grava/arena/limo •Volcamiento flexural de roca •Deslizamiento compuesto de arcilla/limo •Deslizamiento compuesto de roca •Deslizamiento de grava/arena/detritos •Deslizamiento de cuña de roca •Deslizamiento irregular de roca •Deslizamiento traslacional (o planar) de arcilla/limo •Deslizamiento traslacional (o planar) de roca •Deslizamiento rotacional (o planar) de arcilla/limo •Deslizamiento rotacional (o planar) de roca •Propagación de arcilla sensible •Propagación de roca en pendiente	•Propagación por licuefacción de arena/limo •Avalancha de detritos •Avalancha de roca •Crecida de detritos •Deslizamiento-flujo de arcillas sensibles •Deslizamiento-flujo de arena/limo/detritos •Flujo de barro canalizado/ no canalizado •Flujo de detritos canalizado/ no canalizado •Lahar •Flujo de tierra canalizado/ no canalizado •Flujo de turba canalizado/ no canalizado •Flujo seco de /arena/limo/detritos canalizado/ no canalizado •Deformación de laderas de montaña •Deformación de laderas de roca •Deformación de laderas de suelo •Reptación de suelo •Solifluxión •Clasificación indeterminada	
WP/WLI (1993) PMA (2007)	Cruden y Varnes (1996) Hungr et al., (2001) PMA (2007) Hungr et al., (2014)		

Figura 5 (cont.). Listas de dominio para propuesta de BBDD de RM.

3.2.3 Definición de campos opcionales

Durante el análisis de las BBDD disponibles y la identificación de requerimientos, se realizó una consulta a los usuarios del Servicio del SERNAGEOMIN para determinar qué necesidades de información, con fines prácticos, deberían ser incorporadas a la base de datos. Se obtuvieron varias sugerencias que se complementaron con recomendaciones provenientes de organismos internacionales. A continuación, se detallan las incorporaciones propuestas:

- 1) Tipo de movimiento secundario (TIPO_MOV_SEC): En caso de que el movimiento principal evolucione a uno distinto se establece este campo que contiene la misma lista de dominio que el campo TIPO_MOV (Figura 3). Recomendación establecida por la Unesco (UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1990).

Tabla 2. Campo para el tipo de movimiento secundario

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Código	TIPO_MOV_SEC
Nombre	Tipo de movimiento secundario
Definición	Cinemática de un movimiento en masa secundario, producto de uno primario.
Tipo de dato	String o cadena de texto
Unidad de medida	No aplica

Fuente: elaboración propia

- 2) Código único territorial comunal (COD_COMUNA): Al implementar un campo para el código único territorial, permitirá unir a otras bases de datos que contengan información territorial como, por ejemplo: Instituto Nacional de Estadísticas para efectos de población y la Dirección de Vialidad del MOP para las rutas.

Tabla 3. Campo para el código único territorial

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Código	COD_COMUNA
Nombre	Código comuna
Definición	Código único territorial
Tipo de dato	Entero corto
Unidad de medida	No aplica

Fuente: elaboración propia.

- 3) Recomendaciones dispuestas en los informes técnicos por SERNAGEOMIN (RECOMENDACIONES): Campo de valor de texto en cadena con un máximo

de 500 caracteres. En caso de que exista un informe técnico asociado al evento. Campo solicitado por equipo de la Oficina Técnica de Coyhaique.

Tabla 4. Campo para las recomendaciones

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Código	RECOMENDACIONES
Nombre	Recomendaciones realizadas por SERNAGEOMIN
Definición	Recomendaciones publicadas en informe técnico, emitido por SERNAGEOMIN
Tipo de dato	String o cadena de texto
Unidad de medida	No aplica

Fuente: elaboración propia.

4) **Damnificados (DAMNIFICADOS):** Campo de valor numérico entero corto, opcional. Es necesario para la cuantificación del impacto.

Tabla 5. Campo para los damnificados

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Código	DAMNIFICADOS
Nombre	Damnificados
Definición	Personas impactadas y afectadas por el evento de remoción en masa.
Tipo de dato	Entero corto
Unidad de medida	N° de personas

Fuente: elaboración propia.

5) **Fallecidos (FALLECIDOS):** campo de valor numérico entero corto, opcional. Es necesario para la cuantificación del impacto.

Tabla 6. Campo para los fallecidos

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Código	FALLECIDOS
Nombre	Fallecidos
Definición	Personas fallecidas en un evento de remoción en masa determinado
Tipo de dato	Entero corto
Unidad de medida	N° de personas

Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Diccionario de Datos para BBDD de RM

Para complementar la propuesta de la BBDD de RM se confecciono un Diccionario de Datos, recurso que facilitará el cumplimiento de los objetivos de uso y/o actualización de la base de datos sin dificultades.

El Diccionario de Datos contiene 10 secciones: Tipo de movimiento, Tipo de material, Factor detonante, Estado de actividad, Rol, Comuna, Código único territorial comunal, Estación meteorológica, Tipo de rasgo y Clasificación de remociones en masa.

Para el diseño del diccionario se consideró como referencia y/o ejemplo los Diccionarios de Datos de IDECA³ (2019), IDE Chile⁴ e IDE MINAGRI⁵.

Como ejemplo se presenta en la Tabla 7 la sección correspondiente a Tipo de movimiento.

Tabla 7. Diccionario de datos para los campos de Tipo de movimiento

Elemento	Descripción
Nombre	Tipo de movimiento
Alias	TIPO_MOV
Resumen	Consiste en la descripción de los tipos de movimientos de remoción en masa. La cinemática general de la masa desplazada. De acuerdo con Cruden y Varnes (1996) la cinemática de un deslizamiento de tierra, es decir, cómo se distribuye el movimiento a través de la masa desplazada, es uno de los principales criterios para clasificar los deslizamientos de tierra. Sin embargo, de igual importancia es su uso como criterio principal para definir la respuesta adecuada a un deslizamiento de tierra. En este diccionario se describen siete tipos de movimientos, 6 establecidos en primera instancia por Varnes (1978), Cruden y Varnes (1996) los cuales son Caída, Volcamiento, Deslizamiento, Propagación lateral, Flujo y Compacto. Se le agrega a la lista de dominio el concepto de Deformación Gravitacional Profunda (PMA, 2007) para aquellos procesos muy lentos y extensos donde no se distingue una ruptura de falla.
URI (Identificador Uniforme de Recurso)	Cruden & Varnes (1996). <i>Landslide types and processes. Landslides, Investigation and Mitigation</i> , ed. AK Turner and RL Schuster. Transportation Research Board, Special Report, 247, 36475. ISSN 0717-3733 Varnes (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, 11-33
Idioma	Español

³ <https://www.ideca.gov.co/sites/default/files/documentacion/instrutivodd.pdf>

⁴ https://www.goreaysen.cl/controls/neochannels/neo_ch131/appinstances/mediat09/Diccionario_Datos.doc

⁵ <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/diccionario-de-datos/>

Continuación Tabla 7

Elemento	Descripción
Fecha actualización	2022-12-04
Administrador	Oficina Técnica de Coyhaique, Unidad de Asistencias Técnicas y Emergencias Geológicas. Eusebio Lillo 429, Coyhaique
Propietario – Entidad responsable	SERNAGEOMIN

Fuente: elaboración propia.

4. Validación de BBDD de RM: prueba de usabilidad

Para validar la propuesta de BBDD de RM, se realizó una prueba de usabilidad utilizando la metodología basada en tareas. El objetivo principal fue verificar si los usuarios podían comprender la estructura y los campos definidos, así como determinar si podían ingresar registros y actualizar la BBDD sin necesidad de recurrir al creador, utilizando los recursos y materiales proporcionados, como la tabla con la descripción de campos y el diccionario de datos.

La prueba de usabilidad se desarrolló en cuatro etapas, las cuales se esquematizan en la Figura 6. A cada participante de la prueba se asignó un código único a cada usuario con el fin de garantizar la trazabilidad de sus acciones a lo largo de los resultados obtenidos en la aplicación de los distintos instrumentos definidos para la prueba de usabilidad.

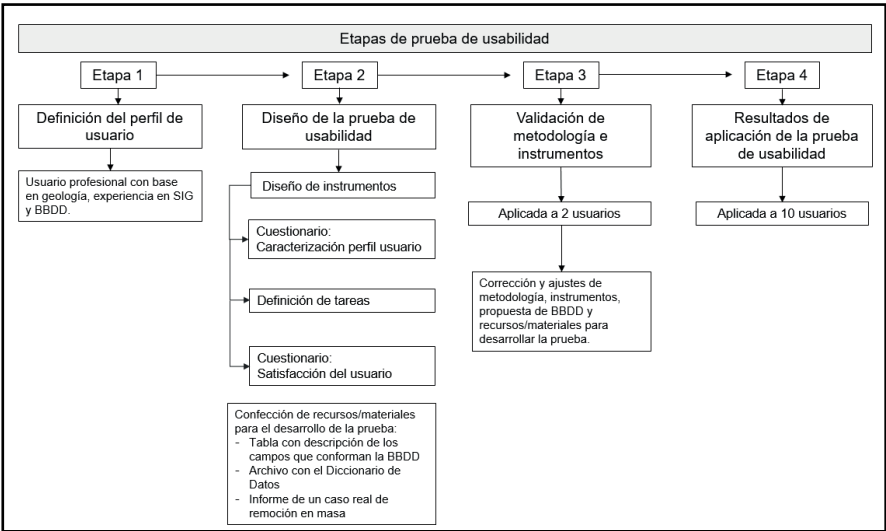


Figura 6. Etapas de prueba de usabilidad.

Fuente: elaboración propia.

4.1 Definición del perfil de usuario

El “usuario” se define como la “Persona que interactúa con el producto” [ISO 9241-11: 1998. 3.7]. Su perfil se caracteriza por el “Conjunto de atributos específicos utilizados por el sistema que pertenecen a un usuario o grupo de usuarios particular” [ISO 9241-151: 2008. 3.19].

En el contexto de esta prueba de usabilidad, se ha definido un perfil de usuario profesional con las siguientes características: utilizan datos e información geográfica, tienen formación básica en geología (titulación en geología o ciencias afines) y poseen conocimientos y habilidades en el manejo de *software* SIG.

Para la selección de los participantes, se optó por un muestreo de tipo incidental, eligiendo la muestra por conveniencia a partir de un grupo de individuos que cumplen las características definidas en el perfil de usuario. Una muestra es incidental cuando se forma con los elementos de la población que están al alcance del investigador. Este es el único criterio para la selección de su muestra, la representatividad de la misma resulta desconocida (Bayardo, 1993).

Se ha definido un total de 10 participantes para la prueba de usabilidad, número aceptado y validado por expertos en usabilidad. Se afirma que empíricamente que entre tres y cinco participantes debería ser suficiente para encontrar el 85% de los problemas (Nielsen, 2000). Por otra parte, considerando la metodología seleccionada, basada en tareas, requiere una muestra pequeña. Según Barnum (2021) se asume que el número de usuarios para poder llevar a cabo las tareas y obtener los resultados de usabilidad generalmente se encuentre entre tres a 10 usuarios.

4.2 Diseño de la prueba de usabilidad

Con el fin de obtener información adicional sobre los participantes de la prueba, se diseñó un cuestionario para caracterizar el perfil de usuario. Este instrumento proporciona datos para identificar posibles relaciones entre el usuario y los resultados obtenidos en la prueba, logrando esto a través de la trazabilidad de cada participante mediante el código único asignado.

La evaluación de usabilidad de la BBDD de RM se basó en la metodología basada en tareas, la cual, debido a las condiciones de distancia entre los usuarios, se realiza de forma remota a través de la plataforma Teams de Microsoft 365 y Google Meet.

Se definieron cinco tareas para la prueba de usabilidad que se detallan en la Tabla 8.

Para realizar las tareas se entregan los siguientes recursos/materiales:

1. Tabla con descripción de los campos que conforman la BBDD
2. Archivo con el Diccionario de Datos en formato Word y Excel para que el usuario defina cuál le resulta más cómodo de usar.
3. Archivo en formato Word con informe de un caso real de RM emitido por Oficina Técnica de Coyhaique (OTC) para asistencia técnica geológica.

Tabla 8. Tareas para prueba de usabilidad

Tareas
1. Descargar recursos para la prueba: -Tabla Descripción de Campos -Diccionario de Datos -Caso remoción en masa para actualizar en base de datos emitido por Oficina Técnica de Coyhaique (OTC) para asistencia técnica geológica. -Base de datos en formato .gdb.
2. Cargar la base de datos en ArcGIS.
3. Actualizar la base de datos con el caso de remoción en masa y guardar.
4. Realizar un filtro de búsqueda por comuna y por tipo de movimiento.
5. Realizar las siguientes consultas a la base de datos: -¿Cuál es el tipo de movimiento de remoción en masa más frecuente en la región de Aysén? -¿Cuál es el detonante más frecuente?

Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizadas las tareas se realizan las preguntas de indagación para obtener información sobre los recursos utilizados, los campos consultados y para recibir retroalimentación por parte de los usuarios. Esto incluye observaciones, sugerencia de cambios, si tuvieron dificultades para actualizar la BBDD, u otros comentarios que deseen compartir.

La aplicación de la prueba de usabilidad basada en tareas, considera la evaluación los tres parámetros que definen la usabilidad:

- Eficacia: Precisión y grado de consecución con que los usuarios logran objetivos establecidos. [ISO 9241-11: 1998. 3.2].
- Se observa y registra si los usuarios lograron realizar las tareas propuestas.
- Eficiencia: Relación entre los recursos empleados y la precisión y grado de consecución con que los usuarios logran objetivos establecidos. [ISO 9241-11: 1998. 3.3]
Se observa y registra qué recursos/materiales utiliza cada usuario para completar las tareas.
- Satisfacción: Ausencia de incomodidad y existencia de actitudes positivas hacia la utilización del producto. [ISO 9241-11: 1998. 3.4]
Se realizó una adaptación del cuestionario System Usability Scale -SUS (Tabla 9). Este instrumento fue diseñado por Brooke (1996) y se ha difundido ampliamente, aplicándose en distintos contextos de uso. El objetivo es proporcionar una medida de las percepciones subjetivas de las personas sobre la usabilidad de un sistema, producto o servicio (Brooke, 2013).

Para medir los resultados del cuestionario SUS, se utilizan las escalas desarrolladas por Bangor, Kortum y Miller (2009), donde se considera la puntuación de cada usuario de forma individual (Figura 7).

Tabla 9. Cuestionario SUS adaptado de Brooke (1996)

Pregunta	Puntaje asignado				
	1= Muy en desacuerdo	2	3	4	5= Muy de acuerdo
1. Creo que me gustaría esta BBDD con frecuencia					
2. Encontré la BBDD innecesariamente complejo					
3. Pensé que la BBDD era fácil de usar					
4. Creo que necesitaría el apoyo de un técnico para ser capaz de usar la BBDD					
5. Encontré las diversas funciones en esta BBDD estaban bien integrados					
6. Pensé que había demasiada inconsistencia en esta BBDD					
7. Me imagino que la mayoría de la gente aprendería a usar esta BBDD muy rápidamente					
8. La BBDD me pareció muy difícil de usar					
9. Me sentí muy cómodo usando la BBDD					
10. Necesito aprender muchas cosas antes de poder usar esta BBDD					

Fuente: elaboración propia adaptado de Brooke (1996).

Nota: Una vez aplicado el cuestionario y obtenida las puntuaciones se deberán realizar los siguientes procedimientos para obtener puntuaciones de 0-4 y así finalizar con un rango de satisfacción de 0-100: a) Los ítems redactados en positivo (preguntas 1,3, 5, 7 y 9) al valor obtenido se restará 1. b) Los ítems redactados en negativo (preguntas 2, 4, 6, 8, 10) el valor obtenido será igual a 5 menos la posición de la calificación en la escala. c) Se suman todas las puntuaciones. d) El total de la suma se multiplica por 2,5 y se obtiene la medida de satisfacción sobre un máximo de 100.

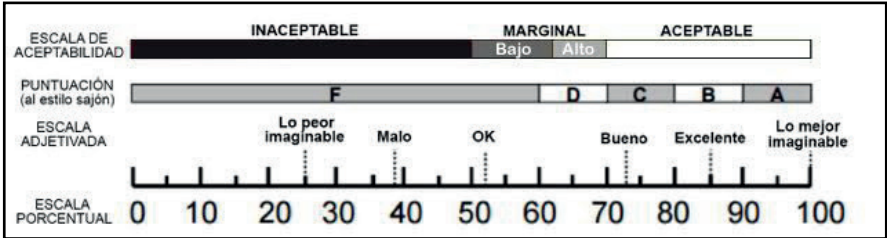


Figura 7. Escalas de calificaciones de puntaje SUS.

Fuente: Bargar, Kortum & Miller (2009, citado en Brooke, 2013).

4.3. Validación de instrumentos y metodología

Para evaluar la metodología definida, ajustar detalles y realizar correcciones, se realizó una prueba de validación con dos usuarios que cumplieran los requisitos del perfil de usuario previamente definido. A partir de los resultados obtenidos, se realizaron en las preguntas del cuestionario de caracterización del perfil de usuario y ajustes en el Diccionario de Datos. En general, ambos usuarios no tuvieron dificultades en realizar las tareas propuesta y lograron actualizar con éxito la BBDD.

4.4. Resultados de aplicación de la prueba de usabilidad

La prueba de usabilidad se aplicó a 10 usuarios que respondían a las características del perfil de usuario definido previamente: utilizan datos e información geográfica, tienen formación básica en geología (titulación en geología o ciencias afines) y tienen conocimiento en el manejo de *software* SIG. Las características de estos usuarios son las siguientes:

- El 30% eran hombres y el 70% eran mujeres.
- El 50% se encontraba en el rango de edad de 20 a 30 años, mientras que el otro 50% está en el rango de 41 a 50 años.
- Todos los usuarios tienen experiencia en actualización de BBDD y conocimiento de *software* SIG, específicamente ArcGIS.
- El 40% de los usuarios también tienen experiencia en el uso del *software* QGIS.
- En cuanto a las dificultades encontradas al trabajar con bases de datos y entornos SIG, el 80% de los usuarios han experimentado la necesidad de buscar información adicional para comprender ciertos atributos o listas de dominio durante las actualizaciones. Además, el 30% ha tenido que ponerse en contacto con el creador de la base de datos o no ha estado seguro de si la información que están añadiendo a un campo determinado era la correcta.

En relación con las tareas que permitieron obtener resultados sobre los parámetros de eficacia y eficiencia de la usabilidad, se destaca:

- Todos los usuarios cumplieron con éxito el objetivo de actualizar la BBDD, además, realizaron sin dificultades la búsqueda por filtro y la consulta solicitada.
- Todos consultaron alguno de los recursos/materiales entregados, la tabla con descripción de los campos que conforman la BBDD y Diccionario de Datos.
- Se observó de manera generalizada que los usuarios enfrentaron dudas al completar los campos "EXTENSION_AREA_M2" y "VOLUMEN_M3". Dado que no se especificaba un cálculo y eran campos opcionales, no estaban seguros si debían ingresar un valor de 0 o dejarlo como "null". Sin embargo, cabe resaltar que la definición de estos campos estaba disponible en la Tabla de Descripción de Campos.
- Otros campos consultados fueron "COD_COMUNA" (5 usuarios), "ROL" (3 usuarios), "ACTIVIDAD" (un usuario), "COMUNA" (un usuario).

En la Tabla 10 se presentan los resultados del cuestionario de SUS (Tabla 9). Se indican las puntuaciones según los procedimientos de Brooke (1996) y las calificaciones según adjetivos y rangos de aceptabilidad definidos por Bangor, *et al.* (2009)

Tabla 10. Puntuaciones SUS, adjetivos y rangos de aceptabilidad

Código de usuario	Puntaje SUS	Calificaciones según adjetivos	Escala de aceptabilidad
U01	92,5	Excelente	Aceptable
U02	95	Excelente	Aceptable
U03	87,5	Excelente	Aceptable
U04	95	Excelente	Aceptable
U05	95	Excelente	Aceptable
U06	87,5	Excelente	Aceptable
U07	82,5	Bueno	Aceptable
U08	92,5	Excelente	Aceptable
U09	97,5	Excelente	Aceptable
U10	97,5	Excelente	Aceptable

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la escala de aceptabilidad propuesta por Bangor *et al.* (2009), los resultados con valores superiores a 70 se consideran “Aceptables” (Figura 7). Por lo tanto, considerando que el puntaje de todos los usuarios es superior a 82.5, se concluye que la propuesta de base de datos cumple con éxito el objetivo y los requisitos para los cuales fue diseñada. Además, al aplicar la escala de adjetivos definida por Bangor *et al.* (2009), se destaca que solo un usuario obtuvo un puntaje inferior a 85, asociado al adjetivo “Bueno”, mientras que el resto de los usuarios obtuvieron puntuaciones superiores a 85, asociadas con el adjetivo “Excelente”. Estas calificaciones indican que la propuesta de la base de datos satisface los requisitos de usabilidad, es eficaz y eficiente, y los usuarios terminan satisfechos al utilizarla.

5. Propuesta final de BBDD de RM

A partir del resultado obtenidos en la prueba de usabilidad se realizaron ajustes menores en la BBDD de acuerdo con las sugerencias de los usuarios. Como consecuencia, se obtuvo el modelo lógico definitivo de la BBDD, el cual se presenta en la Figura 8.

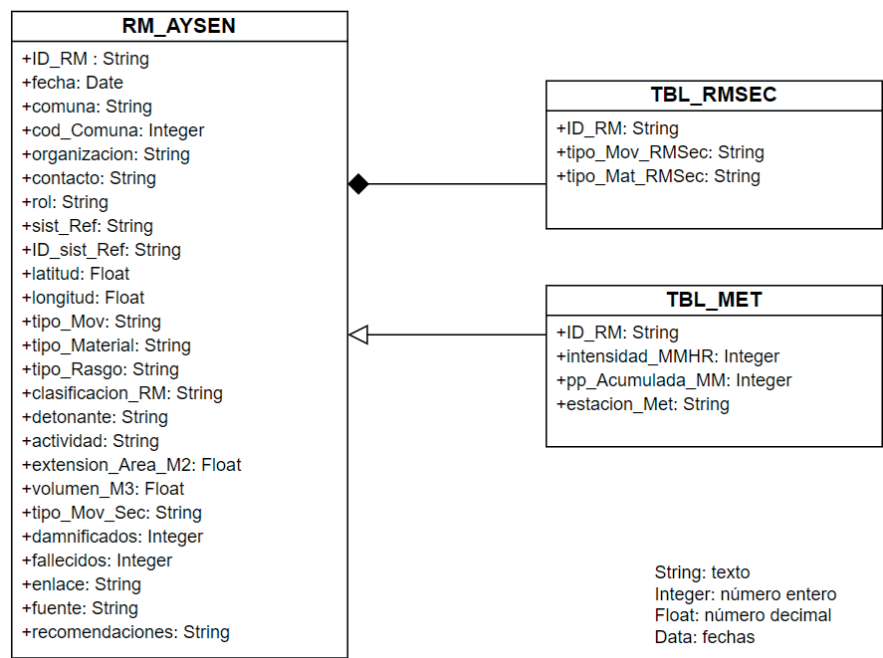


Figura 8. Modelo lógico BBDD para RM.
Fuente: Elaboración propia
Nota: TBL_RMSEC: Remociones en masa secundarias generadas a partir del evento principal. TBL_MET: Datos de precipitaciones previo o durante el evento de remoción en masa.

6. Conclusiones

Este trabajo abordó el desafío de establecer una estructura de base de datos normalizada que pueda ser compartida y actualizada sin la orientación previa de sus creadores. Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de las bases de datos relacionadas con remociones en masa en el SERNAGEOMIN, identificando dificultades en su comprensión y actualización. Se normalizaron los campos de la base de datos de referencia utilizando la Norma ISO 19115-1:2014, se definieron listas de dominio y se elaboró un diccionario de datos. La propuesta fue validada mediante una prueba de usabilidad, donde los usuarios lograron completar las tareas de manera satisfactoria, utilizando los recursos proporcionados y expresando niveles aceptables de eficacia, eficiencia y satisfacción. Se realizaron ajustes en la base de datos a partir de las sugerencias de los usuarios, finalizando con una propuesta mejorada que contribuirá a facilitar la gestión y toma de decisiones en relación a eventos de remoción en masa.

Se recomienda para futuras actualizaciones de la base de datos la adopción de la norma ISO 19115-1:2014 para la definición de nuevos campos. Esto facilitará futuras implementaciones, como la creación de un catálogo de metadatos y la

interoperabilidad con otras bases de datos que sigan esta normativa. Además, es esencial asegurar que cada adición de campo esté respaldada por un objetivo y una función justificados, manteniéndose alineada con el propósito general de la base de datos. Este enfoque garantizará que los usuarios, quienes utilizan la base de datos para la toma de decisiones en eventos de remociones en masa, encuentren la información relevante y útil.

Las listas de dominio se definieron a partir de recomendaciones internacionales y literatura especializada. Su construcción aporta un valor significativo a la base de datos, ya que la mayoría de los campos están definidos mediante listas de dominio en lugar de cadenas de texto, lo que facilita la búsqueda por filtros y completar los campos al momento de añadir nuevos registros de eventos de remoción en masa. Por otra parte, es importante destacar el valor del diccionario de datos como un recurso que permite completar correctamente la base de datos. Recurso que posibilita un mejor manejo de las listas de dominio y proporciona un lenguaje común que garantiza que cualquier usuario pueda entender, utilizar y actualizar la base de datos con los recursos que se le ofrecen, sin necesidad de recurrir a sus creadores. Esto ayuda a evitar la duplicidad y la creación continua de bases de datos debido a la falta de comprensión de las existentes.

Para contribuir a la actualización de la base de datos con nuevos eventos de remociones en masa, se sugiere complementar con la implementación de una aplicación orientada a la integración de la ciudadanía. Esta aplicación permitirá que los ciudadanos contribuyan con información en iniciativas de monitoreo participativas, la cual será verificada por organismos técnicos antes de ser ingresada a la base de datos. Este enfoque busca fomentar la colaboración con la comunidad científica para mejorar la toma de decisiones de manera colaborativa.

Bibliografía

- Bangor, A., Kortum, P. & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an Adjective Rating Scale. *Journal of Usability Studies*, 4 (3), 114-123. Recuperado de https://uxpajournal.org/wp-content/uploads/sites/7/pdf/JUS_Bangor_May2009.pdf
- Barnum, C. M. (2020). *Usability testing essentials: ¡Ready, set....test!* (2nd edition). Morgan Kaufmann, Elsevier. ISBN: 9780128169438.
- Bayardo, M. G. M. (1993). *Introducción a la metodología de la investigación educativa*. DF, México: Progreso.
- Biblioteca del Congreso Nacional (1980). *Decreto Ley 3525, MINERÍA (1980)*. Recuperado en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=7160&idVersion=2015-03-14&idParte=8629048>
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT (2005a, enero 11). Región de Aysén. Bcn.Cl. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region11>
- Biblioteca del Congreso Nacional. SIIT. (2005b, enero 12). Clima y vegetación Región de Aysén. Bcn.Cl. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region11/clima.htm>

- Biblioteca del Congreso Nacional (2021). Ley-21364_07-AGO-2021 Establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, sustituye la ONEMI. Recuperado en <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423&idParte=10257882>
- Brooke, J. (1996). SUS-A Quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189 (194), 4-7.
- Brooke, J. (2013). *SUS: A Retrospective*, 8 (2), 29-40. Recuperado de <https://uxpajournal.org/sus-a-retrospective/>
- Crosta, G. B., Hermanns, R., Frattini, P., Valbuzzi, E. & Valagussa, A. (2014). Large Slope Instabilities in Northern Chile: Inventory, Characterization and Possible Triggers. In K. Sassa, P. Canuti & Y. Yin (eds.), *Landslide Science for a Safer Geoenvironment* (pp. 175-181). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04996-0_28
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43 (1), 27-29. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D. M. & Brown, W. M. (1992). Progress Towards the World Landslide Inventory. In *Landslides: Proc, Sixth International Symposium on Landslides*. D. H. Bell (ed.), Christchurch, New Zealand, Feb. 10-14, A. A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, Netherlands, pp. 59-64.
- Cruden, D. M. & Varnes, D. J. (1996). Chapter 3: Landslide Types and Processes, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247, 36-75. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/269710331_CrudenDMVarnes-DJ1996_Landslide_Types_and_Processes_Transportation_Research_Board_US_National_Academy_of_Sciences_Special_Report_247_36-75/link/5494b0cd0cf20f487d2c4700/download
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102 (3-4), 85-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- Galilea, S. (2020). *Cambio Climático y Desastres Naturales. Una Perspectiva Macrorregional*. Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile. DOI: <https://doi.org/10.34720/qhpt-jy35>
- González de Vallejo, L. (2012). *Ingeniería Geológica*. Pearson Prentice Hall. Madrid: Orimu.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J. & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7 (3), 221-238. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.7.3.221>
- Instituto Nacional de Estadística [INE] (2017) Censo de Población y Vivienda. <https://www.inec.gov.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda/censo-de-poblacion-y-vivienda>
- Iniesto, M. J. & Núñez, A. (2021). *Infraestructura de Datos Espaciales* (1ª ed.). <https://doi.org/10.7419/162.35.2020>
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). 19115-1, *Geographic information—Metadata—Part 1: Fundamentals*.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). 9241-11 (en), *Ergonomics of human-system interaction—Part 11: Usability: Definitions and concepts*.

- Massa, S. M., De Giusti, A. E. & Pesado, P. M. (2012). *Métodos de evaluación de usabilidad: Una propuesta de aplicación en Objetos de Aprendizaje*. XIV Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19339>
- Naranjo, J. A., Arenas, M., Clavero, J. & Muñoz, O. (2009). Tsunamis inducidos por movimientos en masa: Principales efectos durante la crisis sísmica de la Patagonia Archipelágica en Aisén (45° 25' S), Chile. *Andean geology*, 36(1), 137-145. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-71062009000100011>
- Nielsen, J. (2000). *Why You Only Need to Test with 5 Users*. Nielsen Norman Group. <https://www.nngroup.com/articles/why-you-only-need-to-test-with-5-users/>
- Sepúlveda, S. A., Serey, A., Lara, M., Pavez, A. & Rebolledo, S. (2010). Landslides induced by the April 2007 Aysén Fjord earthquake, Chilean Patagonia. *Landslides*, 7 (4), 483-492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0203-2>
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2007) Proyecto Multinacional Andino. *Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Vol. 4. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Serey, A., Piñero-Feliciangeli, L., Sepúlveda, S. A., Poblete, F., Petley, D. N. & Murphy, W. (2019). Landslides induced by the 2010 Chile megathrust earthquake: A comprehensive inventory and correlations with geological and seismic factors. *Landslides*, 16 (6), 1153-1165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01150-6>
- UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1990). A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin of the International Association*.
- Varnes, D. J. (1978). Chapter 2: Slope movement, types and processes. In Schuster, R. L. and Krizek, R. J. (eds.), *Landslides, Analysis and Control, Transportation Research Board* (pp. 11-33). National Academy of Sciences.

Airborne GNSS reflectometry for coastal monitoring of sea state

Monitoreo del estado del mar en zonas costeras usando GNSS reflectometría

Mario Moreno¹

Received September 11, 2023; accepted February 25, 2024

ABSTRACT

Sea level rise and sea state variability, resulting from climate change and global warming, are critical research areas. However, current techniques for observing and monitoring these phenomena have limitations in terms of spatial and temporal resolution, particularly in dynamic coastal zones. GNSS Reflectometry (GNSS-R) is an emerging bistatic radar-based technique that utilizes the GNSS direct (transmitter-receiver) and reflected (transmitter-reflection point-receiver) signals to extract properties of the reflecting surface. This study explores the potential of airborne GNSS-R as a means to monitor sea state in coastal areas by using the Doppler spread and reflectivity as observables. The paper aims to derive a sea state factor from the reflected signal power and the Doppler shift distribution to analyze its correlation with wind speed and significant wave height data obtained from the ERA5 model. The experiment involved four flights conducted along the coast between Calais and Boulogne-sur-Mer, France, in July 2019. A GNSS software receiver processes the direct and reflected signals, tracking and re-tracking the reflected signals with the aid of a specular reflection model. The resulting in-phase and quadrature components are analyzed in the spectral domain every minute to estimate the power, the surface reflectivity, and the relative Doppler shift. The findings reveal that the sea state factor and Doppler spreading are sensitive to sea state conditions, correlated with the ERA5 parameters, and influenced by the elevation angle of GNSS satellites. At low elevations ($E < 10^\circ$), the sea state factor demonstrates an inverse relationship (anti-correlation) with the wind speed and significant wave height, while the Doppler distribution shows a correlation with these

1 German Aerospace Center (DLR), Alemania, e-mail: mario.moreno@dlr.de.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9124-8063>

parameters. Both correlations decrease with increasing elevation angle. This research underscores the potential of airborne GNSS-R for monitoring sea state variability in coastal areas enhancing our understanding of the relationships between GNSS-R measurements and sea state parameters.

Key words: airborne GNSS-Reflectometry, sea state, Doppler spreading, reflectivity, climate change.

ABSTRACT

El aumento del nivel del mar y la variabilidad del estado del mar, como resultado del cambio climático y el calentamiento global, son áreas de investigación críticas. Sin embargo, las técnicas actuales para observar y monitorear estos fenómenos tienen limitaciones en términos de resolución espacial y temporal, especialmente en zonas costeras. GNSS Reflectometría (GNSS-R) es una técnica emergente basada en radar bistático que utiliza señales GNSS directas (transmisor-receptor) y reflejadas (transmisor-punto de reflexión-receptor) para extraer propiedades de la superficie reflejante. Este estudio explora el potencial de la GNSS-R aérea como medio para monitorear el estado del mar en áreas costeras utilizando el efecto Doppler y la reflectividad como observables. El objetivo es calcular un factor de estado del mar (SSF) a partir de la potencia de la señal reflejada y analizar la distribución del desplazamiento Doppler para evaluar su correlación con la velocidad del viento y la altura significativa de las olas obtenidas del modelo ERA5. El experimento consistió en cuatro vuelos realizados entre Calais y Boulogne-sur-Mer (Francia) en Julio de 2019. Las señales se procesan mediante un receptor de software, rastreando las señales reflejadas asistido por un modelo de reflexión especular. Las señales resultantes se analizan en el dominio espectral cada minuto para estimar la reflectividad de la superficie y el desplazamiento Doppler relativo. Los resultados revelan que el SSF y la dispersión Doppler son sensibles a las condiciones del estado del mar, correlacionadas con los parámetros del modelo ERA5 e influenciadas por el ángulo de elevación de los satélites GNSS. A bajas elevaciones ($E < 10^\circ$), el factor de estado del mar muestra una relación inversa con la velocidad del viento y la altura de las olas, mientras que la distribución Doppler muestra una correlación positiva con estos parámetros. Ambas correlaciones disminuyen a medida que aumenta el ángulo de elevación.

Palabras claves: GNSS Reflectometría aerotransportada, estado del mar, Dispersión Doppler, Reflectividad, Cambio climático.

1. Introduction

Climate change is a prominent research topic across various scientific disciplines, attracting significant attention within the scientific community. Over the past few decades, numerous studies have been conducted to evaluate the potential risks and hazards associated with climate change and its implications for both humans and the environment. Coastal areas are marked

by dense population centers, extensive socio-economic activity, and essential infrastructure vital for supporting human livelihoods reliant on ocean resources (Vousdoukas *et al.*, 2018). These coastal regions are dynamic systems subject to a wide array of natural and human-induced influences. As a result, extensive research efforts have been dedicated to monitoring and analyzing the various factors that shape coastal zones and drive their ongoing transformations in response to changing climatic conditions. Figure 1 showcases the evolution of the beach in Chatham, MA, USA, spanning from 1985 to 2020. This visual representation highlights the continuous changes experienced by barrier beaches, primarily driven by rising sea levels, wave dynamics, currents, winds, tides, and human activities.

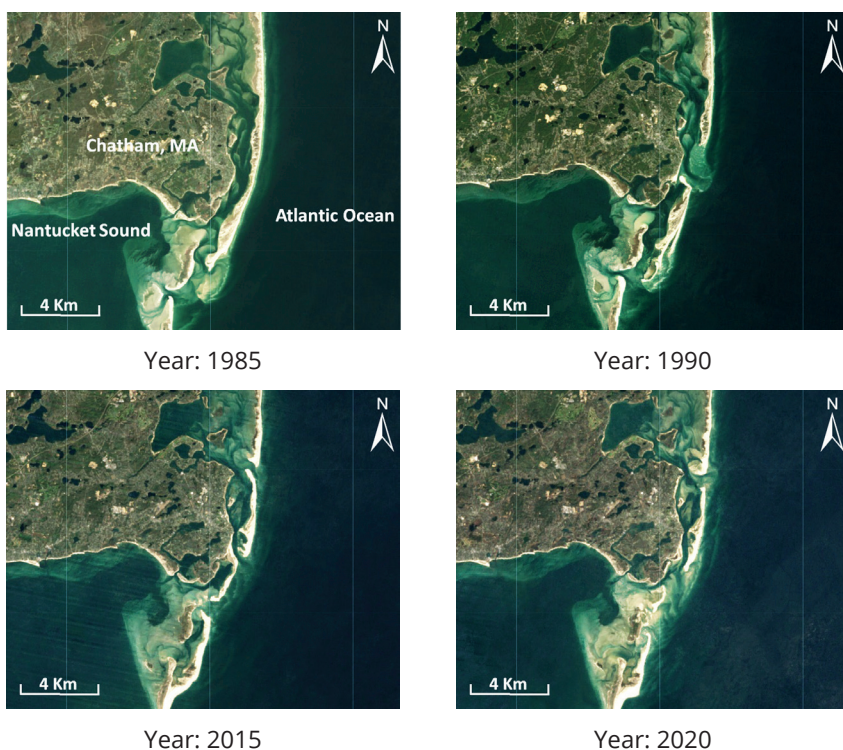


Figure 1. Coastal barrier evolution in Chatham, MA, USA. Satellite images Landsat 5, 7 and 8

Sea level derivation is directly influenced by the heterogeneity of the sea surface and the presence of slopes, which are indicative of surface roughness. Surface roughness, in turn, can be interpreted as sea state, a significant factor of interest in coastal areas. Sea state refers to the characteristics of wind-generated waves, including their height, direction, and period (Webb, 2019). Previous

studies have highlighted the substantial impact of the wind-wave component on sea level variations along coastlines (Bengtsson *et al.*, 2006; Melet *et al.*, 2020). However, techniques for measuring sea level are more advanced compared to those for detecting winds and waves in coastal areas (Benveniste *et al.*, 2019).

In the early 1990s, it was introduced a multi-static radar concept that involved the utilization of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) signals in an interferometric manner (Martín-Neira, 1993) . This approach entailed combining the direct GNSS signal with the signals reflected by the Earth's surface to retrieve the necessary parameters from the reflecting surface at the specular point (reflection point where the elevation angle of incident ray equals the angle of the reflected ray, see Figure 2). This technique, now known as GNSS Reflectometry (GNSS-R), has since been widely adopted and developed for altimetry, sea state estimations, sea ice presence, and soil moisture content or snow detection.

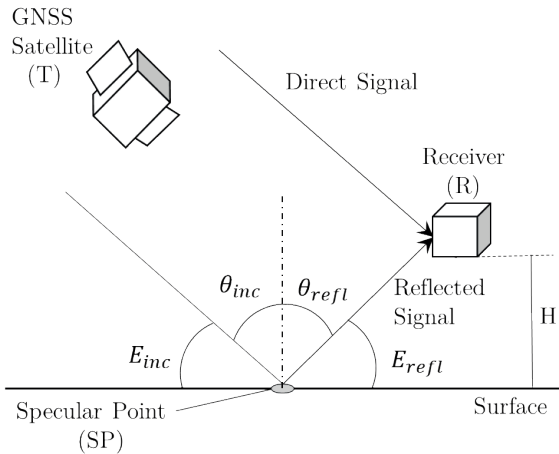


Figure 2. GNSS Reflectometry geometry representation. θ_{inc} is the elevation angles and θ_{refl} is the height between the reflecting surface and the GNSS-R platform.

For ocean applications, GNSS-R experiments have explored different setups and observables to retrieve sea level and sea state information. Alonso-Arroyo *et al.*, (2015) utilized a ground-based setup, employing the Interference Pattern Technique (IPT) to combine direct and reflected signals. They successfully determined Significant Wave Height (SWH) and Mean Sea Surface Level (MSSL) showing accuracies of 5.7 cm and 4.1 cm, respectively. In a similar setup, Geremia-Nievinski *et al.*, (2020) used the Signal to Noise ratio as observable for coastal sea-level altimetry. Comparing with a co-located tide gauge, they obtained a RMSE smaller than 5 cm in sea level estimations. Promising results have also been obtained using airborne and spaceborne data. Semmling *et al.*, (2014) utilized a signal path model that leveraged the time difference between

the reflected and direct signals to estimate Sea Surface Topography (SST) using carrier phase data. Their investigation took place aboard a scientific aircraft positioned at an altitude of approximately 3500 meters, equipped with both an up-looking antenna and two portside-looking antennas. Impressively, they attained centimeter-level precision $\partial T_{\text{std}} < 10$ cm in SST estimation, encompassing elevation angles spanning from 11° to 33° . More recently, Cardellach *et al.*, (2020) utilized data from the spaceborne NASA Cyclone GNSS mission (CyGNSS) to retrieve sea surface altimetry under specific sea state conditions (wind speed below 6 m/s and significant wave height of 1.5 m). They implemented the Grazing Angles geometry condition (elevation angles up to 25°) and Carrier Phase-delay Altimetry (GA CaPA) technique, demonstrating precisions between 3-4 cm. These studies showcase the potential of GNSS-R for retrieving sea level and sea state information using various platforms and techniques.

The paper is organized as follows. Section 2, describes the experiment conducted in July 2019. It includes the study area description the used platform and antenna setup, data set collected, and the processing steps. Section 3 presents the results analyzing correlation between the sea state conditions and the sea state factor and Doppler spread estimations. Finally, Section 4 discusses the findings, limitations, and possible further applications based on the presented methodology.

A web-based geo-visualizer application has been developed as a supplementary tool to present the findings of this study. The interactive application, accessible at <https://reflectometry-9098aae75e7f.herokuapp.com/> utilizes a map-based interface with user-friendly features. It enables users to apply filters to select the complete data set or specific subsets of data and visualize the results through plots. The application enhances the accessibility and usability of the results, providing an intuitive platform for interactive exploration and analysis.

2. Methodology

2.1 Experiment

In July 2019, an airborne GNSS-R measurements campaign was conducted along the Opal Coast in the North Sea, specifically between the cities of Calais and Boulogne-sur-Mer in France. Four flights were executed on the 12th, 15th, 17th, and 19th of July, following the same trajectory at a height of ~ 750 m. Each flight had a duration of approximately 1 hour, covering a total trajectory length of approximately 95 km over the ocean.

It should be noted that due to the limited availability of GPS satellites during the tracking phase along the west-to-east flight segment or insufficient reflection events over the sea surface, the focus of this study is on the North to South flight segment highlighted in orange in Figure 3.



Figure 3. Flight trajectory during measurements camping. The flight trajectory encompassed two distinct legs, with the first leg positioned at a distance of 700 m from the coastline, and the second leg situated at a distance of 2000 m.

Within the North to South flight segment, continuous reflection tracks were successfully retrieved from the selected satellites G1, G7, G8, G10, G11, G16, G18, and G30. Table 1 presents the sea state variations in the study area, characterized by the mean values of wind speed (WS), wind directions, and significant wave height (SWH). These parameters were derived from the ECMWF ERA5 model (Hersbach *et al.*, 2020) , which provides reliable data along the flight trajectory. Among the recorded dates, the lowest sea state conditions were observed on 2019/07/17.

Table 1. Sea state parameters from ERA5 Model

Date	Wind Speed [m/s]	Wind Direction [deg]	SWH [m]
2019/07/12	5.49	117	0.30
2019/07/15	4.29	67	0.58
2019/07/17	2.92	204	0.26
2019/07/19	6.50	240	0.55

The chosen platform is a gyrocopter presented in Figure 4. Gyrocopters are microlight aircraft that utilize autorotation for propulsion, enabling them to fly at low speeds with exceptional maneuverability. These aircraft demonstrate the capability to maintain stability and safety even in challenging weather conditions, including strong winds and turbulence.



Figure 4. Gyrocopter used in the experiment. (1) GNSS - R antenna, (2) Extra GPS antenna + INS for flight control purposes.

For the GNSS-R measurements, a dual-polarization antenna was employed, featuring both right-handed and left-handed circular polarization positioned at the front of the aircraft. The antenna was tilted at an angle of approximately 43° relative to the zenith direction. Due to the absence of significant reflection responses from the left-hand polarized channel, the analysis in this experiment was limited to the signals received from the right-hand polarized channel. The antenna is connected to two receivers: a Syntony Echo-L receiver, which records the raw GPS L1 signals utilized for reflectometry analysis, and a Javad Delta GNSS receiver, which records RINEX messages for accurate trajectory solution during post-processing.

2.2 Data and Processing

The Syntony Echo-L receiver utilized to record GPS L1 signals, sampled the data at a frequency of 16.368 MHz. For each day, four raw datasets were acquired and they categorized as data level 0. Each dataset had a duration of approximately 18 minutes, corresponding to the north-to-south segment of the trajectory. The data level 1 corresponds to the complex direct and reflected signals at a frequency of 50 Hz after the tracking and re-tracking step. These signals are represented by the in-phase (I) and quadrature (Q) components, respectively. Data level 2 consisted of the estimation of the power peak for the Sea State Factor, relative Doppler shift, and Doppler Distribution of the residual reflected signal every 10 seconds. These estimates were derived from the Power Spectral Density and integrated over 1 minute.

The workflow of data processing in Figure 5 include the components and retrievals for each data level established. As mentioned earlier, this study focuses solely on processing the signals with right-handed circular polarization

(RHCP). However, the signals with left-handed circular polarization (LHCP) are recorded and archived for potential future investigations.

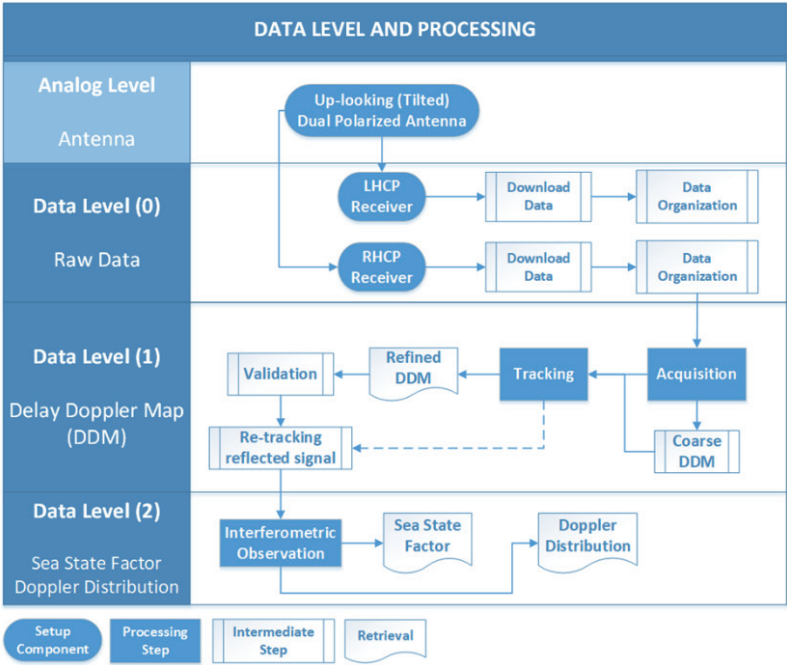


Figure 5. Scheme of data levels and general processing steps. Only right-hand circular polarized signals are processed in this study.

2.2.1 Specular point and path difference model

A geometrical model is employed to determine specular point positions and path differences between the direct and reflected signals as presented in (Semmling *et al.*, 2012). The model incorporates Earth surface curvature and requires transmitter T_x and receiver R_x positions in an Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) frame. T_x is obtained from broadcasted ephemeris, while R_x is determined by postprocessing using nearby GNSS antennas of the French network (IGN, 2019) as reference stations. A spherical surface approximates the Earth's curvature, with an iterative process finding the best-fitting sphere satisfying the specular reflection condition. The final specular point (SP) undergoes geoid undulation correction using the EIGEN-6C2 model (Foerste *et al.*, 2013). The reflected path L^R is established between T_x , SP, and R_x , while the direct path L^D is modeled from T_x to R_x . The path difference $\Delta p(t)$, retrieved from $\Delta p = 2H \sin(E)$, represents the residual between the reflected and direct paths, influenced by changing satellite elevation and aircraft trajectory. Tropospheric and ionospheric delay corrections are excluded from the geometrical path model in this study. Figure 6 displays the

tracks of specular points obtained on July 17th for the eight analyzed satellites, PRN 1, 7, 8, 10, 11, 16, 18, and, 30.

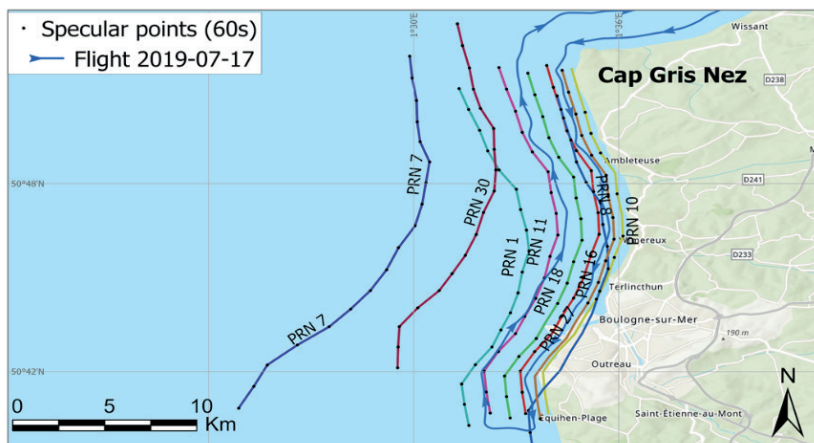


Figure 6. Specular point tracks on July 17th along the coast over sea surface every 60 seconds. Track colors denote the GNSS satellites analyzed: PRN 1, 7, 8, 10, 11, 16, 18, and, 30.

2.2.2 Signal tracking and re-tracking

The GNSS software receiver, based on the methodology described in (Kucwaj *et al.*, 2017), is utilized to calculate the in-phase I_0^R and quadrature Q_0^R components of the reflected signal after the tracking stage. The starting point is the definition of the direct signal (S^D) and reflected signal (S^R) as follows:

$$S^D = A^D CA(t - \tau^D(t)) \sin(2\pi f^D t - \phi^D(t)) + \eta^D(t) \quad (1)$$

$$S^R = A^R CA(t - \tau^D(t) - \Delta_p(t)/c) \sin(2\pi f^D t - \phi^D(t) - \psi(t)) + \eta^R(t) \quad (2)$$

The direct signal amplitude is denoted as A^D , while the reflected signal amplitude is represented by A^R . CA corresponds to the code-division multiple access (CDMA) broadcasted by the GPS satellites. τ^D represents the code delay of the direct signal, and f^D and ϕ^D denote the frequency and phase delay, respectively. η^D and η^R represent zero-mean Gaussian noises. The path difference between the direct and reflected signals is given by Δ_p , with c representing the speed of light. The phase difference between the direct and reflected signals is denoted as ψ .

The tracking module utilizes a Delay Lock Loop DLL, a Phase Lock Loop (PLL), and a Frequency Lock Loop (FLL) with a 20 ms integration time to process the signals (Morton *et al.*, 2020) robustness, and accuracy of performance. It begins with the objectives of signal tracking, followed by a conceptual description of a

closed-loop tracking system. A brief conventional treatment of code delay lock loop (DLL. A local replica of the direct signal is constructed based on the model in equation (1) represented by the in-phase ($p^{I,D}$) and quadrant $p^{Q,D}$ components. Using this replica, the reflected signal is demodulated, and its components I_0^R and Q_0^R are calculated using equations (3) and (4), respectively. These equations involve the measurement index (k) and the coherent integration time (T_c) of the direct signal tracking stage (20 ms)

$$I_0^R = \int_{k T_c}^{(k+1)T_c} S^R(t) p^{I,D}(t) dt \quad (3)$$

$$Q_0^R = \int_{k T_c}^{(k+1)T_c} S^R(t) p^{Q,D}(t) dt \quad (4)$$

Employing the geometrical path difference model, equations (5) and (6) provide the final expressions for (I_0^R) and (Q_0^R). In these equations, η_k^I and η_k^Q represent two independent zero-mean Gaussian noises, and models the normalized correlation function of the CDMA code.

$$I_0^R = \frac{A^R}{2} \Lambda(-\Delta_{p,k}/c) \cos(-\psi_k) + \eta_k^I \quad (5)$$

$$Q_0^R = \frac{A^R}{2} \Lambda(-\Delta_{p,k}/c) \sin(-\psi_k) + \eta_k^Q \quad (6)$$

The removal of data bits from the direct signal is achieved by multiplying the (I_0^R) and (Q_0^R) components with the sign function of the in-phase component. Subsequently, a moving average filter is applied to extract the higher-frequency component of the reflected signal while removing the low-frequency contribution from the direct signal. The reorientation of the complex reflected filtered signal is given by $\gamma_c^R = I_c^R + iQ_c^R$. The phasor γ_c^R undergoes a retracking process using a module based on (Semmling, 2012), which corrects for variations in the transmitter and receiver trajectory, elevation angle, and reflecting surface height over time.

The reflected signal re-tracking process begins by modeling the phase difference using the path difference model Δ_p . The phase difference ψ_p is obtained by taking the modulo of ($\frac{2\pi\Delta_p}{\lambda}, 2\pi$), where λ represents the wavelength of the GPS L1 signal (~0.1904 m). This phase difference is used to construct the phasor representation γ_p , given by $\exp(-i\psi_p)$.

Finally, the re-tracked reflected signal, denoted as the residual phasor γ^R , is obtained by multiplying the phasor representation γ_c^R with the complex conjugate of the modeled phasor γ_p^* . The resulting γ^R is represented as $I^R + iQ^R$.

2.2.3. Reflectivity

In addition to analyzing the signal amplitude in the time domain, the Power Spectral Density (PSD) is employed to examine the power distribution of the residual re-tracked signal in the Doppler domain. Following the approach described in (Semmling *et al.*, 2013), the PSD is defined as the Fourier amplitude of the reflected signal, represented as $|\mathfrak{F}\{\gamma^R\}(f)|$, where $\mathfrak{F}\{\}$ denotes the Fourier Transformation. The computation of the Power Spectral Density is performed at intervals of 10 seconds for each satellite, allowing for an analysis of the power distribution across different Doppler shifts.

In the PSD representation, sharper and distinct peaks are observed in cases of low sea state (2019/07/17). The broadening of the spectrum is also influenced by the roughness of the sea surface, as evidenced by the wider spread observed on 2019/07/12 (during higher sea state) compared to 2019/07/17. This suggests that the presence of multiple scatters in different directions, caused by increased surface roughness, contributes to the incoherent reflection process. Figure 7 illustrates the PSD comparison of the reflected signal for PRN 30 on different days, representing both low and high sea state conditions.

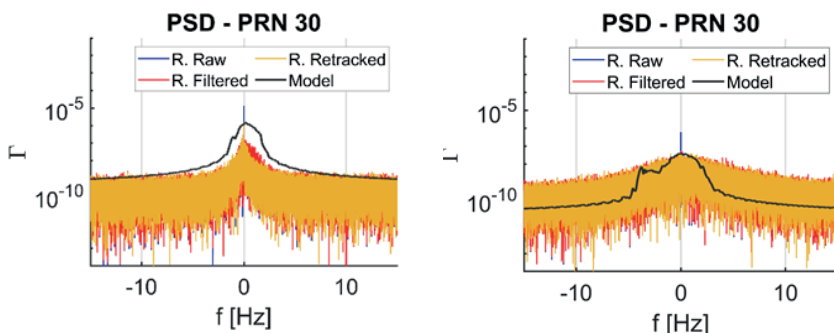


Figure 7. PSD for PRN satellite 30 on July 17th (left) at lower sea state and on July 12th (right) higher sea state. Elevation angle .

The reflectivity, which quantifies the power ratio between the reflected signal and the direct signal, can be computed using the spectral approach. By analyzing the power peaks of the raw complex direct signal ($\max(\Gamma^D)$) and the retracked reflected signal ($\max(\Gamma^R)$), the observed reflectivity (R_o) in decibels [dB] can be determined in equation (7), evaluated over a specific time period (T).

$$R_o = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\max(\Gamma^R)}{\max(\Gamma^D)} \right]_{T_a}^{T_b}$$

Figure 8 displays the plot of reflectivity against the elevation angle. The comparison is made between two dates: 2019/07/17 (dots) and 2019/07/19 (stars), representing low and high sea state conditions, with wind speeds of approximately 2.92 m/s (SWH: 0.26 m) and 6.5 m/s (SWH: 0.55 m) respectively. The black line represents the modeled ocean surface reflectivity. On 2019/07/17 (low sea state), satellites at low and mid-elevation angles closely match the reflectivity model, while high-elevation satellites exceed the modeled values, indicating non-specular reflection. Additionally, on 2019/07/19 (roughest sea surface), the reflectivity is significantly lower for all events.

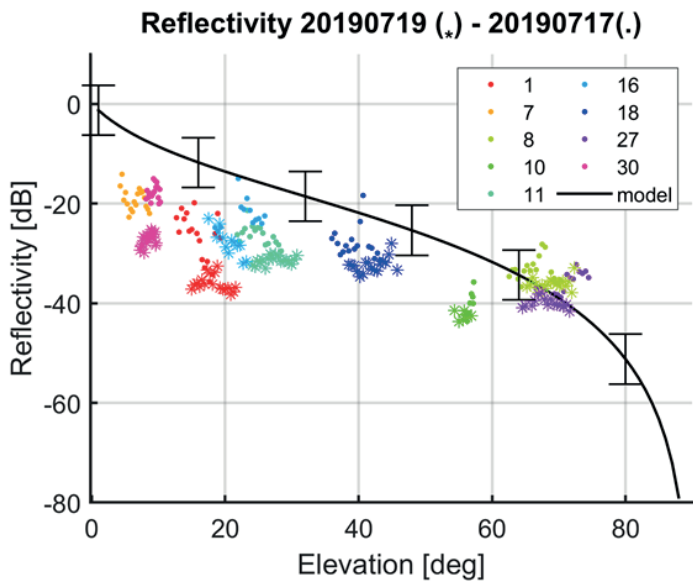


Figure 8. Reflectivity against elevation angles on July 19th (stars) and July 17th (dots). Both days maintain a similar reflectivity-elevation relation with lower values on 19th due to rougher surface.

The residual obtained by subtracting the observer reflectivity R_o from the modeled reflectivity R_m is referred to as the sea state factor ($SSF = R_o - R_m$). This parameter is utilized to assess the correlation between the reflectivity derived from power observations and the accompanying sea state parameters obtained from the ERA5 model. Results are presented in section 3.1.

2.2.4 Doppler Spreading

The analysis of Doppler frequency shift in GNSS-R has proven useful for ocean altimetry and surface ocean roughness estimation, as demonstrated in previous studies (Semmling et al., 2013; Semmling, 2012) and thus Doppler residuals are retrieved. This correction reduces the width of the spectral reflection peak from

3 mHz to less than 10 mHz. Doppler residuals are sensitive to surface height. Lake level is estimated inversely for the residuals at different trial heights. A case study of reflection events is presented. Lake level is estimated using data from antennas with right-handed and left-handed circular polarization. Reference level is determined from tide gauge data for stations around the lake. Mean deviation of estimates from reference level is 50 cm. Doppler shifts of different model corrections are compared. The altimetric correction is the most important, with mean Doppler shifts between 316 and 560 mHz. Mean Doppler shifts are much smaller for baseline correction (less than 0.2 mHz. The PSD analysis within a specific time interval enables the identification of the relative Doppler effect by locating the maximum peak in the frequency domain (x-axis). The displacement from the relative frequency indicates the magnitude of the Doppler shift. Figure 9 shows that during a low sea state (2019/07/17) at low elevation angles, the Doppler shift remains close to zero with minimal variations. Conversely, a higher sea state results in significantly increased variations which are also influenced by the elevation angles.

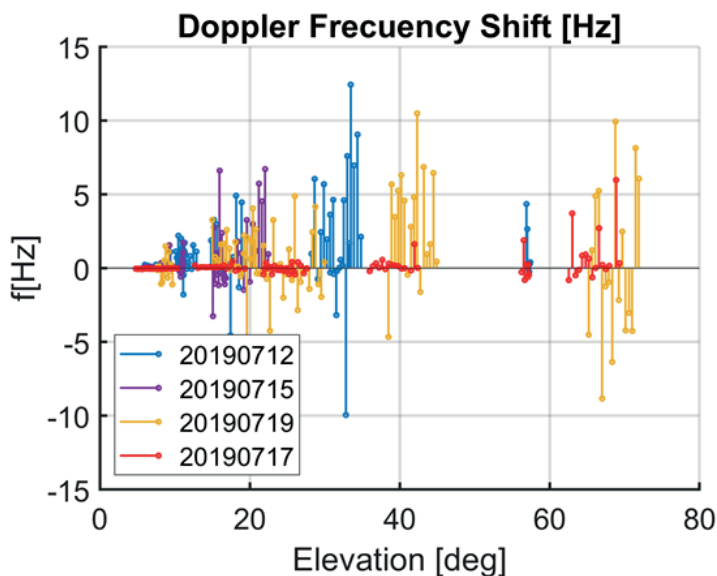


Figure 9. Doppler Frequency shift and elevation angles grouped by date. Doppler distribution has a dependency on elevation angles and sea surface roughness

The Doppler spread, which characterizes the variation of Doppler shifts, is influenced by the random behavior of ocean waves (Elfouhaily et al., 2002). In order to assess the distribution of Doppler shifts related to the sea state in this study, the standard deviation of Doppler shifts is calculated over 120-second

intervals. Results of the Doppler spreading and correlation with sea state conditions are presented in section 3.2.

3. Results

The results presented in this section provide insights into the behavior of events across various ranges of elevation angles. By categorizing the events into different groups, namely low ($E < 10^\circ$), mid ($10^\circ < E < 30^\circ$), and high ($E > 30^\circ$), we can examine how the observed phenomena vary with respect to changes in the elevation angle. This categorization allows for a more comprehensive analysis of the data and helps to identify distinct patterns and trends within each group.

The wind speed and significant wave height data obtained from the ERA5 model are stored in raster format. The spatial resolution of the WS raster is 18 km and 25 km for the SWH, respectively. In order to extract the values at the positions corresponding to the specular points, a geo-interpolation technique is applied. This interpolation method considers both the pixel values and the localization of the points, resulting in a smoother retrieval of the respective parameters.

3.1 Sea state factor (SSF) and sea state

SSF values above zero indicate the dominance of the incoherent component in the reflection process, deviating from the specular reflection model. These events mainly occur at high elevation angles. The sea state factor shows a decreasing trend as sea state conditions vary across different data collection dates. Figure 10 presents the sea state factor results grouped by date, where the SSF values on July 17th are notably the highest, aligning with the reflectivity findings.

Specular reflection occurs primarily at low elevation angles and on surfaces with low roughness. Wind speed is directly proportional to wave generation, and higher wind speeds correspond to increased sea surface roughness. This relationship is supported by Figure 11 (left), which shows that the power loss in the reflected signal, represented by the SSF, aligns with the wind speed retrieved from the ERA5 model, indicating an increase in sea state. At the lowest sea state, the SSF values are concentrated around -10 dB, while at higher sea states, the values are more spread out and can decay to -30 dB. Similarly, the SSF values exhibit a similar trend with SWH (Figure 11 right) indicating a higher loss of reflected signal power as SWH increases. However, the effect is less pronounced due to the larger spatial resolution of the SWH (25 km), which produces interpolated values being similar at adjacent locations.

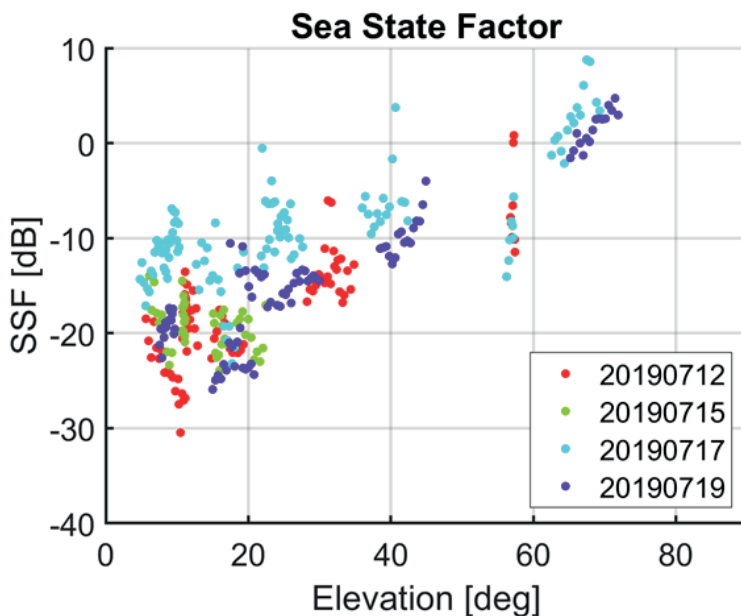


Figure 10. Sea state factor at different elevation angle events grouped by date of data collection.

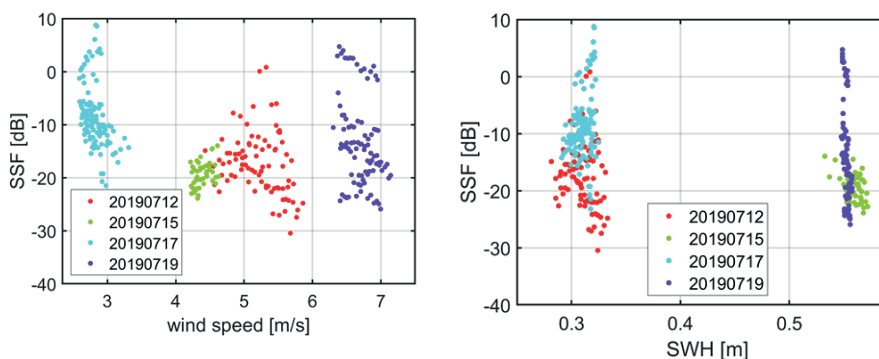


Figure 11. A color-coded plot of the sea state factor (SSF) and wind speed measurements by date on the left side. SSF and SWH by date on the right side.

Figure 12 presents a bivariate map showing the variability of the sea state factor (SSF) in relation to changes in elevation angle at the specular point locations for each satellite. The map uses a color scale, with pink representing SSF and blue representing elevation. By combining both color scales, the resulting map displays high elevation values with high (negative) SSF as dark blue, while low elevation values with low (negative) SSF are represented by light pink.

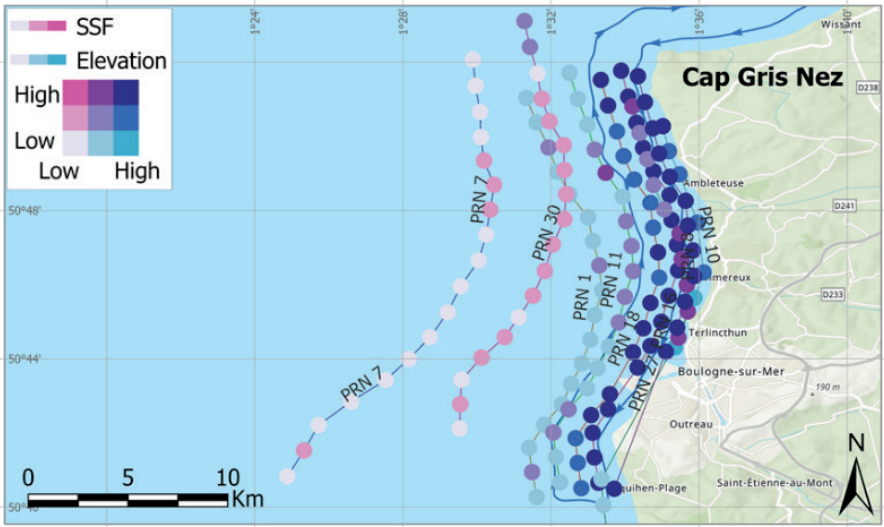


Figure 12. Map of SSF variability with respect to elevation angle change. At high elevation angles, are found highest (negative) sea state factor.

Pearson correlation coefficients between the sea state factor (SSF) and the sea state parameter for different elevation angle groups is presented in Table 2.

The sea state factor exhibits a strong negative correlation with wind speed and a moderate negative correlation with significant wave height (SWH). This negative correlation aligns with the expected behavior, where higher sea states lead to a decrease in the power of the reflected and re-tracked signal, and vice versa. Additionally, a noticeable correlation pattern is observed with respect to elevation angles. Events at low elevation angles demonstrate the highest negative correlation, while the correlation decreases as elevation angles increase. Notably, events in the high elevation range do not exhibit a significant correlation with the sea state factor.

Table 2. Correlations of SSF with wind speed and SWH

Date	SSF	SSF	SSF
Wind Speed	-0.7643	-0.4639	-0.1221
SWH	-0.5066	-0.3775	-0.0007

3.2 Doppler Spreading and sea state

The findings highlight the relationship between the Doppler shift and the combined influence of sea state and elevation angle. The observed mean (Table 3) the Doppler shift on July 17 were notably lower than those recorded on the other dates. This suggests that the sea state and elevation angle conditions

during that period resulted in reduced variations in the Doppler shift. In contrast, higher sea state conditions, combined with elevated elevation angles, led to an increase in both the mean Doppler shift. These results indicate the significant impact of sea state and elevation angle on the Doppler shift measurements, emphasizing their role in the characterization of ocean surface dynamics.

Table 3. Mean values of Doppler shift at different elevation angles

Date	Doppler Mean	Doppler Mean	Doppler Mean
2019/07/12	0.2188	0.9566	1.8949
2019/07/15	0.2459	0.8839	~
2019/07/17	-0.0301	-0.0058	0.4509
2019/07/19	-0.0649	0.5722	1.7262

Figure 12 depicts the bivariate map of Doppler shift variability at various elevation angles along the segment analysis from Cap Gris Nez. Similar to the bivariate map of SFF and elevation angles, a color scale is provided for each variable, with pink representing Doppler frequency shift and blue representing elevation angles. Dark blue corresponds to high elevation values with high Doppler frequency shift, while light pink represents low elevation values with low Doppler frequency shifts. This visualization enables the examination of the spatial distribution of Doppler shift variations in relation to elevation angles along the analyzed segment.

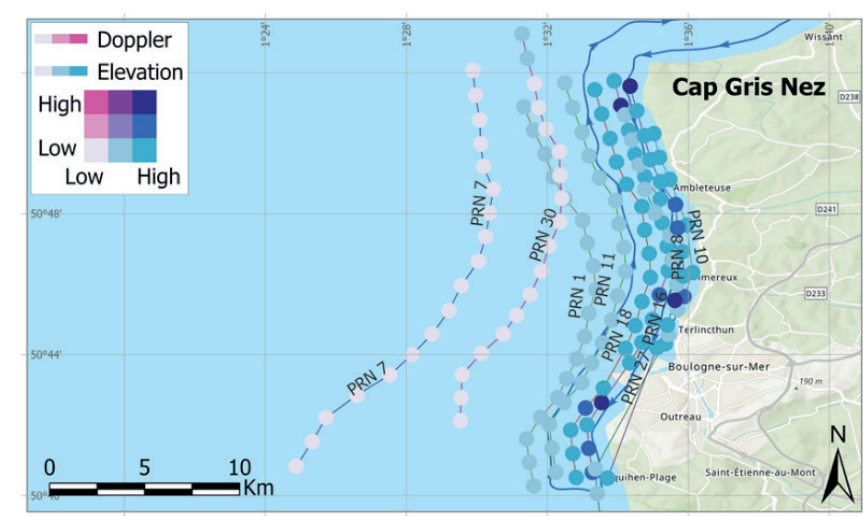


Figure 13. Map of Doppler shift with respect to elevation angle change.

Pearson correlation coefficients between the Doppler spreading and the sea state parameters for different elevation angle groups is presented in Table 4.

The standard deviation of the Doppler shift demonstrates a strong positive Pearson correlation with wind speed and SWH. This positive correlation indicates that increasing sea state conditions lead to higher variations in the Doppler shift, as depicted in Figure 9. Furthermore, the correlation between the Doppler spreading and sea state parameters is influenced by the transmitter elevation angles. The strongest correlation is observed at low elevation angles, while it significantly decreases for events with elevations above 10°. In the mid and high elevation ranges, events exhibit a moderate correlation with sea state parameters, with no significant changes in correlation within these elevation ranges. This implies that at higher elevation angles, the relationship between the Doppler spreading and the sea state parameters becomes weaker, indicating a lesser impact of sea state conditions on the observed Doppler shift variability.

Table 4. Correlations of SSF with wind speed and SWH

<i>Parameter</i>	<i>Doppler Spread</i>	<i>Doppler Spread</i>	<i>Doppler Spread</i>
	<i>E < 10°</i>	<i>10° < E < 30°</i>	<i>E > 30°</i>
Wind Speed	0.9421	0.6395	0.6080
SWH	0.8530	0.6061	0.5691

4. Discussion and conclusions

Coastal areas, vulnerable to climate change-induced sea level rise and sea state variability, can be monitored using GNSS reflectometry. This study introduces a novel approach to examine sea state parameters in these zones by analyzing GNSS satellite signals. Previous studies have demonstrated the potential of GNSS reflectometry in ground-based and space-borne experiments for sea state retrievals. This experiment expands on that research by investigating the sensitivity of the reflected signal to sea state changes using low-altitude airborne measurements, aiming to estimate wind speed and significant wave height in future work.

The results demonstrate a correlation between the reflectometry retrievals and sea state parameters from ERA5, indicating the feasibility of retrieving sea state (surface roughness) from airborne GNSS-R measurements in coastal zones. The sea state factor exhibits a high and moderate degree of anti-correlation with wind speed and significant wave height (SWH), respectively, depending on the elevation angle. Strong anti-correlations are observed at low elevation angles (E<10°), while the correlation weakens at higher elevations, aligning with the specular reflection model.

The Doppler spread, a measure of the variation in Doppler frequency shift, is highly responsive to changes in sea surface roughness. It demonstrates lower values during periods of calm sea states and higher values during times of more turbulent sea conditions, especially at low elevations. The Doppler spreading

exhibits a significant correlation with wind speed and significant wave height, particularly noticeable at low elevation angles. However, as the elevation angle increases, the correlation gradually diminishes.

In addition, in situ observations are essential for cross-validating the results obtained from remote sensing technique GNSS-R. These ground-based measurements provide a crucial reference point to assess the accuracy and reliability of the sea state parameters correlation.

The experimental setup, including the up-looking antenna and receiver configuration, performed well for data collection. The analysis focused on signals from the RHCP receiver, with future work considering LHCP signals and the correction of antenna gain pattern. Additionally, alternative antenna setups and configurations, such as side-looking or down-looking antennas as presented in (Issa *et al.*, 2021), have demonstrated significant improvements in the final results. This highlights the importance of exploring different antenna arrangements to optimize signal reception and enhance the accuracy of sea state parameter retrievals in GNSS-R studies.

The selected gyrocopter platform proved to be suitable, facilitating stable flights aligned with the flight plan. Signal losses were observed in sections with significant changes in the gyrocopter's sight direction, attributed to antenna orientation and aircraft frame obstruction. Different antenna setups and flight trajectories can be considered for future experiments to optimize signal collection.

Drawing from the findings, there exists a promising opportunity to formulate a methodology for precise characterization of the sea surface through GNSS-R airborne measurements. However, factors such as precise receiver positioning, analysis of height fluctuations and aircraft attitude, and consideration of tropospheric and ionospheric corrections are crucial. Scaling the methodology to space-borne measurements requires further research. Additionally, investigating the correlation between wind direction and Doppler retrievals from GNSS-R and developing models for deriving wind direction from airborne data would be valuable areas of future study.

Bibliography

- Alonso-Arroyo, A., Camps, A., Park, H., Pascual, D., Onrubia, R. & Martin, F. (2015). Retrieval of Significant Wave Height and Mean Sea Surface Level Using the GNSS-R Interference Pattern Technique: Results From a Three-Month Field Campaign. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53 (6), 3198-3209.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2371540>
- Bengtsson, L., Hodges, K. I. & Roeckner, E. (2006). Storm Tracks and Climate Change. *Journal of Climate*, 19 (15), 3518–3543. <https://doi.org/10.1175/JCLI3815.1>
- Benveniste, J., Cazenave, A., Vignudelli, S., Fenoglio-Marc, L., Shah, R., Almar, R., Andersen, O., Birol, F., Bonnefond, P., Bouffard, J., Calafat, F., Cardellach, E., Cipollini, P., Le Cozannet, G., Dufau, C., Fernandes, M. J., Frappart, F., Garrison, J., Gommenginger, C., Wöppelmann, G. (2019). Requirements for a Coastal Hazards Observing System. *Frontiers in Marine Science*, 6.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00348>

- Cardellach, E., Li, W., Rius, A., Semmling, M., Wickert, J., Zus, F., Ruf, C. S. & Buontempo, C. (2020). First Precise Spaceborne Sea Surface Altimetry With GNSS Reflected Signals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 102-112. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2952694>
- Elfouhaily, T., Thompson, D. R., & Linstrom, L. (2002). Delay-Doppler analysis of bistatically reflected signals from the ocean surface: Theory and application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (3), 560-573. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.1000316>
- Foerste, C., Bruinsma, S., Flechtner, F., Marty, J.-C., Dahle, C., Abrykosov, O., Lemoine, J.-M., Neumayer, H., Barthelmes, F., Biancale, R. & König, R. (2013). EIGEN-6C2—A new combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *Geophys. Res. Abstr. EGU Gen. Assembl.*, 15, 4077.
- Geremia-Nievenski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., Vey, S., Wickert, J. & Williams, S. (2020). SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: Results from the first IAG inter-comparison campaign. *Journal of Geodesy*, 94 (8), 70. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01387-3>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146 (730), 1999-2049. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- IGN (2019). GNSS Permanent Network | RGP. <https://rgp.ign.fr/>
- Issa, H., Stienne, G., Reboul, S., Raad, M. & Faour, G. (2021). Airborne GNSS Reflectometry for Water Body Detection. *Remote Sensing*, 14, 163. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14010163>
- Kucwaj, J. C., Reboul, S., Stienne, G., Choquel, J. B. & Benjelloun, M. (2017). Circular Regression Applied to GNSS-R Phase Altimetry. *Remote Sensing*, 9 (7), 651. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070651>
- Martín-Neira, M. (1993). A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to ocean altimetry. *ESA Journal*, 17, 331-355.
- Melet, A., Teatini, P., Le Cozannet, G., Jamet, C., Conversi, A., Benveniste, J., & Almar, R. (2020). Earth Observations for Monitoring Marine Coastal Hazards and Their Drivers. *Surveys in Geophysics*, 41 (6), 1489-1534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09594-5>
- Morton, Y. T. J., Yang, R. & Breitsch, B. (2020). GNSS Receiver Signal Tracking. In *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century* (pp. 339-375). John Wiley & Sons, Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119458449.ch15>
- Semmling, A. M., Schmidt, T., Wickert, J., Schön, S., Fabra, F., Cardellach, E. & Rius, A. (2012). On the retrieval of the specular reflection in GNSS carrier observations for ocean altimetry. *Radio Science*, 47 (6). DOI: <https://doi.org/10.1029/2012RS005007>
- Semmling, A., Wickert, J., Schön, S., Stosius, R., Markgraf, M., Gerber, T., Ge, M. & Beyerle, G. (2013). A zeppelin experiment to study airborne altimetry using specular Global Navigation Satellite System reflections. *Radio Science*, 48, 427-440. DOI: <https://doi.org/10.1002/rds.20049>
- Semmling, M. (2012). *Altimetric monitoring of Disko Bay using interferometric GNSS observations on L1 and L2* (pp. 1-136) [Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ Potsdam]. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.b103-12049>

- Semmling, M., Beyerle, G., Beckheinrich, J., Ge, M. & Wickert, J. (2014). Airborne GNSS reflectometry using crossover reference points for carrier phase altimetry. *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3786–3789.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947308>
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9 (1), Article 1.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>
- Webb, P. (2019). *Introduction to Oceanography*. Rebus Community.
<https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>

Examinando la relación de la profundidad óptica de aerosoles derivada de imágenes MODIS con contagios por COVID-19 en Santiago, Chile

Examining the relationship of the MODIS-derived optical aerosol thickness with COVID-19 infections in Santiago, Chile

Marco A. Peña¹
Manuel Fuenzalida²

Recibido 1 de diciembre de 2023; aceptado 19 de febrero de 2024

RESUMEN

Aquí es examinada la relación que presenta el producto de grosor óptico de aerosoles (*aerosol optical depth*, AOD) MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*), derivado de imágenes satelitales MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), con contagios COVID-19, un campo de investigación que aún permanece inexplorado en el estado del arte internacional, cuyo abordaje contribuiría a comprender la incidencia de la contaminación atmosférica en la ocurrencia de casos de esa enfermedad sobre grandes urbes. Para esto, datos diarios de AOD, adquiridos a las ~18:00 hora local, y tasas de contagio (R0s) por COVID-19 del Área Metropolitana de Santiago, Chile, fueron agregados y correlacionados a nivel de semanas epidemiológicas (SEs) en un periodo comprendido entre marzo y diciembre de 2020, dentro de cuatro zonas en que fue dividida el área de estudio. Las correlaciones más altas fueron obtenidas cuando AOD fue retardado en una semana respecto de R0s inferiores a 120 por cada 100 mil habitantes, rango que da cuenta del periodo de incubación del virus, así como del rezago con que actúa sobre la salud humana la exposición a la contaminación atmosférica cuando la transmisión aún no se torna comunitaria. Las zonas nororiente y suroriente arrojaron correlaciones

¹ Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado, Chile, correo electrónico: mapena@uahurtado.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0303-8082>

² Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado, Chile, correo electrónico: mfuenzal@uahurtado.cl ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3207-5763>

más claras entre ambas fuentes de datos ($r = 0,57$ y $0,47$, respectivamente), que aquellas norponiente y surponiente ($r = 0,3$), aspecto que guarda estrecha relación con la dinámica atmosférica que caracteriza al valle en que se asienta la ciudad de Santiago, y que determina la movilización de contaminantes hacia su sector más alto (oriente) durante el atardecer. Se espera que este trabajo constituya una primera aproximación a la construcción de modelos causales y predictivos sobre el comportamiento espaciotemporal de la enfermedad en cuestión a partir de productos de AOD.

Palabras clave: *grosor óptico de aerosoles, material particulado, COVID-19, MODIS-MAIAC.*

ABSTRACT

Here, the relationship between the MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) aerosol optical depth (AOD) product, derived from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite images, and COVID-19 infections is examined. This research field still remains unexplored in the international state-of-the-art, whose approach will contribute to understand the incidence of air pollution on the occurrence of the disease cases over large cities. For this, daily AOD data, acquired at ~18:00 local time, and COVID-19 reproduction number (R_0) from the Metropolitan Area of Santiago, Chile, were aggregated and correlated on a weekly epidemiological basis (SE) in a period embracing from March to December 2020, within four zones that divided the study area. The highest correlations were obtained when AOD was lagged by one week regarding R_0 s lower than 120 per 100 thousand inhabitants. This temporal range accounts for the virus incubation period, as well as the delay at which air pollution exposure affects human health when transmission has not yet become community-acquired. The northeast and southeast areas showed clearer correlations between both data sources ($r = 0.57$ and 0.47 , respectively), than those north-west and south-west ($r = 0.3$). This finding is closely related to the atmospheric dynamics characterizing the valley where Santiago city is located, determining the movement of pollutants towards its highest sector (east) at afternoon. It is expected that this work will constitute a first approach to the construction of causal and predictive AOD-based models on the spatiotemporal behavior of the disease at issue.

Key words: *aerosol optical depth, particulate matter, COVID-19, MODIS-MAIAC.*

1. Introducción

La pandemia del COVID-19 (Coronavirus SARS-COV2) originada a finales de 2019 y comienzos de 2020 en Wuhan, China, presentó primeros casos que fueron diagnosticados como una neumonía sin agente patógeno claro, descubriéndose luego, que su causante era una nueva especie de coronavirus

muy posiblemente traspasada desde el murciélago al humano (Mojica y Morales, 2020). La alta contagiosidad y virulencia de esta cepa, que se transmite principalmente por aspiración de partículas de mucosidad o saliva expulsadas mediante estornudos o tos de la persona enferma, generó una preocupación en la comunidad internacional, por cuanto pronto se expresó en la abrupta alza de hospitalizaciones demandantes de cuidados intensivos y su consecuente presión sobre el sistema de salud (Canals, 2020; Sundaram, 2020).

La sintomatología del COVID-19 comprende fiebre, tos seca, cansancio o fatiga, pérdida de olfato o gusto, congestión nasal, dolor de cabeza, dolor de garganta, malestares gastrointestinales y en algunos casos más graves, inflamación pulmonar y dificultad respiratoria (requiriendo hospitalización). La mortalidad del COVID-19 se debe, por una parte, a la falta de asistencia médica oportuna y adecuada en casos de enfermedad grave y por otra, al contagio en personas con enfermedades de base como diabetes, hipertensión, problemas cardiovasculares, asma, sistema inmunológico inmunodeprimido, entre otras enfermedades crónicas que agudizan el riesgo y gravedad de infección (Guan *et al.*, 2020; Rollston y Galea, 2020).

La enfermedad por COVID-19 fue considerada pandemia por la OMS (Organización Mundial de la Salud) el 11 de marzo de 2020, tras reportarse al menos 100.000 casos en 114 países (Dales *et al.*, 2021), lo que desembocó posteriormente en la instauración de cuarentenas, utilización de mascarillas, lavado de manos, distanciamiento físico y restricción de movilidad, como medidas preventivas, modificando drásticamente la rutina y cotidianidad de la población mundial (Cruz *et al.*, 2021; Martin-Moreno *et al.*, 2022). Tratándose de una enfermedad que afecta al sistema respiratorio humano, resulta plausible asociar altos niveles de contaminación atmosférica con la vulnerabilidad a contraerla (Ali & Islam, 2020) y eventualmente fallecer, como ha sido consignado para otros coronavirus (Cui *et al.*, 2003). Más aún, dado la transmisibilidad aérea del virus en cuestión, el material particulado (MP) podría ser un vector capaz de transportarlo a distancias mayores que las consideradas dentro de un contacto cercano (Alonso *et al.*, 2015; Comunian *et al.*, 2020).

La revisión sistemática de Srivastava (2021) entrega numerosas evidencias sobre la relación entre MP y COVID-19 en áreas urbanas de distintas latitudes. Así, considerando 300 condados de Estados Unidos, Wu *et al.* (2020) encontraron que un aumento de solo $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de $\text{MP}_{2,5}$ ($\varnothing \leq 2,5 \text{ mm}$) incrementó en 8% la tasa de mortalidad por la enfermedad. Por otro lado, considerando 120 ciudades de China, Zhu *et al.* (2020) reportaron un aumento de 2,24% y 1,76% en los recuentos diarios de casos confirmados de la enfermedad, al incrementar en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las concentraciones de $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{10} respectivamente. En el norte de Italia, Setti *et al.* (2020) encontraron que las superaciones del valor límite diario de MP_{10} fueron un predictor significativo de infección por la enfermedad en análisis univariados. Similarmente, en la ciudad de Santiago, Chile, Dales *et al.* (2021) consignaron una asociación significativa entre el aumento en las concentraciones de varios contaminantes atmosféricos,

incluyendo $MP_{2,5}$, y la mortalidad diaria por la enfermedad, especialmente en la población mayor a 85 años.

La concentración de contaminantes atmosféricos puede ser monitoreada mediante imágenes de profundidad óptica de aerosoles (*aerosol optical depth*, AOD), capturadas por sensores remotos a bordo de satélites de órbita polar como MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Li *et al.*, 2021). Estos productos proveen una medida adimensional de la carga total de aerosoles contenida en sus píxeles, a partir del procesamiento de la radiancia extinta o atenuada a lo largo de la columna atmosférica que yace sobre estos, correlacionándose consistentemente con mediciones de concentración de MP de carácter antropogénico, en especial fino ($MP_{2,5}$), a pesar de sus diferencias técnicas (e.g., Gupta *et al.*, 2006; Van Donkeelar *et al.*, 2010; He *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021; Handschuh *et al.*, 2022).

En efecto, mientras las mediciones de MP se efectúan en campo de modo puntual, las mediciones de AOD se realizan remotamente, abarcando el área de un píxel; que puede alcanzar varios kilómetros de lado. Por otro lado, las mediciones de MP son usualmente agregadas en promedios horarios, en tanto que las de AOD corresponden a un momento específico de captura por parte del sensor. Finalmente, mientras las mediciones de MP representan la concentración de contaminantes (e.g., $\mu\text{g}/\text{m}^3$) a nivel del estrato atmosférico en contacto con la superficie (i.e., capa de límite atmosférica) y bajo condiciones de humedad controladas, AOD provee una medida indirecta y adimensional de esta a lo largo de toda la columna atmosférica interpuesta entre el sensor y la superficie observada, bajo condiciones ambientales no controladas. Por lo anterior, previo a su relación, ambas fuentes de datos deben ser coubicadas en tiempo y espacio, tornándose sugerible además, normalizarlas por humedad relativa y mezcla atmosférica (Gupta *et al.*, 2006; Tsai *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2021).

Dada su condición de proxies de concentración de MP de carácter antropogénico en la atmósfera, los datos de AOD han sido frecuentemente relacionadas con la ocurrencia de enfermedades o mortalidades broncopulmonares y cardiovasculares derivadas de la exposición crónica a estos aerosoles (Hu 2009; Hu & Rao, 2009; Evans *et al.*, 2013). Recientemente, MODIS dispone del producto AOD MAIAC (*Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*), que mediante el procesamiento de reflectancias multi-angulares provenientes consistentemente de la misma porción de territorio inscrita en una cuadrícula de 1 km, permite derivar con mayor precisión espacial y radiométrica que sus predecesores, la carga de aerosoles contenidos en la columna atmosférica del píxel (Liapustyn *et al.*, 2018), abriendo nuevas fronteras para investigar la aplicabilidad de los datos de AOD en contextos de salud pública.

Santiago de Chile; una de las ciudades más contaminadas de Latinoamérica (Montes Franceschini, 2021), durante 2020 estuvo sujeta a confinamientos por cuarentenas dinámicas y generalizadas debidas a la pandemia por COVID-19, a fin de aminorar la proliferación de contagios. La aplicación de estas medidas redujo en un 15% las concentraciones de $MP_{2,5}$ en comparación con el año precedente

(IQAir, 2020). Sin embargo, no existe claridad acerca de cuanto pudieron incidir esos niveles de contaminación en la vulnerabilidad a enfermarse por COVID-19.

El presente trabajo tiene como principal objetivo explorar la capacidad que ofrece el producto AOD MAIAC para relacionar tasas de contagios o transmisión (R0s) por COVID-19 dentro del Área Metropolitana de Santiago, Chile, acotadas al periodo comprendido entre marzo y diciembre de 2020. Para esto, ambas fuentes de datos fueron agregadas y correlacionadas a nivel de semanas epidemiológicas (SEs) en el periodo comprendido entre marzo y diciembre de 2020, dentro de cuatro zonas en que fue dividida el área de estudio. Se espera que el trabajo aquí presentado aporte a valorar la utilidad que ofrecen los datos de AOD para comprender la incidencia de la contaminación atmosférica en la ocurrencia de casos de la enfermedad por COVID-19 sobre grandes urbes, un campo investigativo que, aún no ha sido explorado en la literatura científica internacional.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El área de estudio se inserta en la Región Metropolitana de Chile, correspondiendo específicamente al Área Metropolitana de Santiago (33° 26' 16" S - 70° 39' 01" O). Esta se compone de 32 comunas pertenecientes a la Provincia de Santiago, además de las comunas de San Bernardo y Puente Alto; capitales de las Provincias de Cordillera y Maipo, respectivamente, concentrando en su conjunto el 86,24% de la población Regional (*i.e.*, 7.107.933 de sus 8.242.459 habitantes, Biblioteca del Congreso Nacional, 2020). Todas sus comunas presentan suelos en gran medida urbanizados, excepto Lo Barnechea y Pirque, situadas hacia los faldeos de la Cordillera de Los Andes. El clima imperante es Mediterráneo, con lluvias invernales y una estación seca prolongada con temperaturas promedio que superan los 30° C. En términos geográficos, el área de estudio se emplaza en el valle que inscribe la cuenca del Río Maipo, quedando delimitada al este por la Cordillera de Los Andes, al oeste por la Cordillera de La Costa y al norte y al sur por las estribaciones cordilleranas de Chacabuco y Angostura de Paine, respectivamente.

Santiago concentra una alta demanda de energías no limpias asociadas al transporte automotriz, actividades industriales y el uso de chimeneas para calefacción residencial, entre otras (Valdés *et al.*, 2021). Esta situación, sumada a la persistente estabilidad atmosférica asociada a altas presiones, especialmente en invierno, propician la permanencia de altos montos de contaminación atmosférica. En efecto, debido a las elevadas cifras de ICAP (índice de calidad del aire de partículas) respecto de la norma, el Área Metropolitana de Santiago fue considerada zona saturada de contaminantes a mediados de los 90 (Katz y Benítez, 2000; Jorquera *et al.*, 2004). Si bien actualmente los niveles de calidad

del aire han mejorado, debido a la aplicación de políticas públicas como el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica, que implementa medidas de mitigación de contaminantes, como restricciones vehiculares y control de emisiones de fuentes fijas, entre otras, aún se observan con regularidad valores de emisión sobre la norma para contaminantes como $MP_{2,5}$, ocasionando alertas ambientales, especialmente en invierno (Ministerio de Medio Ambiente, 2021).

2.2 Datos de AOD

Fue empleado el producto MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) MCD19A2 v6, que contiene al subproducto AOD. El sensor MODIS, a bordo de los satélites Terra (hora de paso local matutina) y Aqua (hora de paso local vespertina) escanea la superficie terrestre con una frecuencia de paso de 1-2 días, a lo largo de 86 bandas espectrales de 12 bits, que comprenden una anchura de 10-400 nm y una resolución espacial nominal de 250-1.000 m, dependiendo de sus posiciones dentro del espectro sensible al instrumento (400-14.400 nm). A partir de estas imágenes, numerosos parámetros para la observación de fenómenos terrestres, oceánicos y atmosféricos son derivados por el Equipo Científico MODIS de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), dentro de ellos AOD. Este parámetro es derivado a partir del procedimiento MAIAC, una corrección atmosférica de tipo multiangular realizada sobre una misma escena o cuadrícula de un 1 km, empleando una serie temporal de imágenes MODIS (hasta 16 días). Esto permite separar la contribución de la atmósfera en las reflectancias superficiales resultantes y con ello la proporción de aerosoles en la columna atmosférica (ver detalles metodológicos en Lyapustin y Wang, 2018).

Específicamente, fueron descargados los productos diarios MCD19A2 v6 comprendidos entre el 1 de marzo y el 26 de diciembre de 2020, desde el Sistema de Datos de Observación Terrestre de la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>). Los archivos nativos de datos (hierarchical data format, hdf) fueron leídos en el software ENVI ® (*Environment for Visualizing Images*) v 5.8 (Exelis Visual Information Solutions, Inc., Boulder, EE.UU.) bajo el sistema de proyección UTM (Universal Transversal de Mercator), datum WGS84 (*World Geodetic System* 1984), a partir de lo cual fueron extraídas las imágenes de AOD, específicamente aquellas derivadas de la banda azul (0,47 μm), adquirida a las ~18:00 hora local. Si bien el producto también contiene una imagen de AOD procesada a partir de la banda verde (0,55 μm), su calidad es menor (Lyapustin y Wang, 2018). Asimismo, también se encuentran contenidas imágenes de AOD adquiridas a las ~13:00, ~14:00 y ~17:00 hora local, pero para el área de estudio presentaron una menor disponibilidad de datos.

2.3 Datos de Ros por COVID-19

Los datos de morbilidad para COVID-19 comprendidos entre el 1 de marzo y el 26 de diciembre de 2020, fueron extraídos de la frecuencia diaria de casos activos (notificados con PCR, *Polymerase chain reaction*, positivo y casos probables) contenidos dentro de cuadrantes de 1 km², puestos a disposición

de la comunidad por el Departamento de Gestión de Riesgos en Emergencias y Desastres del Ministerio de Salud de Chile, en su Plataforma Territorial COVID-19 (<https://degreyd.minsal.cl/>). Seguidamente, las R0s se obtuvieron dividiendo esa frecuencia entre la población residente en cada una de las comunas del área de estudio y multiplicando dicho resultado por 100.000 habitantes.

2.4 Coubicación espaciotemporal de las fuentes de datos

A fin de relacionar estadísticamente AOD y R0, ambas fuentes de datos debieron ser compatibilizadas en términos espaciales y temporales. Si bien las dos fueron originalmente recabadas a nivel diario para áreas (píxeles y cuadrículas) del mismo tamaño (1 km²), debido a que las imágenes de AOD suelen presentar una cantidad variable de píxeles sin datos (a causa principalmente de la nubosidad), no resultó factible relacionarlos directamente con sus respectivas R0s. Por tal razón, se decidió promediar los datos de ambas fuentes dentro de cuatro zonas en las que fue dividida el área de estudio (según detalla el siguiente subpunto) a nivel semanal, tomando como base el calendario de SEs del Ministerio de Salud de Chile, es decir, comenzando en la semana 10 (1 de marzo) y finalizando en la semana 53 (26 de diciembre) (Ministerio de Salud, 2020). Cabe destacar que debido a que AOD fue sujeto a retardos semanales (como se indica más adelante), en tales casos el período abarcado por los datos de R0 debió extenderse hasta enero de 2021.

2.5 Zonificación del área de estudio

El área de estudio fue sometida a una zonificación (Figura 1) que diferenció primeramente en sentido longitudinal, aquellas comunas del sector poniente del área de estudio que están próximas a la Cordillera de La Costa, de aquellas de su sector oriente colindantes con los faldeos de la Cordillera de Los Andes. En sentido latitudinal en tanto, el kilómetro cero, ubicado en la Plaza de Armas del centro cívico de la ciudad de Santiago, permitió diferenciar aquellas comunas pertenecientes al sector norte del área de estudio, de aquellas pertenecientes a su sector sur.

Así, las comunas que conforman el área de estudio quedaron agrupadas en las siguientes cuatro zonas, 1) nororiente: Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, La Reina, Ñuñoa y Providencia; 2) norponiente: Quilicura, Renca, Pudahuel, Cerro Navia, Lo Prado, Estación Central, Quinta Normal, Independencia, Recoleta, Conchalí y Huechuraba; 3) suroriente: Santiago Centro, San Miguel, La Cisterna, San Ramón, La Granja, San Joaquín, Macul, Peñalolén, La Florida, La Pintana, Puente Alto y Pirque; 4) surponiente: Maipú, Padre Hurtado, Cerrillos, Pedro Aguirre Cerda, Lo Espejo, El Bosque y San Bernardo.

Estas zonas poseen características geometeorológicas distintivas que determinan su calidad del aire, siendo así reconocido tradicionalmente por los organismos gubernamentales competentes (Labraña *et al.*, 2021). Así, las zonas suroriente y nororiente, por su mayor cercanía a la Cordillera de Los Andes, tienen mejores condiciones de ventilación, debido a la ocurrencia de

flujos de viento en sus faldeos y también por una mayor presencia de cobertura vegetal que favorece la advección de masas de aire. Las zonas surponiente y norponiente en tanto, corresponden a terrenos bajos donde prevalecen las peores condiciones de ventilación durante el día, en especial durante invierno, debido a la marcada estabilidad atmosférica imperante en el valle, presentando además una menor cobertura vegetal, así como zonas industriales emisoras de contaminantes atmosféricos (Romero *et al.*, 2010).

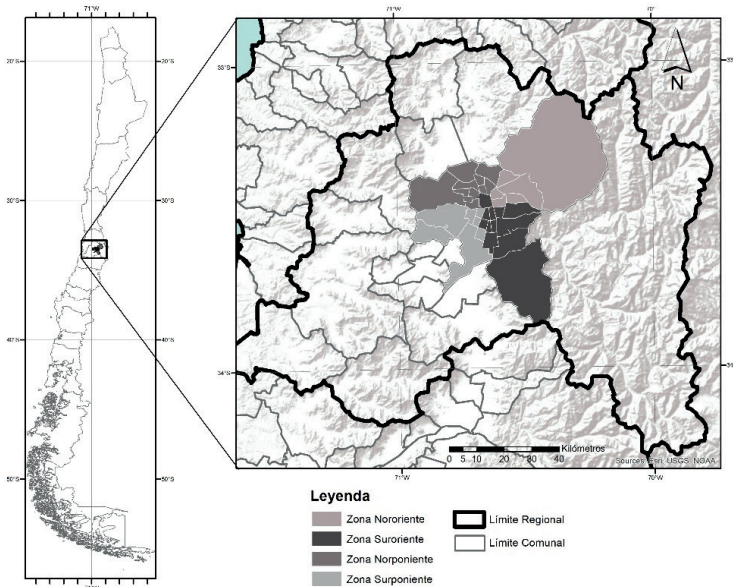


Figura 1. Zonificación de las comunas del Área Metropolitana de Santiago; inserta en la Región Metropolitana de Chile.

2.6 Correlación entre AOD y Ros por COVID-19

Los promedios semanales de AOD fueron correlacionados (usando el método de Pearson) con sus equivalentes de R0s para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el área de estudio, descartando en primer término aquellas semanas que mostraron R0s superiores a 120 casos por 100.000 mil habitantes, bajo el supuesto de que a partir de ese valor los contagios se tornan comunitarios y por lo tanto, no responderían primordialmente a variaciones en las concentraciones de MP (Layera *et al.*, 2011). Una primera correlación se probó para ambas fuentes de datos calzadas temporalmente, para luego retardar en 1 y 2 semanas AOD respecto de R0s, lo que requirió que los datos de esta última fueran ampliados hasta el 31 de enero de 2022. El empleo de tales retardos se basó en la evidencia de que el período de incubación del virus COVID-19 oscila

entre 1-14 días, siendo comúnmente aceptado un valor promedio de cinco días, al menos para la variante imperante en 2020 (Quesada *et al.*, 2021). Es decir, la infección tarda en promedio cinco días en manifestar la aparición del primer síntoma desde que la persona se expuso a un agente de contagio, pudiendo extenderse a dos semanas. Por otro lado, existe evidencia que indica que la exposición a niveles altos de MP produce el incremento de hospitalizaciones por enfermedades respiratorias con 8-10 días de rezago (Matus y Oyarzún, 2019). Luego, sobre cada correlación obtenida fue sintonizado el umbral de filtro de R0s inicialmente considerado (< 120 casos por 100.000 mil habitantes), a fin de ajustar aquel valor que pudiera significar un incremento de la correlación obtenida inicialmente.

3. Resultados

Al contraponer los promedios semanales de AOD y R0s por COVID-19 obtenidos dentro del período de interés para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el área de estudio (Figura 2), es posible constatar claras incongruencias en sus tendencias temporales. Los promedios semanales de R0s muestran

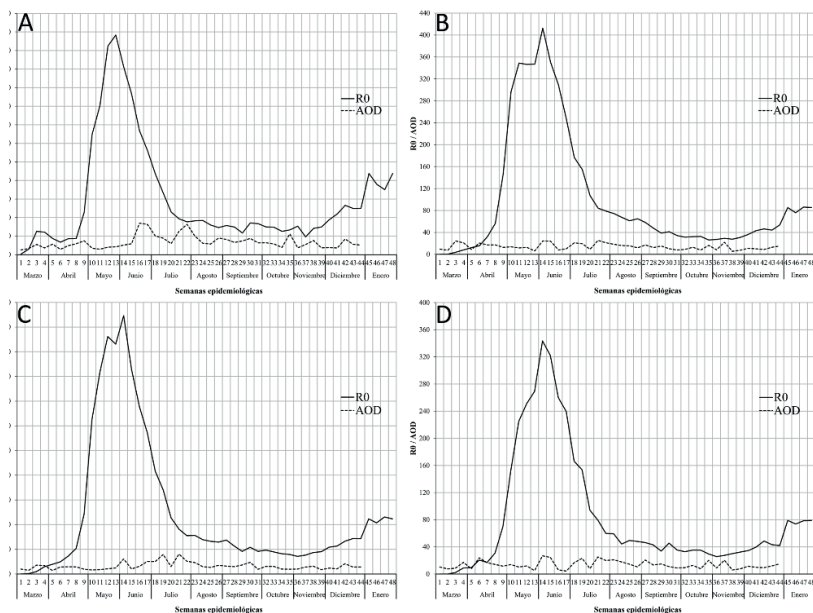


Figura 2. Comportamiento temporal de los promedios semanales de AOD (aerosol optical depth) y tasas de contagio (R0s) por COVID-19 (/100 mil habitantes) comprendidos entre el 1 de marzo y el 31 de diciembre de 2020, para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el Área Metropolitana de Santiago: nororiental (A), norponiente (B), suroriental (C) y surponiente (D).

un alza muy acusada a partir de abril (otoño), alcanzando un pico entre fines de mayo y principios de junio, para volver a estabilizarse hacia fines de julio (invierno), presentando finalmente, un alza mucho más morigerada a partir de noviembre (primavera). Los promedios semanales de AOD en tanto, presentan fluctuaciones temporales mucho menos acentuadas y más regulares a lo largo de todo el período de interés. Debido a lo retardos aplicados sobre AOD, sus datos fueron extendidos hasta el 31 de enero de 2022.

Para la totalidad del área de estudio, cuando los promedios semanales de AOD se retardaron en una semana respecto de sus equivalentes de R0s, fueron obtenidas correlaciones predominantes más altas que no empleando retardo alguno o bien ampliándolo a dos semanas (Tabla 1, Figura 3). Seguidamente, dentro de ese grupo de correlaciones, los resultados fueron los más altos cuando se emplearon sólo aquellos pares de datos en que los promedios semanales de R0s fueron inferiores a 120 (/100 mil habitantes).

Tabla 1. Coeficientes de correlación obtenidos entre los promedios semanales de AOD (aerosol optical depth) y tasas de contagio (R0s) por COVID-19 (/100 mil habitantes), comprendidos entre el 1 de marzo y el 26 de diciembre de 2020, para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el Área Metropolitana de Santiago: nororiente (A), norponiente (B), suroriente (C) y surponiente (D)

Zona	Retardo de AOD											
	Sin retardo				1 semana				2 semanas			
	R0 Ω		R0 < 120		R0 < 100		R0 < 120		R0 < 140		R0 < 120	
	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n	r	n
Nororiente	0,02	44	0,58	37	0,42	36	0,57	37	0,38	39	0,25	37
Norponiente	0,11	44	0,18	33	0,25	32	0,30	33	0,30	33	0,33	33
Suroriente	0,10	44	0,37	34	0,47	34	0,47	34	0,50	35	0,40	34
Surponiente	0,13	44	0,22	34	0,30	34	0,30	34	0,30	34	0,34	34
Área total	0,10	176	0,33	138	0,35	136	0,41	138	0,37	140	0,31	138

Al diagramar la correlación entre promedios semanales de AOD y R0s por COVID-19 (Figura 4), considerando sólo los datos que arrojaron las mayores correlaciones previamente referidas, se puede apreciar el mejor ajuste lineal que presenta la nube de puntos de las zonas suroriente y nororiente del área de estudio, particularmente en torno a valores relativamente bajos de las variables.

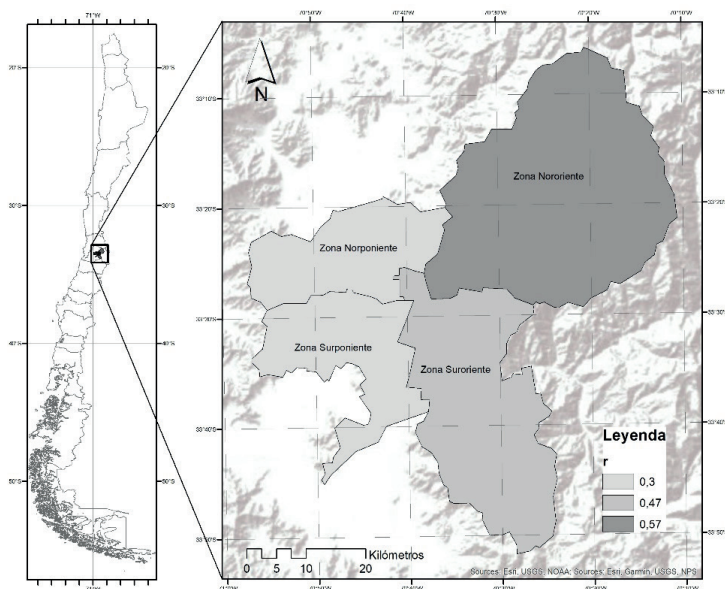


Figura 3. Cartografía de los coeficientes de correlación arrojados entre los promedios semanales de AOD (aerosol optical depth) retardados en una semana y tasas de contagio (R_0 s) por COVID-19 < 120 (/100 mil habitantes), comprendidos entre el 1 de marzo y el 26 de diciembre de 2020, para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el Área Metropolitana de Santiago: nororiente, norponiente, suroriente y surponiente.

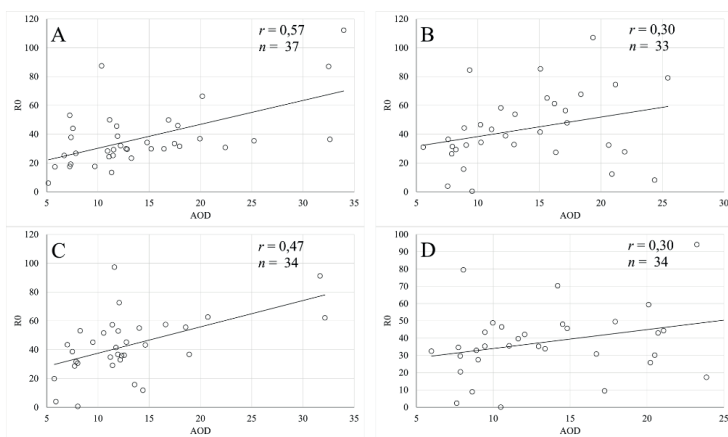


Figura 4. Gráficos de correlación resultantes entre los promedios semanales de AOD (aerosol optical depth) retardados en una semana y tasas de contagio (R_0 s) por COVID-19 < 120 (/100 mil habitantes), comprendidos entre el 1 de marzo y el 26 de diciembre de 2020, para cada una de las cuatro zonas en que fue dividida el Área Metropolitana de Santiago: nororiente (A), norponiente (B), suroriente (C) y surponiente (D).

4. Discusión y conclusiones

Las correlaciones arrojadas para el área de estudio entre AOD y R0 por COVID-19 a nivel de SEs, fueron predominantemente moderadas, aproximándose en el mejor caso a umbrales de valores moderadamente fuertes cuando AOD fue retardado en una SE respecto de $R0 < 120$ (/100 mil habitantes). La aplicación de retardos sobre variables explicativas es una aproximación metodológica recurrente en estudios epidemiológicos (Arino & van den Driessche, 2006), ajustándose en el presente trabajo a un rango razonable en atención al período de incubación del virus y al rezago con que actúa sobre la salud humana la exposición a la contaminación atmosférica cuando la transmisión aún no se torna comunitaria (como es referido en el apartado 2.6 de este artículo).

Cabe esperar que estas correlaciones pudieran fortalecerse al someter los datos de AOD a corrección por altura de la capa de mezcla atmosférica. Esto, sobre la base de estudios previos que han examinado la relación de este producto sujeto a tal corrección con concentraciones de MP principalmente, y bajo el supuesto que la exposición crónica a tales contaminantes atmosféricos presentes a nivel superficial facilitaría la ocurrencia de contagios de la enfermedad (Ali & Islam, 2020). Tsai *et al.* (2011) fortalecieron progresivamente las correlaciones de $MP_{2,5}$ y MP_{10} con datos de AOD correspondientes a Taiwan, a medida que fueron sumando escalas de altura a lo largo del perfil vertical de aerosoles, tornando valores moderados en fuertes.

El modelado de esas escalas de altura es fuertemente dependiente del comportamiento vertical de la temperatura y de la magnitud y dirección de los flujos de vientos, como concluyeron Gupta *et al.* (2006) al momento de examinar la relación entre AOD y $MP_{2,5}$ en un conjunto de urbes de gran tamaño pertenecientes a distintos países. Dado que para el área de estudio no se contó con datos fiables respecto de las variaciones intranuales que experimentaría la altura de la capa de mezcla atmosférica en respuesta a las marcadas oscilaciones de presión inducidas por las condiciones geometeorológicas dominantes (Muñoz & Undurraga, 2010), los datos de AOD no fueron sujetos a la corrección mencionada.

La fuerza de las correlaciones aquí expuestas, son muy similares a las reportadas por Yao *et al.* (2020) entre las tasas de mortalidad por COVID-19 y las concentraciones de MP, quienes para dos grupos de ciudades chinas; situadas dentro y fuera de la provincia de Hubei, obtuvieron valores que fluctuaron entre 0,33 y 0,56, dependiendo del grupo de ciudades y del diámetro del MP medido. Si bien dicho estudio se basa en la variable mortalidad y no morbilidad de la enfermedad, cabría deducir que el rendimiento de una medición remota de MP, como lo es AOD es semejable al de su equivalente medida *in situ*, por cuanto debiera existir una razonable correlación positiva entre ambas variables.

El estudio llevado a cabo por Dales *et al.* (2021) durante el otoño e invierno de 2020 sobre nueve comunas del Área Metropolitana de Santiago, Chile, encontró que la mortalidad diaria por COVID-19 incrementó en 6% al aumentar el rango intercuartil de CO, NO_2 y $MP_{2,5}$, agudizándose en el grupo etario mayor a 85

años dependiendo del contaminante, lo cual les permitió modelar el efecto de cada uno de estos en la mortalidad por la enfermedad. Una metodología como la propuesta en el presente trabajo, podría contribuir a robustecer este tipo de modelos mediante la inclusión de datos de MP con mayor cobertura espacial y temporal, ampliándolos a todas las comunas de la ciudad durante todas las estaciones del año. Sin embargo, cabría tener en cuenta la variable perdida de datos diarios aparejada al producto AOD; que produciría discontinuidades variables en la trazabilidad de la contaminación atmosférica a nivel de píxel, aspecto que en el presente trabajo fue sobrellevado mediante la agregación espacial y temporal de datos a nivel de zonas y SEs. No obstante, según lo que se desprende de lo discutido por Kumar *et al.* (2008), esta aproximación metodológica podría sumar incertidumbres e imprecisiones propias del escalado, en especial considerando que los retardos aquí probados debieron ser aplicados a nivel de semanas en lugar de días.

Las diferencias en las correlaciones arrojadas entre AOD y R0 por COVID-19 para las cuatro zonas en que fue dividida el área de estudio; más altas en su zona oriente que en su zona poniente, deben ser examinadas a la luz de la dinámica atmosférica que incide sobre su distribución espacial de contaminantes. Con el descenso nocturno de la temperatura superficial del valle en que se asienta la ciudad de Santiago, la capa de aire que se enfría por acción radiativa, tiende a desplazarse hacia el sector más bajo del valle (poniente), activando así un proceso de inversión térmica propicio para que en este se concentren contaminantes atmosféricos durante las primeras horas del día. Con el progresivo ascenso diurno de la temperatura superficial del valle en cuestión, el aire se calienta y asciende, siendo la pluma de contaminación dispersada horizontalmente hacia su sector más alto (oriente) durante el transcurso de la tarde, a causa de la prevalencia de vientos desde el suroeste (Schmitz, 2004; Garreaud y Rutllan, 2006), cuestión que incrementará la concentración de contaminantes atmosféricos hacia la zona oriente, favoreciendo su correlación más clara con el producto AOD adquirido a las ~18:00 hora local.

Si bien estudios previos han correlacionado AOD con enfermedades crónicas relacionadas con calidad del aire, a nuestro conocimiento ninguno lo ha hecho específicamente con COVID-19, lo que confiere a este estudio novedad respecto del estado del arte internacional. No obstante, para avanzar más allá de este esfuerzo exploratorio, futuras investigaciones podrían ampliar el período de interés a fin de considerar la exposición de largo plazo a las concentraciones de MP, como factor de riesgo de contagio de la enfermedad. En esta línea, Yao *et al.* (2020), encontraron que las concentraciones prepandemia de MP, entre 2015-2019, incrementaron la vulnerabilidad a contraer COVID-19. Asimismo, es sugerible indagar sobre las variaciones que podrían experimentar las correlaciones aquí expuestas al emplear datos de AOD adquiridos a otras horas del día, en atención a la dinámica atmosférica del área de estudio previamente referida. Al respecto, Peña y Araya (2019) encontraron que las mediciones de campo de MP correspondientes al sector poniente de la ciudad de Santiago, Chile, mostraron correlacionarse más fuertemente con el producto AOD de

MODIS adquirido hacia a las 13:30 hora local, que aquellas de su sector oriente. Dicho resultado concuerda con la dinámica atmosférica aquí sugerida, por cuanto hacia el mediodía cabría esperar que el sector poniente de la ciudad aun presente una baja ventilación, así como una relativamente baja altura de la capa de mezcla, favoreciendo el confinamiento de contaminantes atmosféricos (Garreaud y Rutllan, 2006).

Por último, otras covariables como edad, estatus socioeconómico y comorbilidad deberían ser tenidas en consideración al momento de investigar el comportamiento de la enfermedad en cuestión (Fattorini & Regoli, 2020; Fuenzalida, 2020), aspecto que resulta de principal relevancia en ciudades como Santiago, marcadas por una fuerte segregación socio-ambiental (Romero *et al.*, 2011). En efecto, Mena *et al.* (2021) refieren que, a causa de la alta segregación de la ciudad de Santiago, los habitantes de comunas con un bajo nivel socioeconómico no pudieron reducir su movilidad durante los confinamientos suscitados por la pandemia por coronavirus como los de comunas más ricas, por lo cual la incidencia de la enfermedad fue más acentuada mientras mayor fue la desigualdad social y la exposición a un medio contaminado. Por su parte, Vicente *et al.* (2020) encontraron que, para varias ciudades españolas e italianas, la relación entre casos COVID-19 y la concentración de MP_{10} , se vio influenciada por covariables meteorológicas como humedad relativa y temperatura. Bañuelos *et al.* (2022) en tanto, encontraron que la relación entre mortalidad por COVID-10 y la concentración de MP_{10} para un grupo de provincias españolas, estuvo limitada y subordinada a factores como medidas de salud pública adoptadas, presencia de comorbilidades y edad del paciente.

Las consideraciones anteriores, harían posible avanzar en afinar y robustecer modelos causales y predictivos sobre el comportamiento espaciotemporal de la enfermedad a partir de productos de AOD, facilitando con esto, el manejo de nuevos brotes vía monitoreo y control de zonas urbanas sometidas a altos niveles de polución del aire.

Agradecimientos

Esta investigación fue patrocinada por el Fondo de Investigación Científica COVID-19, Folio ANID/COVID 0476, de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID).

Los autores quisieran extender su agradecimiento al geógrafo Jorge Guzmán, por su laboriosa contribución técnica en el procesamiento de los datos MODIS aquí empleados.

Bibliografía

- Ali, N. & Islam, F. (2020). The effects of air pollution on COVID-19 infection and mortality - a review on recent evidence. *Frontiers in Public Health*, 8: 580057. <https://doi.org/10.21149/12355>
- Alonso, C.; Raynor, P. C.; Davies, P. R. & Torremorell, M. (2015). Concentration, size distribution, and infectivity of airborne particles carrying swine viruses. *PLoS One* 10(8): e0135675. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135675>

- Arino, J. & van den Driessche, P. (2006). Time delays in epidemic models. In: O. Arino, M. Hbid & E. A. Dads (eds.), *Delay Differential Equations and Applications*. NATO Science Series, vol. 205. Dordrecht, Netherlands: Springer.
https://doi.org/10.1007/1-4020-3647-7_13
- Bañuelos Gimeno, J.; Blanco, A.; Díaz, J.; Linares, C.; López, J. A.; Navas, M. A.; Sánchez-Martínez, G.; Luna, Y.; Hervella, B.; Belda, F. & Culqui, D. (2022). ¿Influyen la contaminación atmosférica y las variables meteorológicas en la mortalidad por COVID-19? Estudio comparativo de series temporales entre la primera y segunda ola en nueve provincias españolas. *Revista de Salud Ambiental*, 22 (1), 100-112. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1142>
- Biblioteca del Congreso Nacional (2020). Santiago, reporte comunal 2023. Recuperado de https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?idcom=13101
- Canals, M. (2020). Conceptos para una buena toma de decisiones en la pandemia COVID-19 en Chile. *Revista Chilena de Infectología*, 37 (2), 170-172.
<https://dx.doi.org/10.4067/s0716-10182020000200170>
- Comunian, S.; Dongo, D.; Milani, C. & Palestini, P. (2020). Air pollution and COVID-19: the role of particulate matter in the spread and increase of COVID-19's morbidity and mortality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (12), 4487. <https://doi.org/10.3390%2Fijerph17124487>
- Cruz, M. P.; Santos, E.; Cervantes, M. V. & Juárez, M. L. (2021). COVID-19, una emergencia de salud pública mundial. *Revista Clínica Española*, 221 (1), 55-61.
<https://doi.org/10.1016/j.rce.2020.03.001>
- Cui, Y.; Zhang, Z. F.; Froines, J.; Zhao, J.; Wang, H.; Yu, S. Z. & Detels, R. (2003). Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study. *Environmental Health*, 2, 15. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-2-15>
- Dales, R.; Blanco-Vidal, C.; Romero-Meza, R.; Schoen, S.; Lukina, A. & Cakmak, S. (2021). The association between air pollution and COVID-19 related mortality in Santiago, Chile: A daily time series analysis. *Environmental Research*, 198, 111284.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111284>
- Evans, J.; van Donkelaar, A.; Martin, R. V.; Burnett, R.; Rainham, D. G.; Birkett, N. J. & Krewski, D. (2013). Estimates of global mortality attributable to particulate air pollution using satellite imagery. *Environmental Research*, 120, 33-42.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.08.005>
- Fattorini, D. & Regoli, F. (2020). Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Italy. *Environmental pollution*, 264, 114732.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114732>
- Fuenzalida, M. (2020). COVID-19 y las desigualdades territoriales al interior de Áreas Metropolitanas de Valparaíso, Santiago y Concepción, Chile. *Espiral, Revista de Geografías y Ciencias Sociales*, 2 (4), 79-89.
<https://doi.org/10.15381/espinal.v2i4.19535>
- Garreaud, R. D., & Rutllant, J. (2006). Factores meteorológicos de la contaminación atmosférica. En R. Morales (Ed.), *Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*, (pp. 35-54). Editorial Universitaria: Santiago, Chile.
- Gupta, P.; Christopher, S. A.; Wang, J.; Gehrig, R.; Lee, Yc. & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40, 5880-5892.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>

- Guan, W. J.; Liang, W. H.; Zhao, Y.; Liang, H. R.; Chen, Z. S.; Li, Y.M.; Liu, X. Q.; Chen, R. C.; Tang, C. L.; Wang, T.; Ou, C. Q.; Li, L.; Chen, P. Y.; Sang, L.; Wang, W.; Li, J. F.; Li, C. C.; Ou, L. M.; Cheng, B.; Xiong, S.; Ni, Z. Y.; Xiang, J.; Hu, Y.; Liu, L.; Shan, H.; Lei, C. L.; Peng, Y. X.; Wei, L.; Liu, Y.; Hu, Y. H.; Peng, P.; Wang, J. M.; Liu, J. Y.; Chen, Z.; Li, G.; Zheng, Z. J.; Qiu, S. Q.; Luo, J.; Ye, C. J.; Zhu, S. Y.; Cheng, L. L.; Ye, F.; Li, S. Y.; Zheng, J. P.; Zhang, N. F.; Zhong, N. S. & He, J. X. (2020). China Medical Treatment Expert Group for COVID-19. Comorbidity and its impact on 1590 patients with COVID-19 in China: a nationwide analysis. *European Respiratory Journal*, 55 (5), 2000547. <https://doi.org/10.1183/13993003.00547>
- Handschuh, J.; Erbertseder, T.; Schaap, M. & Baier, F. (2022). Estimating PM_{2.5} surface concentrations from AOD: A combination of SLSTR and MODIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, 100716. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100716>
- He, Q.; Wang, M. & Yim, S. H. L. (2021). The spatiotemporal relationship between PM_{2.5} and aerosol optical depth in China: influencing factors and implications for satellite PM_{2.5} estimations using MAIAC aerosol optical Depth. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21 (24), 18375-18391. <https://doi.org/10.5194/acp-21-18375-2021>
- Hu, Z. (2009). Spatial analysis of MODIS aerosol optical depth, PM_{2.5}, and chronic coronary heart disease. *International Journal of Health Geographics*, 8, 27. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-27>
- Hu, Z. & Rao, K. R. (2009). Particulate air pollution and chronic ischemic heart disease in the eastern United States: a county level ecological study using satellite aerosol data. *Environmental Health*, 8, 26. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-26>
- IQAir (2020). World air quality report. Recuperado de <https://www.iqair.com/es/world-air-quality-ranking>
- Jorquera, H.; Orrego, G.; Castro, J. & Vesovic, V. (2004). Trends in air quality and population exposure in Santiago, Chile, 1989-2001. *International Journal of Environment and Pollution*, 22 (4), 507-530. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.005684>
- Katz, R. & Benítez, M. I. (2000). Uso de un sistema de pronósticos para el control de la calidad del aire en Santiago. *Estudios públicos*, 77, 187-202. <https://www.estudiospublicos.cl/index.php/cep/article/view/916>
- Kumar, N.; Chu, A. & Foster, A. (2008). Remote sensing of ambient particles in Delhi and its environs: estimation and validation. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (12), 3383-3405. <https://doi.org/10.1080/01431160701474545>
- Labraña, J.; Folchi, M.; Urquiza, A. & Rivas, M. (2021). La construcción de la contaminación atmosférica como problema público, Santiago de Chile (1961-1978). *Historia Ambiental Latinoamericana Y Caribeña (HALAC) Revista de La Solcha*, 11 (3), 149-177. <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2021v11i3.p149-177>
- Layera, S.; Fontena, N.; Rojas, E.; Acuña, M. & Saldivia, P. (2011). Brote comunitario de influenza A H1N1 2009 en el período post-pandémico inmediato: descripción epidemiológica en una localidad aislada de la región de Aysén, Patagonia chilena. *Revista chilena de infectología*, 28 (4), 338-342. <https://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182011000500006>
- Li, Y.; Yuan, S.; Fan, S.; Song, Y.; Wang, Z.; Yu, Z.; Yu, Q. & Liu, Y. (2021). Satellite remote sensing for estimating PM_{2.5} and its components. *Current Pollution Reports*, 7, 72-87. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00170-4>
- Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S. & Huang, D. (2018). MODIS Collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11 (10), 5741-5765. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018>

- Lyapustin, A. & Wang, Y. (2018). MODIS multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) data user's guide. Collection 6, version 2.0. Sioux Falls, USA: USGS.
- Martín-Moreno, J. M.; Arenas, A.; Bengoa, R.; Borrell, C.; Franco, M.; García-Basteiro, A. L.; Gestal, J.; González López-Valcárcel, B.; Hernández Aguado, I.; Legido-Quigley, H.; March, J. C.; Minué, S.; Muntaner, C. & Vives-Cases, C. (2022). Reflexiones sobre cómo evaluar y mejorar la respuesta a la pandemia de COVID-19. *Gaceta Sanitaria*, 36 (1), 32-36. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.11.008>
- Matus, P. & Oyarzún, M. (2019). Impacto del material particulado aéreo (MP_{2.5}) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en niños: estudio caso-control alterno. *Revista chilena de pediatría*, 90 (2), 166-174. <https://dx.doi.org/10.32641/rchped.v90i2.750>
- Mena, G. E., Martínez, P. P.; Mahmud, A. S.; Marquet, P. A.; Buckee, C. O. & Santillana, M. (2021). Socioeconomic status determines COVID-19 incidence and related mortality in Santiago, Chile. *Science*, 372 (6545), eabg5298. <https://doi.org/10.1126/science.abg5298>
- Ministerio del Medio Ambiente (2021). *Sexto reporte del estado del medio ambiente*. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Ministerio de Salud (2020). *Informe epidemiológico N° 81*. Enfermedad por SARS-CoV-2 (COVID-19). Chile 28-12-2020. Santiago, Chile: Departamento de Epidemiología, Ministerio de Salud, Gobierno de Chile.
- Mojica-Crespo, R. & Morales-Crespo, M. M. (2020). Pandemia COVID-19, la nueva emergencia sanitaria de preocupación internacional: una revisión. *Medicina de Familia. SEMERGEN*, 46 (S1), 72-84. <https://dx.doi.org/10.1016/j.semerg.2020.05.010>
- Montes Franceschini, S. (2021). Contaminación ambiental e infecciones respiratorias en niños. *Neumología Pediátrica*, 16 (4), 161-163. <https://doi.org/10.51451/np.v16i4.463>
- Muñoz, R. C., & Undurraga, A. A. (2010). Daytime mixed layer over the Santiago Basin: Description of two years of observations with a lidar ceilometer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1728-1741. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2347>
- Peña, M. A. & Araya, P. (2019). Hacia el modelado de material particulado fino en Santiago, Chile, mediante imágenes MODIS. *Revista Geográfica De Chile Terra Australis*, 55 (1), 74-81. <https://doi.org/10.23854/07199562.2019551.Pena74>
- Quesada, J. A., López-Pineda, A., Gil- Guillén, V. F., Arriero-Marín, J. M., Gutiérrez, F. & Carratala-Munuera, C. (2021). Periodo de incubación de la COVID-19: revisión sistemática y metaanálisis, *Revista clínica española*, 221 (2), 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2020.08.005>
- Rollston, R. & Galea, S. (2020). COVID-19 and the social determinants of health. *American Journal of Health Promotion*, 34 (6), 687-689. <https://doi.org/10.1177/0890117120930536b>
- Romero, H., Fuentes, C. & Smith, P. (2010). Ecología política de los riesgos naturales y de la contaminación ambiental en Santiago de Chile: necesidad de justicia ambiental. *Scripta Nova*. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, XIV, 331 (52). <https://raco.cat/index.php/ScriptaNova/article/view/200033>
- Romero, H.; Salgado, M. & Fuentes, C. (2011). Segregación socio-ambiental en espacios intraurbanos de la ciudad de Santiago de Chile. En A. Aguilar & I. Escamilla (eds.), *Periurbanización y sustentabilidad en grandes ciudades*, 525, 55-82.

- Cámara de Diputados, Instituto de Geografía-UNAM, Conacyt, Miguel Ángel Porrúa: México. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118161>
- Schmitz, R. (2005). Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile. *Atmospheric Environment*, 39(11): 2035-2047. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.033>
- Setti, L.; Passarini, F.; De Gennaro, G.; Barbieri, P.; Perrone, M. G.; Piazzalunga, A.; Borelli, M.; Palmisani, J.; Di Gilio, A.; Piscitelli, P. & Miani, A. (2020). The potential role of particulate matter in the spreading of COVID-19 in Northern Italy: first evidence-based research hypotheses. *MedRxiv*, 2020-2004. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039338>
- Srivastava, A. (2021). COVID-19 and air pollution and meteorology-an intricate relationship: A review. *Chemosphere*, 263, 128297. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128297>
- Sundaram, J. K. (2020). Contener el contagio de Covid-19: lecciones comparativas. *El Trimestre Económico*, 87 (348), 1059-1079. <https://doi.org/10.20430/ete.v87i348.1175>
- Tsai, T.-C.; Jeng, Y.-J.; Chue, D. A.; Chen, J.-P. & Chang, S.-C. (2011). Analysis of the relationship between MODIS aerosol optical depth and particulate matter from 2006 to 2008. *Atmospheric Environment*, 45, 4777-4788. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.10.006>
- Valdés, M., Alonso, F., Pino, P. & Nazzari, C. (2021). Emergency visits and mortality caused by ischemic heart disease attributable to fine particulate matter during the COVID-19 pandemic in Chile. *Revue D'epidemiologie et de Sante Publique*, 69 (5), 247-254. <https://doi.org/10.1016/j.respe.2021.07.005>
- Van Donkelaar, A.; Martin, R. V. & Park, R. J. (2006). Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, 111, D21201, 1-10. <https://doi.org/10.1029/2005JD006996>
- Vicente, A. V.; Chaudhuri, S.; Verdoy, P. J.; Díaz, C. & Saurina, L. (2020). *Relación entre contaminantes atmosféricos, variables meteorológicas y casos de COVID-19 en ciudades europeas*. Santiago, Chile: CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente).
- Wu, X.; Nethery, R. C.; Sabath, M. B.; Braun, D. & Dominici, F. (2020). Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. *MedRxiv*, 2020-2004. <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>
- Yao, Y.; Pan, J.; Wang, W.; Liu, Z.; Kan, H.; Qiu, Y.; Meng, X. & Wang, W. (2020). Association of particulate matter pollution and case fatality rate of COVID-19 in 49 Chinese cities. *Science of Total Environment*, 741, 140396. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140396>
- Zhu, Y.; Xie, J.; Huang, F. & Cao, L. (2020). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. *Science of the total environment*, 727, 138704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>

Comparación entre los métodos Mora-Vahrson y Lógica difusa en la susceptibilidad a movimientos de tierra en el cantón Morona-Amazonía ecuatoriana

Comparison between the Mora-Vahrson and Fuzzy Logic methods to landslides in the Morona canton-Ecuadorian Amazon

Iván Fernando Palacios Orejuela¹

Recibido 11 de septiembre de 2023; aceptado 15 de marzo de 2024

RESUMEN

Los deslizamientos representan aproximadamente el 17% del total de muertes provocadas por riesgos naturales a nivel mundial, y debido a los efectos del cambio climático, se pronostica que las pérdidas humanas y económicas no disminuirán. Existen varias metodologías para mapear la susceptibilidad a deslizamientos, entre las que se encuentran Mora-Vahrson y Lógica difusa. Ecuador es un país tropical que ha sufrido varios desastres naturales, el más reciente fue un deslizamiento sucedido en el cantón de Alausí donde murieron al menos 65 personas. Sin embargo, todavía persisten zonas poco estudiadas sobre este fenómeno, como la Amazonía ecuatoriana, en la que se toma al cantón Morona para el presente estudio. El objetivo principal fue generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante Lógica difusa y Mora-Vahrson para determinar el método que mejor se ajuste a su realidad geográfica. Los modelos resultantes fueron clasificados en cinco niveles de riesgo, donde la validación mediante el coeficiente de contingencia corregido fue de 0.894 para Fuzzy frente al 0.866 de Mora-Vahrson, por lo que en este estudio el método probabilístico fue más preciso que el método semianalítico heurístico. El cotejamiento entre modelos determinó que varias parroquias presentaron mayor susceptibilidad, pero con el modelamiento probabilístico difuso se logró identificar más detalladamente el nivel de riesgo a equipamientos presente en el territorio. Esta ventaja puede deberse a la forma de trabajar con variables

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Dirección de Planificación, GAD Municipal del Cantón Morona, Macas, Ecuador, correo electrónico: ivan199632@hotmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3209-9810>

físicas continuas que son utilizadas en cada método y que inciden en la precisión de los resultados, por lo que para fines de gestión de riesgos y planificación es recomendable utilizar metodologías probabilísticas como Lógica difusa.

Palabras clave: *cambio climático, deslizamientos, Mora-Vahrson, Lógica difusa, modelamiento probabilístico.*

ABSTRACT

Landslides represent approximately 17% of total deaths caused by natural hazards worldwide, and due to the effects of climate change, it is forecasted that human and economic losses will not decrease. There are several methodologies for mapping landslide susceptibility, including Mora-Vahrson and Fuzzy Logic. Ecuador is a tropical country that has experienced several natural disasters, the most recent being a landslide in the Alausí canton where at least 65 people died. However, there are still poorly studied areas regarding this phenomenon, such as the Ecuadorian Amazon, where the Morona canton is chosen for the present study. The main objective was to generate a landslide susceptibility model using Fuzzy Logic and Mora-Vahrson to determine which method best fits its geographic reality. The resulting models were classified into five levels of risk, where validation using the corrected contingency coefficient was 0.894 for Fuzzy compared to 0.866 for Mora-Vahrson, making the probabilistic method more accurate than the heuristic semi-analytical method in this study. Model comparison determined that several parishes showed higher susceptibility, but with the fuzzy probabilistic modeling, the level of risk to facilities in the territory was more precisely identified. This advantage may be due to the way of working with continuous physical variables used in each method, which affect the accuracy of the results, so for risk management and planning purposes it is recommended to use probabilistic methodologies such as Fuzzy Logic.

Key words: *climate change, landslides, Mora-Vahrson, Fuzzy Logic, probabilistic modeling.*

1. Introducción

Durante las últimas décadas, la literatura científica sobre el mapeo de amenazas naturales ha tomado relevancia a nivel mundial. Los deslizamientos de tierra, son uno de los riesgos naturales que han causado mayores daños en zonas montañosas y tropicales (Aristizábal & Sánchez, 2020; Pourghasemi *et al.*, 2012). Según el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Catástrofes (CRED por sus siglas en inglés), del total de muertes provocadas por riesgos naturales en el mundo, aproximadamente el 17% corresponden únicamente a deslizamientos (Petley, 2012). Esta cantidad se espera que incremente a futuro debido a la deforestación, malas prácticas agrícolas, los efectos del cambio climático el cual genera un aumento en la intensidad de lluvias incrementando la erosión del suelo, así como por el crecimiento no planificado de asentamientos humanos (Intergovernmental Panel on Climate Change —IPCC, 2018; Kanungo *et al.*, 2009; Ozturk *et al.*, 2022).

Los daños e impactos socioeconómicos que produce un deslizamiento han sido un desencadenante para profundizar la investigación debido a la importancia que radica el mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos, al aumento sobre áreas antrópicas en zonas donde antes eran menos habitadas (Aleotti & Chowdhury, 1999), y en la pérdida del recurso suelo como materia prima de las actividades agroproductivas (Abdullah *et al.*, 2019; Pradhan *et al.*, 2012).

Solo en 2018, los desastres naturales afectaron a 68.5 millones de personas en todo el mundo, y generaron pérdidas por aproximadamente USD 132 mil millones (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters —CRED, 2019). En Ecuador, debido a su situación geodinámica, ubicación geográfica y características climáticas, ha sufrido a lo largo de su historia varios desastres naturales, entre los más recientes están el terremoto de 2016 que presentó un costo total de reconstrucción de USD 3.344 millones (Toulkeridis *et al.*, 2017; World Bank, 2021), así como el deslizamiento ocurrido en Alausí (provincia de Chimborazo) en marzo del 2023 donde fallecieron al menos 65 personas (SGR, 2023). Bajo esta premisa, los desastres de origen natural se han convertido en el tercer factor que pueden complicar la economía ecuatoriana en el 2023, según el Fondo Monetario Internacional (FMI). En base de lo mencionado, se fundamenta la significancia del estudio continuo y monitoreo de desastres naturales, como la susceptibilidad a deslizamientos, objeto de este trabajo.

El mapeo de la susceptibilidad a deslizamientos ha sido analizado desde distintos enfoques metodológicos, tales como frecuencia de ratio (Li *et al.*, 2022; Shano *et al.*, 2021), regresión lineal (Nanda *et al.*, 2021), Mora-Vahrson (Quesada & Boraschi, 2018), Lógica difusa (Palacios, 2020), por mencionar algunos. En los trabajos de López *et al.* (2020) y de Pedreros y Rivera (2020), proponen el uso de Mora – Vahrson para la zonificación de deslizamientos en países tropicales, como es el caso de Ecuador; además, según Palacios y Toulkeridis (2020), así como Salcedo *et al.*, (2017) la lógica difusa ha sido implementada en varios sitios del Ecuador con buenos resultados predictivos. Sin embargo, existen pocos estudios que han comparado estos métodos, centrando su análisis en áreas pequeñas de estudio y en la región central del país (Jaramillo *et al.*, 2018).

Por tanto, esta investigación considera a la región amazónica del Ecuador como zona de análisis, específicamente en el cantón Morona, con el objetivo de generar un modelo de susceptibilidad a deslizamientos mediante la aplicación y comparación de lógica difusa y Mora – Vahrson, de manera que permita determinar el método que mejor se ajuste a la realidad geográfica y sirva como insumo para la identificación de potenciales zonas de riesgo y la toma de decisiones.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

El cantón Morona se ubica al suroriente de la región amazónica del Ecuador, siendo uno de los 12 cantones de la provincia de Morona Santiago. Posee una superficie de 4367.92 km² aproximadamente, la cual se extiende desde las estribaciones de la cordillera de los Andes al oeste hasta la planicie amazónica al este, abarcando una zona de transición entre la región Sierra y Oriente, esto ha generado un biotopo adecuado para el desarrollo de sus habitantes desde hace cientos de años atrás (Palacios, 2023a, 2023b). Gracias a su ubicación geográfica, presenta varias zonas naturales que están bajo conservación del Estado, entre las que se destaca el Parque Nacional Sangay, en el que se halla el estratovolcán del mismo nombre, el Bosque Kutukú-Shaimi, que en conjunto denotan la riqueza natural del área de estudio (Palacios & Rodríguez, 2021).

La ciudad de Macas es la capital cantonal y provincial, ubicada geográficamente a 2° 17' 54.94" de latitud sur y 78° 09' 59.03" de longitud oeste (Carrera *et al.*, 2021; Palacios & Arellano, 2022). Se conecta hacia el resto del país mediante la vía estatal E-45 hacia el norte-sur, y la vía E-46 hacia la parte central del Ecuador; de estos ejes viales, el último ha presentado históricamente problemas debido a movimientos de tierra que han generado reiterados cierres viables y pérdidas humanas (Palacios & Toulkeridis, 2020). Además, la ampliación de la frontera agrícola y el cambio de cobertura del suelo es una problemática en todo el cantón (Palacios & Arellano, 2021), lo cual propende un escenario poco alentador ante esta amenaza natural que podría afectar directa o indirectamente a sus 61479 habitantes (INEC, 2023) . En la Figura 1 se muestra el área de estudio.

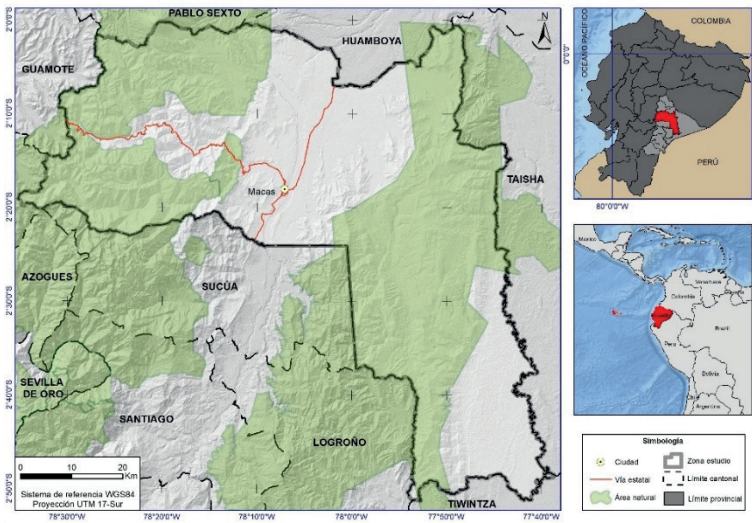


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio: cantón Morona-Ecuador.

2.2 Método Mora-Vahrson

El método Mora-Vahrson es un modelo de tipo explícito semianalítico y permite la caracterización del nivel de riesgo a deslizamientos en zonas tropicales sísmicamente activas (Mora & Vahrson, 1994). Considera la interacción de dos factores: condicionantes y desencadenantes para determinar la susceptibilidad a esta amenaza natural. Los factores condicionantes hacen referencia a elementos pasivos que aportan características subyacentes propias del lugar analizado (relieve relativo, humedad del suelo, litología); mientras que los factores desencadenantes son elementos de disparo que activan el fenómeno de movimiento de masas (sismicidad, precipitación) (Mora, 2004). Mora y Vahrson (1993) propusieron una modificación en el cálculo de estos factores, incorporando variables como un factor morfométrico y la cobertura del suelo (o indicadores morfodinámicos) para expresar el elemento pasivo de un deslizamiento. Esta modificación ha sido usada en el proyecto “Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25.000” llevado a cabo en el Ecuador, motivo por el que se utilizó dicha variante en el presente estudio. Matemáticamente, el método se expresa de la forma:

$$P = (F_m * F_{cv} * F_l) * (F_s + F_p) \quad (1)$$

Donde P es la susceptibilidad a deslizamientos, y F_m , F_{cv} , F_l , F_s , F_p corresponde a los factores morfométrico, cobertura vegetal, litológico, sísmico y precipitación respectivamente. F_m corresponde a las características geomorfológicas relacionadas con la pendiente del terreno (s) y la longitud de las vertientes (l_v), y se calcula mediante la ecuación (2):

$$F_m = 4 * s + l_v \quad (2)$$

Cada factor es parametrizado en categorías a las que se asigna una ponderación específica, de cuya combinación se obtiene un nivel relativo de . Los datos de litología y longitud de vertiente fueron obtenidos de la información oficial del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), mientras que la pendiente fue calculada a partir del modelo digital de elevaciones ALOS PALSAR, el cual representa mejor la topografía en la región amazónica (Palacios & Toulkeridis, 2022), y la cobertura vegetal fue generada del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 y Sentinel 2 del año 2022 a través de una clasificación supervisada (Cepeda *et al.*, 2018; Palacios *et al.*, 2021). En la Tabla 1 se muestra los pesos para cada variable, según los valores presentes en el área de estudio:

Tabla 1. Ponderación de factores condicionantes

<i>Factor</i>	<i>Parametrización</i>	<i>Peso</i>
<i>F_m</i>	Pendiente (%)	
	0-12	0
	12-40	1
	40-70	2
	>70	3
	Longitud de vertiente (m)	
	<15	1
	15-50	2
	50-250	3
	250-500	4
	>500	5
<i>F_{cv}</i>	Área poblada	
	Bosque nativo	
	Cuerpo de agua	1
	Infraestructura antrópica	
	Plantación forestal	
	Pastizal	
	Vegetación arbustiva	
	Vegetación herbácea	2
	Cultivo	
	Mosaico agropecuario	
	Páramo	
<i>F_l</i>	Erial	3
	Glaciar	
	Depósitos aluviales	
	Formaciones Arajuno, Macuma, Mera, Santiago, Tena	1
	Serie Zamora	
	Depósitos laharíticos, volcánicos	
	Formaciones Abanico, Chambira, Pumbuiza	2
	Rocas intrusivas y metamórficas	
	Volcánicos no diferenciados del volcán Sangay	
	Depósitos coluviales, fluvio glaciares, fluvio lacustres, glaciares	3
	Formaciones Chalcana, Chapiza, Hollin, Napo, Tarqui, Tiyuyacu	

Fuente: adaptado de Mora & Vahrson (1993).

En cuanto a la sismicidad, se utilizaron datos del registro histórico de sismos (1901 al 2023) del Instituto Geofísico (IG) de la Escuela Politécnica Nacional (283 sismos), y se complementó con la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (61 sismos); por otro lado, la información sobre la precipitación se obtuvo de la página oficial del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) con datos del registro histórico disponible entre 1981-2010. En la Tabla 2 se resumen la ponderación colocada, en función de los datos recopilados.

Tabla 2. Ponderación de factores desencadenantes

<i>Factor</i>	<i>Parametrización</i>	<i>Peso</i>
F_s (magnitud Richter)	3.9 – 4.5	0
	>4.5 – 5.5	1
	>5.5. – 6.0	2
	>6.0	3
F_p (media mensual anual en mm)	<20	0
	>20 – 50	1
	>50 – 70	2
	>70	3

Fuente: adaptado de (Mora & Vahrson, 1993).

2.3 Método Lógica difusa

La Lógica difusa o también conocida como Lógica Fuzzy, es una metodología que trata de emular el razonamiento humano, basado en la probabilidad de que un elemento pertenezca a la ocurrencia del fenómeno bajo estudio (Bahrami *et al.*, 2021). Fuzzy permite representar modelos matemáticos no lineales con la integración de condiciones definidas (Sur *et al.*, 2020). Las probabilidades del sistema se analizan mediante relaciones trigonométricas, denominadas función de membresía, que se asemejan a una distribución Gaussiana en se puede tener tres escenarios: el primero corresponde a la función senoidal en el rango 0- π radianes, el segundo se ajusta con la función cosenoidal con rango 0- $\pi/2$ radianes, y el tercero que trabaja con la misma función que el primer escenario, pero en el rango 0- $\pi/2$ (Palacios, 2020).

Acorde a la relación directa o inversa de la variable independiente con el fenómeno analizado (susceptibilidad a deslizamientos), corresponde una función de membresía, donde seno representa una incidencia directa y coseno una inversa (Palacios & Toulkeridis, 2020). Matemáticamente, las funciones de membresía se expresan de la forma:

$$\varphi_A(V_o) = sen(\pi/2 * N)$$

$$0 \leq \varphi_A(V_o) \leq 1$$

(3)

$$\varphi_A(V_o) = sen(\pi/2 * N)$$

$$0 \leq \varphi_A(V_o) \leq 1.$$

(4)

Donde $\varphi_A(V_o)$ si es 1 o 0 representa la membresía total o nula de la variable independiente para el conjunto difuso, y si $0 < \varphi_A(V_o) < 1$ indica una pertenencia parcia al conjunto; es la variable normalizada mediante la función de membresía asignada. Para el modelamiento con Fuzzy, se consideraron siete variables, de las cuales la pendiente, precipitación y litología tienen una relación directa (tercer escenario) ya que a medida que se incrementa su valor, también aumenta la probabilidad de un deslizamiento; por otro lado, la distancia a ríos, vías, fallas geológicas, y cobertura vegetal presentan una relación inversa (segundo escenario) debido a que su incremento en valor significa una menor probabilidad de que ocurra un deslizamiento. Finalmente, al combinar todas las variables se deriva la probabilidad a un deslizamiento en una superficie, que viene dada por la ecuación (5), donde x_i son las variables independientes ingresadas en la función de membresía, n es el número de variables, y P_d corresponde a la susceptibilidad del deslizamiento.

$$P_d = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5)$$

2.3 Validación del modelo espacial

La etapa de validación de un modelo espacial es de fundamental importancia, ya que permite evidenciar la bondad de ajuste del mismo, es decir, la precisión en representar la realidad en el territorio del fenómeno analizado (en este caso la susceptibilidad a deslizamientos). Es necesario considerar que todo modelamiento espacial posee un error subyacente en su resultado (Palacios *et al.*, 2021), por lo que obtener un ajuste perfecto no es posible.

Para fines de la presente investigación se utilizó la información levantada en el programa Desinventar (Desinventar.org, 2020), en cuanto al registro de deslizamientos suscitados en el área de estudio, a partir de los cuales se construyó una matriz de contingencia para calcular el coeficiente de contingencia corregido que permita identificar estadísticamente el modelo con mayor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos.

3. Análisis y discusión de resultados

En esta investigación se aplicaron dos metodologías para determinar la susceptibilidad a deslizamientos a una escala cantonal en el territorio de la región amazónica del Ecuador, como es el cantón Morona. El resultado del modelamiento espacial mediante Mora-Vahrson y Lógica Fuzzy se puede representar mediante niveles de susceptibilidad del fenómeno estudiando, en función a los valores obtenidos de las ecuaciones 1 y 5, respectivamente.

Según Mora-Vahrson (1994), la clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento, se representa en seis niveles que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de niveles del riesgo potencial a deslizamientos con Mora-Vahrson

<i>Valor de P</i>	<i>Clase</i>	<i>Clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento</i>
<6	I	Muy bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Medio
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Fuente: Mora-Vahrson (1994).

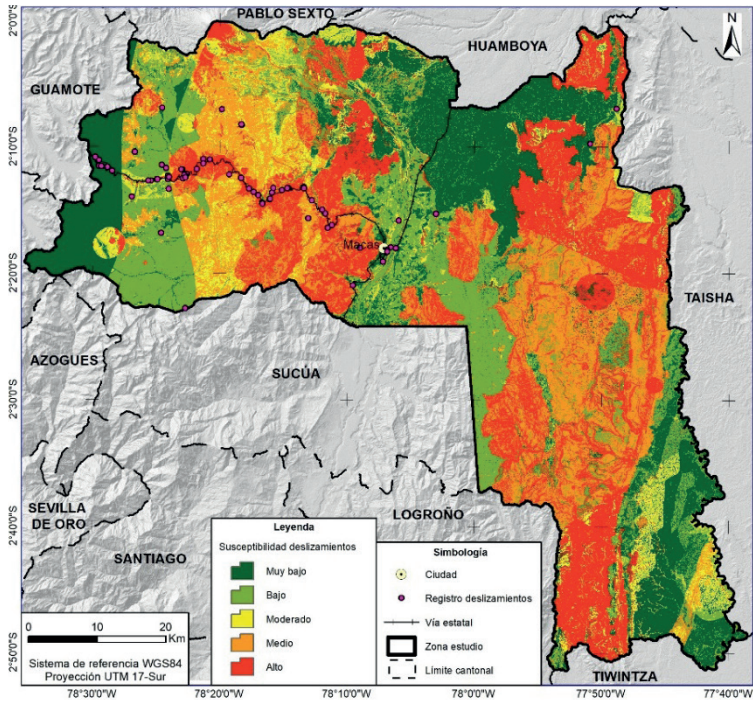
Conforme la clasificación del modelo Mora-Vahrson, en el área de estudio existen los cinco niveles iniciales de riesgo por deslizamiento, siendo la clase V (alto) el que mayor presencia en la superficie cantonal con el 24.93%, seguido en orden descendente por las clases II (bajo), IV (medio), I (muy bajo) y III (moderado) con el 22.16%, 21.91%, 21.89% y 9.11% respectivamente. En la Figura 2 se representa el modelamiento espacial mediante este método, en el que se observa que las zonas donde presentan mayor susceptibilidad a deslizamientos, están localizadas en las estribaciones de las cordilleras que atraviesan al cantón Morona, tanto al oriente (cordillera del Kutukú), y al occidente (estribaciones de la cordillera de los Andes).

Por otro lado, el modelamiento realizado con Fuzzy está expresado en valores de probabilidad, y para clasificar su nivel de riesgo potencial se utilizaron los rangos de valores de la función de membresía sugeridos por Ilanloo (2011), representados en cinco zonas de susceptibilidad a deslizamientos que se resumen en la Tabla 4:

Tabla 4. Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos sobre la base de funciones de membresía difusas

<i>Zona</i>	<i>Valor de función de membresía</i>	<i>Descripción</i>
I	<0.1	Muy baja susceptibilidad
II	0.1-0.4	Baja susceptibilidad
III	0.4-0.6	Media susceptibilidad
IV	0.6-0.75	Alta susceptibilidad
V	>0.75	Muy alta susceptibilidad

Fuente: Ilanloo (2011).



Mediante Fuzzy, la distribución de los niveles de susceptibilidad a deslizamientos tuvo un comportamiento más irregular, donde las zonas III y IV (media y alta susceptibilidad) presentaron la mayor proporción de superficie cantonal, con el 34.78% y 33.60% respectivamente, seguido por el 18.11% de la zona II (baja susceptibilidad), el 8.66% de la zona I (muy baja susceptibilidad) y el 4.85% de la zona V (muy alta susceptibilidad). Al igual que el modelo anterior, la ubicación de las áreas con mayor nivel de susceptibilidad a deslizamientos se concentran en los flancos de las cadenas montañosas, principalmente al occidente del cantón (estribaciones de los Andes), como se aprecia en la Figura 3.

Sobre la base del registro de deslizamientos ocurridos en el área de estudio que constan en la base de datos de Desinventar, misma que está articulada con el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) del Ecuador, se identificaron el número de eventos ocurridos por nivel de susceptibilidad en cada modelo generado, cuyos resultados se resumen en la Tabla 5.

Acorde a la tabla anterior, se observa que en el modelo generado con Mora-Vahrson, el 68.81% de los deslizamientos ocurridos se encuentran en los niveles de medio y alto, aunque también registró un 24.77% de estos eventos en lugares que tuvieron una clasificación de riesgo potencial entre muy bajo y bajo. Por otro lado, con el modelo Fuzzy, se identificó que más del 80% de los deslizamientos registrados se encuentran en los niveles de alta y muy alta

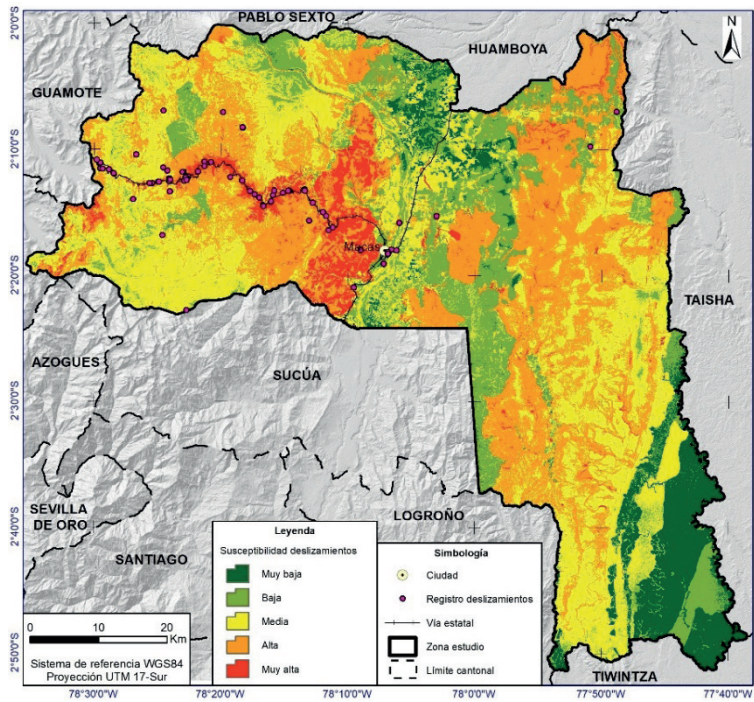


Figura 3. Modelo de susceptibilidad a deslizamientos con Lógica difusa.

Tabla 5. Deslizamientos ocurridos según el nivel de susceptibilidad en cada modelo

Mora-Vahrson					
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Medio	Alto
Número de deslizamientos	11	16	7	36	39
%	10.09	14.68	6.42	33.03	35.78
Lógica difusa					
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Número de deslizamientos	0	3	18	37	51
%	0.0	2.75	16.51	33.94	46.79

susceptibilidad, y con apenas el 2.75% de ellos, se presentaron en el nivel de baja susceptibilidad.

Para determinar el modelo que mejor precisión presentó en el área de estudio, se utilizaron los datos de la Tabla 3 para construir una matriz de contingencia dentro del software estadístico SPSS, con el que se computó estadísticos como el Chi cuadrado de Pearson y el coeficiente de contingencia corregido. El modelo Fuzzy obtuvo un valor de Chi cuadrado de 436 con 16 grados de libertad y un coeficiente de 0.894; mientras que el modelo realizado con Mora-Vahrson presentó un Chi cuadrado de 327 con 9 grados de libertad y un coeficiente de 0.866. Con estos resultados, se identificó que el modelo difuso alcanzó un coeficiente de contingencia corregido ligeramente más elevado que el modelo de Mora-Vahrson, por lo que alcanzó una mayor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos en el área de estudio. Cabe indicar además que en ambos modelos, el p-value asintótico fue menor a 0.05, por lo que son estadísticamente significativos los valores obtenidos (Rodríguez & Mora, 2001).

La comparación entre estas metodologías ha sido objeto de análisis en distintos lugares, como el realizado por Jaramillo *et al.* (2018) en Ecuador, quienes obtuvieron resultados similares a los mostrados en esta investigación, con el modelo Fuzzy ligeramente más preciso que el modelo con Mora-Vahrson. Según Xu *et al.* (2012), debido al enfoque heurístico de Mora-Vahrson con el que se ponderan las variables de forma desigual, los valores pueden ser subjetivos y poco reproducibles, siendo la principal desventaja frente a los métodos cuantitativos como Lógica difusa.

A partir del resultado obtenido a través del modelo que presentó mayor precisión en el área de estudio, se analizaron los elementos expuestos que están asentados sobre zonas con los niveles más altos de susceptibilidad a deslizamientos, entre ellos se identificó que el trazado de la vía estatal E-46 que conecta a Morona con la Sierra central del país tiene el 76% de su longitud, asentado en zonas de alta y muy alta susceptibilidad del modelo con Fuzzy, lo que coincide con trabajos anteriores que sugieren un alto riesgo frente a este tipo de desastres en la mencionada área del cantón (Palacios & Toulkeridis, 2020).

Además, mediante Lógica difusa se identificaron equipamientos que se encontrarían en zonas de riesgo, entre los que se destacan 14 centros educativos y un centro de salud sobre un nivel de alta susceptibilidad a deslizamientos; mientras que los dos proyectos hidroeléctricos presentes en el territorio cantonal ninguno está bajo un nivel de riesgo considerable. Si se compara con el modelo de Mora-Vahrson se tienen resultados similares al anterior en cuanto a los centros de salud y proyectos hidroeléctricos, pero difieren en la cantidad de centros educativos susceptibles a deslizamientos, identificando nueve de ellos en lugares de alto riesgo potencial. Esta divergencia entre los modelos, puede deberse a la influencia de los factores desencadenantes que integran el modelamiento espacial de Mora-Vahrson, principalmente la variable de sismicidad que se encuentra a una escala $\approx 1:90000$, y que condiciona la

precisión del modelo final, por lo que autores como Quesada y Boraschi (2018) y Segura *et al.*, (2011) sugieren que este método trabaja correctamente para zonificar la susceptibilidad a deslizamientos a escalas no mayores a 1:50000. Sin embargo, en este estudio se observó que con los datos proporcionados por fuentes internacionales como la USGS, permitió incorporar información en lugares donde los registros nacionales no disponían, lo que ayudó a ajustar el mapa resultante de Mora-Vahrson y generar resultados comparables con los obtenidos mediante Fuzzy.

A pesar de las limitaciones de información en el método Mora-Vahrson, ha sido ampliamente usado en estudios regionales, principalmente en Centroamérica, gracias a su fácil y rápida aplicación, que permite obtener una línea base para posteriores estudios ingenieriles o de planificación del territorio, como el desarrollado en Ecuador, donde a través de este método se llevó a cabo el proyecto denominado “Elaboración de mapas preliminares de amenaza por movimientos en masa a escala 1:50.000” (SNGRE, 2019), cuyo modelo es ocupado por los municipios a escala nacional para fines de ordenación y gestión del suelo.

Es importante señalar también que ambos modelos identificaron a la parte central del cantón con un nivel de susceptibilidad muy bajo o bajo, en cuya área se encuentra asentada la mayor densidad poblacional, lo que de cierta forma ha permitido el desarrollo de las actividades antrópicas sin mayores inconvenientes ante esta amenaza natural. Al analizar los modelos generados mediante Fuzzy y Mora-Vahrson por cada parroquia del cantón, se puede caracterizar el nivel de susceptibilidad de forma más específica, como se resume en las Tablas 6 y 7 respectivamente.

Con el modelo difuso se observó que las parroquias de Macas, Alshi, Zúñac y San Isidro presentaron mayores porcentajes de alta y muy alta susceptibilidad (Tabla 6), lo que puede corresponder a la presencia de estribaciones montañosas combinadas con la expansión de la frontera agrícola que es predominante en esta zona; si bien esto también se presenta en las parroquias de Sevilla Don Bosco y Cuchaentza, la diferencia radica que en las estribaciones del Bosque Kutukú todavía mantiene gran cantidad de bosque primario (Palacios *et al.*, 2019), por lo que su porcentaje de susceptibilidad está condicionado netamente a la topografía del lugar y su significancia igualitaria para todas las variables incluidas en el modelo Fuzzy (Aristizábal *et al.*, 2015; Huggel *et al.*, 2012).

Además, en el caso específico de Macas se identificó que la superficie con la mayor susceptibilidad se ubica precisamente en la zona con menor densidad poblacional (suelo rural), lo cual refleja la realidad del territorio; contrariamente a lo que sucede en los asentamientos humanos de Zúñac y Alshi donde las zonas pobladas están limitadas e incluso intersecadas con áreas susceptibles a deslizamientos (Figura 3), y por ende mantienen un riesgo latente ante esta amenaza natural.

Tabla 6. Porcentaje de susceptibilidad a deslizamientos por parroquia según Lógica difusa

Parroquia	Nivel de susceptibilidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Macas	16.63 ha	913.59 ha	656.16 ha	1302.61 ha	2041.84 ha
	0.34 %	18.53 %	13.31 %	26.42 %	41.40 %
Alshi	0.09 ha	364.19 ha	7555.55 ha	15698.59 ha	3310.08 ha
	0.00 %	1.35 %	28.06 %	58.30 %	12.29 %
Río Blanco	42.14 ha	1538.25 ha	11209.19 ha	6231.53 ha	3456.66 ha
	0.19 %	6.84 %	49.87 %	27.73 %	15.37 %
Sinaí	4402.94 ha	13042.33 ha	14153.33 ha	8529.55 ha	403.73 ha
	10.86 %	32.18 %	34.92 %	21.04 %	1.00 %
Cuchaentza	22.50 ha	7948.34 ha	5893.76 ha	19454.78 ha	1186.47 ha
	0.07 %	23.03 %	17.08 %	56.38 %	3.44 %
General Proaño	8.98 ha	1302.58 ha	2135.92 ha	1787.80 ha	2098.48 ha
	0.12 %	17.76 %	29.12 %	24.38 %	28.62 %
Zúñac	54.17 ha	6991.64 ha	32187.27 ha	20907.25 ha	2338.48 ha
	0.09 %	11.19 %	51.52 %	33.46 %	3.74 %
San Isidro	193.66 ha	1688.88 ha	2027.03 ha	5039.45 ha	3962.79 ha
	1.50 %	13.08 %	15.70 %	39.03 %	30.69 %
Sevilla Don Bosco	33058.08 ha	45306.61 ha	76060.66 ha	67767.55 ha	2370.83 ha
	14.72 %	20.18 %	33.87 %	30.18 %	1.05 %

Por su lado, el modelo Mora-Vahrson refleja un comportamiento similar al resultado con Lógica difusa, destacando las parroquias de Macas, Alshi, Zúñac y San Isidro donde se encuentran los mayores niveles de riesgo potencial, pero se incrementa en este listado a la parroquia de Cuchaentza (Tabla 7). Del mismo modo, en el caso de Alshi y Zúñac se identificaron como zonas de interés ya que a pesar no mostrar un porcentaje significativo en relación al total del territorio parroquial, los niveles de medio y alto riesgo potencial se ubican adyacentes a estos los centros poblados, y que históricamente se han visto afectados por deslizamientos.

Finalmente, este tipo de estudios representan insumos fundamentales para el ordenamiento territorial, con los que se puede prever las zonas de expansión urbana (Palacios, 2020), la clasificación del suelo rural, o la evaluación de los efectos del cambio climático (Lin *et al.*, 2022). Por ello, es importante y necesario cotejar metodologías para generar nueva información más precisa que coadyuve al entendimiento de este tipo de desastres naturales, sobre todo en áreas menos estudiadas como es el caso de la Amazonía ecuatoriana, y que a través

Tabla 7. Porcentaje de susceptibilidad a deslizamientos por parroquia según Mora-Vahrson

Clasificación del riesgo potencial de un deslizamiento					
Parroquia	Muy bajo	Bajo	Moderado	Medio	Alta
Macas	762.81 ha	731.89 ha	137.10 ha	1171.96 ha	2127.03 ha
	15.47 %	14.84 %	2.78 %	23.78 %	43.13 %
Alshi	413.61 ha	1673.65 ha	4538.21ha	12592.51ha	7710.50 ha
	1.54 %	6.21 %	16.85 %	46.76 %	28.64 %
Río Blanco	4724.46 ha	5948.61ha	2049.50 ha	4838.56 ha	4916.62 ha
	21.02 %	26.46 %	9.13 %	21.52 %	21.87 %
Sinaí	12108.81 ha	9468.53 ha	6720.50 ha	5802.61 ha	6431.42 ha
	29.87 %	23.36 %	16.58 %	14.32 %	15.87 %
Cuchaentza	9547.0 ha	3254.61 ha	2959.57 ha	4577.14 ha	14167.5 ha
	27.67 %	9.44 %	8.58 %	13.26 %	41.05 %
General Proaño	789.59 ha	2986.42 ha	501.0 ha	1585.57 ha	1471.17 ha
	10.76 %	40.72 %	6.83 %	21.62 %	20.07
Zúñac	13026.62 ha	21115.87 ha	8539.06 ha	15422.23 ha	4375.01 ha
	20.85 %	33.79 %	13.67 %	24.68 %	7.01 %
San Isidro	2413.43 ha	2237.06 ha	777.34 ha	977.90 ha	6506.06 ha
	18.69 %	17.33 %	6.02 %	7.57 %	50.39 %
Sevilla Don Bosco	51818.89 ha	49369.14 ha	13497.20 ha	48697.84 ha	61180.6 ha
	23.07 %	21.98 %	6.01 %	21.69 %	27.25 %

de la integración de sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos y modelos matemáticos probabilísticos, permiten zonificar los deslizamientos de mejor forma y generar políticas públicas para evitar pérdidas humanas y económicas.

4. Conclusiones

El presente estudio comparó dos metodologías para modelar la susceptibilidad a deslizamientos y su respectiva zonificación, como son Mora-Vahrson y Lógica difusa en el cantón Morona al sureste de la Amazonía ecuatoriana. El resultado de la validación a través del coeficiente de contingencia corregido determinó que el modelo Fuzzy obtuvo una mejor correlación entre las zonas susceptibles a deslizamientos con la presencia de estos, con el 0.894, frente al 0.866 mostrado en el modelo de Mora-Vahrson. En este sentido, se puede concluir que en el área de estudio, el método probabilístico se ajustó de mejor manera a la realidad del territorio, que el método semianalítico heurístico.

Conforme los resultados obtenidos, es recomendable utilizar modelos espaciales derivados de métodos probabilísticos, como es Fuzzy, en especial para trabajos a escalas $\geq 1:50000$, y en territorios similares a los que se analizó en este estudio, como son los territorios amazónicos del Ecuador, donde existe menor disponibilidad de información espacial.

El modelo de Lógica difusa presenta algunas ventajas frente al método Mora-Vahrson referente al proceso de cálculo, debido a que se limita la subjetividad en la ponderación de las variables mediante las funciones de membresía aplicadas a variables físicas continuas, además de reducir la influencia de variables específicas que desencadenan el deslizamiento, tomando todas por igual en una combinación lineal que expresa la probabilidad del deslizamiento, y que en función a los resultados de este estudio, sugiere una mejora para fines generalizados de planificación y evaluación del territorio.

Este tipo de investigaciones son de gran ayuda para fines de cartografía de pronta respuesta, gestión de riesgos y ordenación territorial, con los que se puede tomar medidas de prevención y mitigación para evitar pérdidas humanas y económicas, cuyas proyecciones están correlacionadas con el cambio climático, por lo que es imperante institucionalizar una verdadera transversalización de estos estudios en la generación de políticas públicas e instrumentos de planificación.

Bibliografía

- Abdullah, A.; Aimrun, W.; Nasidi, N.; Hazari, K.; Mohd, L. & Selamat, Z. (2019). Modelling erosion and landslides induced by farming activities at Hilly Areas, Cameron Highlands, Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 81 (6), 195-204.
DOI: <https://doi.org/10.11113/jt.v81.13795>
- Aleotti, P. & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin Engineering Geology Environment*, 58, 21-44.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Aristizábal, E.; García, E. & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78 (1), 621-634.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>
- Aristizábal, E. & Sánchez, O. (2020). Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. *Disasters*, 44 (3), 596-618. DOI: <https://doi.org/10.1111/disa.12391>
- Bahrami, Y.; Hassani, H. & Maghsoudi, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran. *GeoJournal*, 86, 1797-1816.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>
- Carrera, D., Palacios, I., Albán, T., Barahona, J., Calderón, D., Castelo, A., & Vega, M. (2021). Variation of Drinking Water Consumption Due to the Health Emergency of SARS-CoV-2 through Dynamic Modeling in Macas City, Amazon from Ecuador. Information and Communication Technologies. TICEC 2021. *Communications in Computer and Information Science*. 1456, (pp. 267-280).
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89941-7_19

- Cepeda, M.; Palacios, I.; Tierra, A. & Kirby, E. (2018). Multiresolution analysis in the visible spectrum of Landsat-TM images through Wavelet Transform. *Geographia Technica*, 13(1), 20-29. DOI: https://doi.org/10.21163/GT_2018.131.03
- CRED (2019). Natural disasters 2018. Report of the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. <https://www.emdat.be/publications>
- Desinventar.org. (2020). Desinventar Sendai. <https://db.desinventar.org/>
- Huggel, C.; Clague, J. & Korup, O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (1), 77-91. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.2223>
- Ilanloo, M. (2011). A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 19, 668-676.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.05.184>
- INEC (2023). Estimaciones y Proyecciones de Población. <https://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Jaramillo, C., Cruz, M., Padilla, O. & Toulkeridis, T. (2018). Comparative Determination of the Probability of Landslide Occurrences and Susceptibility in Central Quito, Ecuador. 2018 International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG), 136-143. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG.2018.8372341>
- Kanungo, D.; Arora, M.; Sarkar, S. & Gupta, R. (2009). Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping - a review. *Journal of South Asia Disaster Studies*, 2 (1), 81-105.
- Li, L.; Nahayo, I.; Habiayemye, G. & Chistophe, M. (2022). Applicability and performance of statistical index, certain factor and frequency ratio models in mapping landslides susceptibility in Rwanda. *Geocarto International*, 37 (2), 638-656. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1730451>
- Lin, Q.; Steger, S.; Pittore, M.; Zhang, J.; Wang, L.; Jiang, T. & Wang, Y. (2022). Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change. *Science of The Total Environment*, 850. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158049>
- López, R.; Zuluaga, A.; Gómez, F. & Tapia, L. (2020). Aplicación del Método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción de Riesgos de Desastres*, 4 (2), 57-70. DOI: <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>
- Mora, R. (2004). Evaluación de la Susceptibilidad al Deslizamiento del Cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología.
- Mora, S. & Vahrson, W. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología ICE*, 3, p. 32.
- Mora, S. & Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist*, 31 (1), 49-58.
- Nanda, A.; Lone, F.; Ahmed, P. & Kanth, T. (2021). Rainfall-induced landslide movements using linear regression analysis along national highway 1D (Jammu and Kashmir, India). *Modeling Earth Systems and Environment*, 1863-1875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00908>

- Ozturk, U.; Bozzolan, E.; Holcombe, E.; Shukla, R.; Pianosi, F. & Wagener, T. (2022). How climate change and unplanned urban sprawl bring more landslides. *Nature*, 608 (7922), 262-265.
- Palacios, I. (2020). *Generación de un modelo de crecimiento tendencial urbano de la ciudad de Macas (Ecuador) al año 2030, mediante técnicas de modelación espacial multivariable*. [Tesis de maestría, Universitat de Barcelona]. Barcelona.
- Palacios, I. (2020). Susceptibilidad a deslizamientos en la vía Alóag-Santo Domingo, mediante Lógica difusa. *Revista Geoespacial*, 17 (2), 1-12.
DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v17i2.1571>
- Palacios, I. (2023a). Uso de drones para la caracterización morfométrica de sitios arqueológicos en Morona-Amazonía ecuatoriana. *Revista Geoespacial*, 20 (1), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v20i1.3170>
- Palacios, I. (2023b). Fotogrametría aérea con UAV como herramienta para la conservación de sitios arqueológicos. Caso de estudio: Complejo La Esperanza. *Antropología. Cuadernos de Investigación* (28), 59-70.
DOI: <https://doi.org/10.26807/raci.vi28.307>
- Palacios, I. & Arellano, K. (2022). Obtención de alturas niveladas mediante nivelación GPS Caso de estudio: Morona-Ecuador. *Uniciencia*, 36 (1), 429-441.
DOI: <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.26>
- Palacios, I. & Arellano, K. (2021). Modelo predictivo del cambio de cobertura forestal en el Área de Conservación Municipal Quíllamo-Cantón Morona. *Revista Geoespacial*, 18 (1), 1-13. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v18i1.2201>
- Palacios, I. & Rodríguez, F. (2021). Economic valuation of environmental goods and services of the Protector Forest Kutukú – Shaimi, SE Ecuador. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 27 (2), 117-132.
- Palacios, I., & Toulkeridis, T. (2020). Evaluation of the susceptibility to landslides through diffuse logic and analytical hierarchy process (AHP) between Macas and Riobamba in Central Ecuador. 2020 Seventh International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG). (pp. 201-207).
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEDEG48599.2020.9096879>
- Palacios, I. & Toulkeridis, T. (2022). Analysis of the precision of different: digital models of global and local elevations in continental Ecuador. *Revista Geográfica Venezolana*, 63(2), 110-127.
- Palacios, I., Castro, S., & Rodríguez, F. (2019). Almacenamiento de carbono como servicio ambiental en tres reservas naturales del Ecuador. *Revista Geoespacial*, 16 (1), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v16i1.1275>
- Palacios, I.; Ushiña, D. & Carrera, D. (2021). Pixel Purity Index Applied to the Mapping of Degraded Soils by the Presence of Cangahuas in the Ilaló Volcano, Ecuador. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11 (5), 2121-2127. DOI: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.5.14684>
- Palacios, I.; Leiva, C.; Bueaño, X.; Chicaiza, E. & Toulkeridis, T. (2021). Geoid undulation modeling through the Cokriging method–A case study of Guayaquil, Ecuador. *Geodesy and Geodynamics*, 12(5), 356-367.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.04.004>
- Pedrerros, L. & Rivera, S. (2020). Risk indicators of mass removal phenomena according to the Mora - Vahrson method, applied in Pitalito and Campoalegre municipalities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1154, 012037. Cartagena. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1154/1/012037>

- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40 (10), 927-930. DOI: <https://doi.org/10.1130/G33217.1>
- Pourghasemi, H.; Mohammady, M. & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models in GIS: Safarood Basin, Iran. *Catena*, 97, 71-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.005>
- Pradhan, B., Chaudhari, A., Adinarayana, J. & Buchroithner, M. (2012). Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 715-727. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1996-8>
- Quesada, A. & Boraschi, S. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, (61), 17-45. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Rodríguez, M. & Mora, R. (2001). *Estadística Informática. Casos y ejemplos con el SPSS*. Universidad de Alicante.
- Salcedo, D., Padilla, O. & Morales, T. T. (2017). Evaluación de susceptibilidad a deslizamientos mediante lógica Fuzzy y técnicas de evaluación multicriterio en la Avenida Simón Bolívar, Quito. *Revista Geoespacial*, 14(2), 1-20.
- Segura, G., Badilla, E. & Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 2(45), 101-121. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n45/a6n45.pdf>
- SGR. (2023). SitRep No. 95 – Deslizamiento Casual - Alausí. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/SITREP-Nro.-95-Deslizamiento-Alausi-14082023-15h00.pdf>
- Shano, L.; Raghuvanshi, T. & Meten, M. (2021). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio model: the case of Gamo highland, South Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 623. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06995-7>
- SNGRE (2019). Propuesta metodológica para el análisis de amenaza ante movimientos en masa en Ecuador Continental. Quito.
- Sur, U.; Singh, P. & Meena, S. (2020). Landslide susceptibility assessment in a lesser Himalayan road corridor (India) applying fuzzy AHP technique and earth-observation data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11 (1), 2176-2209. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836038>
- Toulkeridis, T.; Chunga, K.; Rentería, W.; Rodríguez, F.; Mato, F.; Nikolaou, S.; Cruz, M.; Besenon, D.; Ruiz, H.; Parra, H. & Vera, X. (2017). The 7.8 Mw Earthquake and Tsunami of the 16th April 2016 in Ecuador - Seismic evaluation, geological field survey and economic implications. *Science of tsunami hazards*, 36, 197-242 https://www.researchgate.net/publication/321596484_The_78_Mw_Earthquake_and_Tsunami_of_the_16th_April_2016_in_Ecuador_-_Seismic_evaluation_Geological_field_survey_and_Economic_implications
- World Bank (2021). Ecuador: Disaster Risk Financial Management Strategy. <https://www.bancomundial.org/es/country/ecuador/publication/ecuador-estrategia-de-gesti-n-financiera-ante-el-riesgo-de-desastres>
- Xu, C.; Xu, X.; Dai, F.; Xiao, J.; Tan, X. & Yuan, R. *et al.* (2012) Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui River watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23 (1), 97-120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0236-7>

RESEÑAS



Hernández-Stefanoni, J. L.; Tun Dzul, F.; Andrés-Mauricio, J. & Hernández Martínez, L. Á. (2023). *Métodos de interpolación espacial para el mapeo de la riqueza de especies usando R*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., pp. 192. ISBN: 978-607-7823-54-4

https://www.researchgate.net/publication/373139552_Metodos_de_interpolacion_espacial_para_el_mapeo_de_la_riqueza_de_especies_usando_R

José Ignacio Sánchez Carbonell¹

La riqueza de especies es un importante indicador de la biodiversidad y es crucial para comprender la complejidad y la salud de diferentes áreas geográficas, hábitats o ecosistemas. Su uso es fundamental para conocer el valor y la diversidad del patrimonio natural de una región o para establecer políticas de conservación adecuadas, por ejemplo. Pero no siempre es fácil conocer esta información. A menudo es necesario realizar una estimación de la riqueza de especies en áreas con información incompleta a partir de los valores observados en otros lugares cercanos. En estos casos, se utilizan métodos geoestadísticos que pueden combinar diferentes métodos de interpolación espacial.

El desarrollo de nuevas tecnologías para el almacenamiento, gestión y análisis geográfico de los datos contribuye a mejorar los geoprocursos necesarios para realizar interpolaciones espaciales, simplificando y generalizando su uso en la sociedad de la información. Es en este punto donde R, un entorno y lenguaje de programación abierto, que proporciona una gran variedad de técnicas estadísticas y gráficas (R Foundation, s.f.) está ayudando a especialistas de todo el mundo a conocer la abundancia de biodiversidad de especies.

Dentro del catálogo de libros en línea del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., se ha publicado (agosto, 2023) el libro *Métodos de interpolación espacial para el mapeo de la riqueza de especies usando R* con el objetivo de facilitar el uso del programa R en la elaboración de mapas de riqueza y abundancia de especies.

La obra puede considerarse una especie de continuación de *Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R* (Hernández Stefanoni *et al.*, 2021) también publicado por el Centro de Investigación Científica

¹ Nosolosig, España, correo electrónico: nosolosig@nosolosig.com.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1594-642X>

de Yucatán y con José Luis Hernández-Stefanoni como autor principal en ambas publicaciones.

El libro se estructura en 9 capítulos, además de una presentación y una introducción. Los dos primeros capítulos están dedicados a R en sí mismo. Así, en el capítulo 1 se explica la instalación del programa y la configuración del entorno de trabajo en R Studio, además de indicar qué paquetes (que extienden las funcionalidades del programa) son necesarios y cómo y desde dónde descargarlos; en el segundo capítulo se realiza una introducción general al programa.

El capítulo 3 trata sobre los datos recogidos para la estimación de la riqueza de especies, previa descripción del área de estudio, una extensión de 64 km² de selva y bosque tropical seco en el estado de Quintana Roo, México. Se detallan tanto los datos procedentes del muestreo de campo, como los obtenidos mediante el satélite Landsat. Los datos se pueden descargar libremente.

En el capítulo 4 se detalla la preparación de los datos para obtener el mapa de coberturas terrestres a partir del satélite Landsat 7 y delimitar el área de estudio. Además, explica cómo crear la base de datos necesaria para realizar las interpolaciones; por último, se crea un objeto `SpatialGrid` vacío, que servirá para almacenar los valores estimados con el método de interpolación.

En el capítulo 5 se presentan los métodos globales de interpolación: polinomios de primer y segundo orden, además de la predicción usando métodos de clasificación.

El capítulo 6 está dedicado a los métodos locales de interpolación, los que no afectan a toda el área de estudio, y los *scripts* necesarios para su uso en R. Se revisan los más usados, como los polígonos de Thiessen, así como la interpolación usando distancia inversa ponderada y la interpolación con Originó.

El capítulo 7 continúa la presentación de diversos métodos de interpolación, en este caso dedicados a los que utilizan datos auxiliares derivados de imágenes de satélite, que buscan aumentar la precisión de la distribución espacial de los atributos estudiados. Se explican tres métodos de interpolación espacial que utilizan datos auxiliares derivados de imágenes de satélite: interpolación dentro de estratos, regresión con Kriging y Random Forest con Kriging. Este capítulo es el último donde se detallan la forma de trabajar en R.

El capítulo 8 se comparan los métodos de interpolación utilizados en el manual, para valorar si son apropiados a no y analizar si se acercan a la realidad. Se comparan las técnicas de interpolación local y los métodos que utilizan datos auxiliares. Como indicador se usa la raíz de la media de los errores al cuadrado (RMSE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de determinación (R²).

Por último, en el capítulo 9 se resume el trabajo realizado a lo largo del manual y se exponen una serie de consideraciones finales.

Finaliza el libro con las referencias bibliográficas y un apéndice. En cuanto a las referencias, prácticamente todas ellas son en inglés. En cuanto a la actualidad de las referencias, de las 32 obras incluidas, nueve de ellas se han publicado en los últimos 10 años y solo hay una obra posterior al año 2020. El apéndice

incluye los enlaces para descargar los datos requeridos y los scripts utilizados, así como la explicación de los archivos y de la estructura de las carpetas.

El libro está escrito con un lenguaje claro y didáctico, de acuerdo con su objetivo principal, que tal como señalan los autores, es el de «servir como una guía para las y los usuarios que requieran estimar la distribución espacial de la riqueza de especies o cualquier otra variable de interés en un área de estudio» (p. 7). Los posibles apuros para seguir las instrucciones del libro seguramente provengan más de la eventual falta de formación de los lectores y lectoras en geoestadística que en la claridad de la exposición.

El interés de la obra no es tanto por las aportaciones al debate sobre la fiabilidad de los diferentes métodos globales y locales de interpolación, como su desarrollo usando el programa R para un caso muy concreto (la cartografía de la riqueza de especies). Esto lo hace único entre la literatura en español sobre el uso de R en el ámbito geográfico o geoespacial.

Es de agradecer además la generosidad de los autores y del Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., al ofrecer este libro en acceso abierto, sin coste y con todos los datos disponibles para su descarga.

Bibliografía

- Guerra, J. B. (2020). Geocomputation with R (reseña). *Revista Cartográfica* (101), 179-180. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i101.759>
- Hernández Stefanoni, J.; Castillo Santiago, M.; Mauricio, J.; Mas, J.-F.; Tun Dzul, F. & Dupuy Rada, J. (2021). Mapeo de la biomasa aérea de los bosques mediante datos de sensores remotos y R. México: El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR) y Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY). https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Ligas_Interes/2021/Portada_extendida_MANUAL_BIOMASA_ISBN_CICY.pdf
- Mora, E. C. (2020). Análisis espacial con R: Usa R como un Sistema de Información Geográfica (reseña). *Revista Cartográfica* (101), 245-246. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.694>
- R Foundation. (s.f.). R: The R Project for Statistical Computing. Recuperado de R: The R Project for Statistical Computing: <https://www.r-project.org/>
- Sánchez, J. I. (diciembre de 2023). Análisis geográfico con R: bibliografía en español. <https://www.nosolosig.com/articulos/analisis-geografico-con-r-bibliografia-en-espanol>

Romero-Girón Deleito, J. (2022). *Historia de la Cartografía. La evolución de los mapas. El mundo medieval, de Bizancio al Renacimiento*. Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), España, pp. 464, ISBN 978-84-416-7490-5. DOI: <https://doi.org/10.7419/162.14.2022>

Norberto Jorge Onesti¹

En palabras del autor en la Presentación (p. 15) de este segundo volumen de *Historia de la Cartografía. La evolución de los mapas*, es parte de la obra formado por tres volúmenes que recogen el Mundo Antiguo, el Mundo Medieval y el Mundo Moderno: "...el Mundo Medieval, que abarca el período comprendido desde la caída del Imperio Romano de Occidente hasta los albores del Renacimiento. La Historia se cerrará en el siglo XVII...".

El volumen consta de seis capítulos:

- La cartografía en el Imperio Bizantino;
- La cartografía en el Islam;
- La cartografía en la Europa Medieval;
- La cartografía del Atlántico Norte;
- La cartografía náutica Medieval;
- La cartografía medieval en otras civilizaciones

Cada uno de los seis capítulos va precedido de una introducción histórico-geográfica, nota al pie y la bibliografía utilizada al final del texto.

El autor indica:

Este libro es una Historia de la Cartografía. Existen historias de la cartografía, pero, o son de un nivel básico al alcance del gran público (por ejemplo, *Great Maps*, de Jerry Brotton, Londres, 2014),² o se trata de obras de nivel académico, redactadas por especialistas, entre las que destaca la monumental Historia de la Cartografía publicada por Chicago University Press, aunque ya de fecha antigua. Son muy numerosos, en cambio, los trabajos, monografías, artículos y ensayos sobre cartografía histórica, pero, naturalmente, están limitados al objeto de su estudio. Este trabajo pretende llenar el espacio no cubierto de una Historia de la Cartografía

¹ Investigador independiente. correos electrónicos: onestinorberto@yahoo.com.ar, onestinorberto@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-7737>

² Brotton, Jerry (2014), *Grandes mapas: las obras maestras del mundo exploradas y explicadas*. Dorling Kindersley Limited, pp. 256, ISBN 02411867579780241186756

situada a un nivel superior al básico, dirigido a las personas amantes de la cultura con interés por adentrarse en una rama de la Ciencia poco conocida más allá de los especialistas. No es una obra de investigación, ni pretende, en consecuencia, efectuar aportaciones originales, pero tampoco es una obra de mera divulgación. Su contenido la cartografía histórica, es una materia de difícil tratamiento si se quiere redactar un texto de cómoda lectura. Hay que adentrarse en datos, nomenclatura específica y comentarios que dificultan ese objetivo, especialmente cuando hay que detenerse en el estudio pormenorizado del origen y descripción de algunos mapas... Este trabajo es un compendio sistemático de textos e imágenes obtenidos de diversas fuentes. Hoy día disfrutamos de una ingente información que puede obtenerse a través de Internet, pero muchos textos y datos aparecen sin contrastar, sin referencia a las fuentes, y son frecuentemente copias de copias que arrastran los mismos errores y contradicciones. He procurado utilizar únicamente información de textos fiables, procedentes de estudiosos y expertos, accesibles en Internet, y en los libros, revistas y documentos que he consultado. Ha sido muy valiosa la información aportada en Internet por las grandes Universidades, Bibliotecas y Museos que han digitalizado sus fondos y archivos, así como por revistas e instituciones especializadas.

Para el estudio de la *Historia de la Cartografía*, tanto a nivel individual como en entornos educativos, esta obra constituye una fuente en español altamente pertinente. Ofrece un punto de partida sólido para abordar los principales temas, permitiendo a los lectores adentrarse en ellos con fundamentos sólidos. Sin embargo, la amplitud y profundidad de la investigación personal será lo que determine la suficiencia o las posibles limitaciones de lo aprendido a partir de esta fuente.

Indudablemente, esta *Historia de la Cartografía alcanza un nivel superior al básico*, ofreciendo una argumentación histórico-geográfica sumamente interesante y amplia.

En cuanto al *compendio sistemático de textos e imágenes*, se puede afirmar que es adecuado y orientativo, se apreciaría una mayor definición en las imágenes, pero se reconoce las enormes dificultades para obtenerlas. En los textos donde la ilustración desempeña un papel crucial, se compensa con un texto preciso y detallado. Con un total de 557 notas al pie de página y una bibliografía extensa de casi 10 páginas, esta obra se posiciona como una lectura sumamente interesante y valiosa para aquellos interesados en la historia de la cartografía.

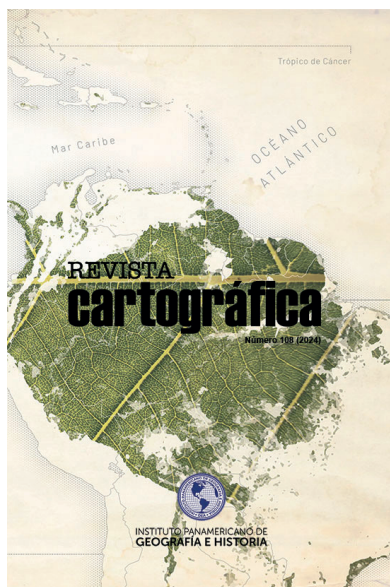
Finalmente se espera con entusiasmo la edición de la tercera y última parte completa, la del Mundo Moderno, ya anticipada con el primer volumen.

Nota: Para los lectores interesados, se indican a continuación los datos para acceder al volumen I:

Romero-Girón Deleito, Juan (2018). *Historia de la Cartografía. La evolución de los mapas. Primera parte. El mundo antiguo de la prehistoria a Roma*. pp. 155. Madrid. Edición personal del autor. ISBN 978-84-9946-557-9.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=723465>

Portada núm. 108. Las cuencas tropicales de América: Amazonas y Caribe

Santiago Mora Van Cauwelaert¹



La portada del número 108 de la *Revista Cartográfica*, invita a reflexionar sobre las selvas del continente americano, delimitada al norte por el Trópico de Cáncer y al sur por el Trópico de Capricornio. El mapa revela dos grandes regiones que caracterizan la zona tropical de América: la cuenca del Amazonas y la cuenca del Caribe. Cada una es emblemática de aquello que se considera tropical y, a la vez, contrastan en muchos otros sentidos

¹ Taller Siranda (<https://www.tallersiranda.com>), e-mail: mora@tallersiranda.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0141-5821>

Al sur, la Amazonia extiende de manera continua su selva por casi 7 millones de kilómetros cuadrados, superficie en la que podríamos colocar todos los países de Europa Occidental. Al ser el bosque tropical más grande del planeta, su función en la regulación climática mundial es mayúsculo, lo cual le ha valido el título de “Pulmón de la Tierra”. Al norte del Ecuador, la zona tropical es diferente y se caracteriza por la discontinuidad. El arco de islas volcánicas que se extiende de Trinidad hasta Cuba, figura como puerta de entrada al continente y delimita el mar Caribe. Allí, el contacto del mar con las selvas es clave: las aguas que escurren por los ríos se mezclan con el agua salada, dando lugar a uno de los biomas con mayor diversidad de especies: el manglar.

Sin embargo, ambas regiones comparten la definición de tropical. Son intempestivas, siempre cambiantes; una mañana asoleada con cielo azul puede tornarse en una tormenta de lluvia en unos pocos minutos. En esas condiciones de precipitación y temperatura la vegetación no espera, cualquier espacio es óptimo para su crecimiento. Un camino en estas regiones, incluso pavimentado, desaparece al cabo de un año si no se clarea la selva. Lo que en el día parece ser un lugar tranquilo lleno de colores, en la noche se torna ruidoso, oloroso, oscuro. En los trópicos al ser humano no le queda más que aceptar tener una relación de humildad con la naturaleza, nos beneficiamos de la misma pero definitivamente no la poseemos.

En la actualidad, los cartógrafos y especialistas en sistemas de información geográfica contamos con un gran número de recursos técnicos que nos permiten aproximarnos a los bosques tropicales como nunca antes. Ahora podemos caracterizar la biomasa forestal gracias a los sensores de múltiples longitudes de onda, imágenes de radar. El acceso de imágenes de satélite se democratiza, los drones hacen posible obtener imágenes aéreas a costos accesibles y muchas otras fuentes de información basadas en teledetección ahora son de acceso público. Por ejemplo, para elaborar el mapa de la portada se utilizó como fuente principal de información la base de datos de Global Forest Watch (globalforestwatch.org), sitio dedicado al monitoreo de bosque y diseñado para apoyar en toda acción que tenga como propósito disminuir la deforestación y la degradación de los bosques alrededor del mundo.

Hacer visible estas regiones es una manera de recordar los valiosas que es la selva en América. Como una hoja que se conserva en un cuaderno de botánica, tenemos que observarla con detenimiento, describirla con detalle, estudiarla y, esencialmente, conocerla.

Bibliografía:

Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 342, 850-53. <https://doi.org/10.1126/science.12446>

Definición de la Revista

La *Revista Cartográfica* se publica desde 1952, es una publicación de la Comisión de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia un Organismo Especializado de los Estados Americanos (OEA).

El objetivo de la Revista es contribuir a la difusión del conocimiento en las áreas de cartografía, geodesia e información geográfica en general; promoviendo un enfoque que contribuya a compartir investigaciones, estudios y publicaciones en las áreas de conocimiento que son de interés para la revista.

La Revista publica artículos científicos (investigación, revisión y temáticos) y reseñas en los cuatro idiomas oficiales del IPGH (español, inglés, francés y portugués). Los artículos que se propongan para su publicación deberán ser originales y no estar publicados o propuestos para tal fin en otra revista.

Desde 2016 tiene una periodicidad semestral. La recepción de artículos está abierta permanentemente.

Proceso de evaluación por pares

En atención a las buenas prácticas editoriales la *Revista Cartográfica* los artículos que cumplan los requisitos formales y de calidad serán evaluados por pares académicos externos a la institución editora. Se aplicará el sistema de evaluación "doble ciego".

Secciones

Artículos:

- Artículo de investigación: documentos que presentan resultados de nuevas investigaciones, u otras contribuciones originales que sean de aporte a las ciencias y disciplinas de interés para la Revista.
- Artículo de revisión: documentos que analicen, sistematicen e integren resultados de material ya publicado sobre un área del conocimiento, con el objeto de divulgar los avances y las tendencias de desarrollo en dicha área. Requiere una cuidadosa y rigurosa revisión bibliográfica del tema, un artículo de revisión no debería considerar menos de 60 referencias directas e indirectas. Solo para áreas de conocimiento de desarrollo muy reciente se consideran artículos de revisión con un número menor de referencias.
- Artículos temáticos: documentos que respondan a una convocatoria de la Revista para conformar un número temático coordinado por un destacado especialista como editor invitado.

Reseñas:

Documentos que presentan un análisis crítico de libros u otras monografías que sean significativa para las ciencias y disciplinas de interés de la revista, que

hayán sido publicados en los últimos tres años y que cuenten con ISBN. De forma excepcional se aceptarán reseñas de libros no actuales, clásicos, que sean significativos o de referencia para análisis y estudios actuales.

Norma para autores

Los artículos y reseñas se enviarán únicamente en formato digital a través de este enlace <https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar>. Por lo tanto, es necesario que el autor este registrado de forma correcta y que disponga de usuario y contraseña.

Los archivos de texto se enviarán en formato Word, utilizando las plantillas correspondientes para que cada tipo de documento aceptado por la Revista.

Para asegurar la evaluación ciega del artículo, el archivo debe enviarse sin datos ni metadatos que permitan la identificación del autor. No se debe incluir nombre, afiliación, correo electrónico u organismo financiador en el documento. Estos datos se recogen de manera separada en la plataforma OJS, cuando se ingresan los metadatos del envío. Se solicita completar obligatoriamente los siguientes campos del formulario correspondiente a Autoría y colaboradores/as: Nombre/s y Apellido/s, contacto (e-mail), país, identificador ORCID y afiliación institucional.

Los documentos que no cumplan los requisitos de anonimato serán retirados del proceso de evaluación.

La revisión de los artículos incluye el uso de software antiplagio Ithenticate.

Los **Artículos** deberán tener una extensión máxima de 25 páginas, incluyendo figuras, tablas y bibliografía.

Las figuras y tablas deberán ubicarse dentro del texto. Las figuras se deben enviar por separado en formato JPG o PNG, con una resolución mínima de 300 dpi/ppp (o superior de acuerdo con el tamaño de la figura) sin compresión y a color. Para la impresión del número de la Revista se modificarán a escala de grises, siempre que no afecte la correcta comunicación de la información, en particular los mapas.

Las citas y referencias bibliográficas se harán según las Normas APA. Se recomienda el uso de gestores de referencias bibliográficas, como Zotero o Mendeley. Se debe incluir enlace DOI o enlace web en todos los casos que sea posible.

Las **reseñas** tendrán una extensión máxima de 8.000 caracteres con espacios incluidos.

Más información:

www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Directrices

Evaluación de pares:

<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/EvaluacionPares>

María Ester Gonzalez
 Editora
 Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
 Universidad de Concepción
 Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile
 Correos electrónicos:
editor_revista_cartografica@ipgh.org | mariaesgonzalez@udec.cl

No se devolverá el material enviado.

Función editorial del Instituto Panamericano de Geografía e Historia

El IPGH publica seis revistas, impresas y distribuidas desde México. Estas son: *Revista Cartográfica*, *Revista Geográfica*, *Revista Geofísica*, *Revista de Historia de América*, *Antropología Americana* y *Revista de Arqueología Americana*.

Se invita a todos los investigadores y profesionales de las áreas de interés del IPGH: cartografía, geografía, historia, geofísica y ciencias afines, a que presenten trabajos de investigación para que sean publicados en nuestras revistas científicas.

Si requiere mayor información, favor de comunicarse a:

Departamento de Comunicación Social
 Secretaría General del IPGH
 Ex-Arzobispado 29, Colonia Observatorio, 11860 Ciudad de México, México
 Tels.: (+52-55) 5277-5888 | 5515-1910
 Correo electrónico: publicaciones@ipgh.org

Edición del
Instituto Panamericano de Geografía e Historia
realizada en su Departamento de Comunicación Social
Ex Arzobispado núm. 29, Col. Observatorio
11860, Ciudad de México, México
Tels.: 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910
publicaciones@ipgh.org
2024

**ESTADOS MIEMBROS
DEL
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA**

Argentina

Belice

Bolivia

Brasil

Chile

Colombia

Costa Rica

Ecuador

El Salvador

**Estados
Unidos
de América**

Guatemala

Haití

Honduras

México

Nicaragua

Panamá

Paraguay

Perú

**República
Dominicana**

Uruguay

Venezuela

EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) fue fundado el 7 de febrero 1928 por resolución aprobada en la Sexta Conferencia Internacional Americana que se llevó a efecto en La Habana, Cuba. En 1930, el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos construyó para el uso del IPGH, el edificio de la calle Ex Arzobispado 29, Tacubaya, en la Ciudad de México.

En 1949, se firmó un convenio entre el Instituto y el Consejo de la Organización de los Estados Americanos y se constituyó en el primer organismo especializado de ella.

El *Estatuto Orgánico* del IPGH cita en su Capítulo II, artículo 2, su Misión:

1. Fomentar, coordinar y difundir los estudios pertenecientes a sus áreas de interés, las cuales son Cartografía, Geografía, Historia, Geofísica y las ciencias afines en beneficio de América;
2. Apoyar la iniciativa, innovación y generación de conocimiento en sus áreas de interés, a través de estudios, capacitaciones y trabajos de sus Comisiones;
3. Promover la cooperación interdisciplinaria entre los institutos de América y organizaciones internacionales afines.

Solamente los Estados Americanos pueden ser miembros del IPGH. Existe también la categoría de Observador Permanente, actualmente se encuentran bajo esta condición: España, Francia, Israel, Jamaica y República de Corea.

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

1. Asamblea General;
2. Autoridades;
3. Secretaría General; y
4. Comisiones.

Además, cada Estado Miembro designa y crea oficialmente una Sección Nacional, órgano establecido para el cumplimiento de la misión, visión y estrategia científica del IPGH en el ámbito nacional, contando para ello con el apoyo financiero de su gobierno.



OCEANO
PACÍFICO

ARTÍCULOS

A relação entre o ambiente urbano e o bem-estar: Análise em Lisboa, Portugal, utilizando redes sociais *Iuria Betco y Jorge Rocha* • **Mapeo espacial-temporal de la cobertura nival en la Sierra del Aconquija, provincias de Tucumán y Catamarca, Argentina, de 2014 a 2021** *Mario Arnaldo Toledo, Gloria Patricia Ibañez Palacios y Ana Lía Ahumada* • **Normalización de base de datos de remociones en masa en la Región de Aysén, Chile** *Constanza Jorquera-Flores y María Ester Gonzalez-Campos* • **Airborne GNSS reflectometry for coastal monitoring of sea state** *Monitoreo del estado del mar en zonas costeras usando GNSS reflectometría* *Mario Moreno* • **Examinando la relación de la profundidad óptica de aerosoles derivada de imágenes MODIS con contagios por COVID-19 en Santiago, Chile** *Marco A. Peña y Manuel Fuenzalida* • **Comparación entre los métodos Mora-Vahrson y Lógica difusa en la susceptibilidad a movimientos de tierra en el cantón Morona-Amazonía ecuatoriana** *Iván Fernando Palacios Orejuela*

RESEÑAS

Métodos de interpolación espacial para el mapeo de la riqueza de especies usando R *José Ignacio Sánchez Carbonell* • **Historia de la Cartografía. La evolución de los mapas. El mundo medieval, de Bizancio al Renacimiento** *Norberto Jorge Onesti*

ISSN 2663-3981

Tropico de Capricornio