

MUDANÇAS NA COBERTURA GLACIAL E RISCOS CRIOSFÉRICOS NA VILLA O'HIGGINS, PATAGÔNIA CHILENA, UTILIZANDO O SENSORIAMENTO REMOTO E PAH

Glacial changes and cryosphere risks in Villa O'Higgins, Chilean Patagonia, using Remote Sensing and the Analytic Hierarchy Process

Cambios en la cobertura glacial y riesgos criosfericos en Villa O'Higgins, Patagonia chilena, usando Teledetección y PJA

Alice Seben Campana*
Kátia Kellem da Rosa**
Carina Petsch***
Anderson Ribeiro de Figueiredo****

*Mestra em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Vacaria, Brasil – alice.scampana@gmail.com

**Professora Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil – katiakellem@gmail.com

***Professora adjunta na área de Geografia Física, Ensino e Cartografia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Brasil – carinapetsch@gmail.com

****Pós-doutorando em adaptação às mudanças climáticas e planejamento de cenários na Universidade de Wyoming (UW), Porto Alegre, Brasil – anderson.chb25@gmail.com

Recebido em 06/05/2025. Aceito para publicação em 10/05/2025.
Versão online publicada em 03/09/2025 (<http://seer.ufrgs.br/paraonde>)

Resumo:

A região da Villa O'Higgins, Patagônia chilena, situa-se em um contexto de influência da dinâmica de degelo glacial, onde constata-se eventos de inundações no rio Mosco que afetam a população local. O objetivo desta pesquisa foi identificar as áreas de maior suscetibilidade a inundações na comunidade e relacioná-las às características de uso e cobertura da terra, verificando as mudanças na cobertura glacial e lacustre entre 1985-2021, por sensoriamento remoto. Levantaram-se informações sobre eventos de inundações a partir de reportagens digitais. Foram obtidas classes de uso e cobertura da terra com dados de 2011 e imagens de satélite PlanetScope de 2021. Dados geoespaciais de drenagem, elevação, declividade, geologia e o uso e cobertura da terra foram considerados ao aplicar o Processo Analítico Hierárquico (PAH) para obter as áreas suscetíveis à inundação. Relatos em mídias eletrônicas indicaram o aumento do aporte d'água no Rio Mosco nos últimos anos proveniente do degelo a montante, além do aumento de eventos de chuvas intensas. A cobertura glacial teve uma perda de 40,83% de área e a cobertura lacustre aumentou em 422,22% de área entre 1985-2021. As áreas com alta e muito alta suscetibilidade à inundação correspondem a 4,11% da área das sub-bacias e estão associadas às classes rural e área urbanizada. A identificação das áreas suscetíveis à inundação na comunidade auxiliará no entendimento desses eventos futuros e em estudos da vulnerabilidade socioambiental diante da crise climática e de seus impactos.

Palavras-chave: Suscetibilidade à inundação. Riscos criosféricos. Resposta paraglacial. Vulnerabilidade socioambiental. Ambiente de montanha.

Abstract:

The region of Villa O'Higgins, Chilean Patagonia, is influenced by the dynamics of glacier melting and suffers from floods from the Mosco River that affect the local population. The aim of this research was to investigate areas susceptible to flooding in the community and relate them to land use and land cover characteristics, verifying changes in glacial and lake cover between 1985 and 2021, using remote sensing. Information on flood events was gathered from digital news reports. Land use and coverage classes have been obtained using 2011 data and 2021 PlanetScope imagery. Geospatial data on drainage, elevation, slope, geology and land use and coverage were considered when applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to identify areas susceptible to flooding. Reports from residents in electronic media indicated that there has been an increase in the supply of water to the Mosco River in recent years from the melting of snow and glaciers upstream, in addition to an increase in heavy rainfall events. Glacial coverage lost 40.83% of its area and lacustrine coverage increased by 422,22% between 1985 and 2021. Areas with high and very high susceptibility to flooding correspond to 4.11% of the sub-basin area and are associated with rural classes and urbanized areas. The identification of areas susceptible to flooding in the community will help in understanding these future events and in studies of socio-environmental vulnerability to the climate crisis and its impacts.

Key words: Flood susceptibility. Cryospheric hazards. Paraglacial response. Socio-environmental vulnerability. Mountain environment.

Resumen:

La región de Villa O'Higgins, en la Patagonia chilena, se ubica en un contexto de influencia de la dinámica del deshielo glaciar, donde se observan eventos de inundaciones en el río Mosco que afectan a la población local. El objetivo de esta investigación fue identificar las áreas más susceptibles a inundaciones en la comunidad y relacionarlas con las características de uso y cobertura del suelo, verificando cambios en la cobertura glaciar y lacustre entre 1985 y 2021, mediante teledetección. La información sobre inundaciones se recopiló a partir de informes digitales. Las clases de uso y cobertura del suelo se obtuvieron a partir de datos de 2011 e imágenes satelitales PlanetScope 2021. Se consideraron datos geospaciales sobre drenaje, elevación, pendiente, geología y uso y cobertura del suelo al aplicar el Proceso Analítico Jerárquico (PAH) para llegar a áreas susceptibles a inundaciones. Informes en medios electrónicos indicaron un aumento en la cantidad de agua al río Mosco en los últimos años debido al derretimiento del hielo río arriba, además de un aumento en los eventos de lluvias intensas. La cobertura glaciar perdió el 40,83% del área y la cobertura lacustre aumentó un 422,22% entre 1985 y 2021. Las áreas con susceptibilidad a inundaciones alta y muy alta corresponden al 4,11% del área de la subcuenca, estando asociadas a las clases rurales y áreas urbanizadas. La identificación de áreas susceptibles a inundaciones en la comunidad ayudará en la comprensión de estos eventos futuros y en estudios de vulnerabilidad socioambiental ante la crisis climática y sus impactos.

Palabras-clave: Susceptibilidad a inundación. Riesgos criosféricos. Respuesta paraglaciar. Vulnerabilidad socioambiental. Ambiente de montaña.

1. Introdução

Os riscos criosféricos são todos os eventos que geram perigo e ameaçam vidas humanas, causados ou relacionados aos processos da criosfera (Ding *et al.*, 2021), afetando populações em todo planeta, incluindo as áreas de montanhas como os Andes, Alpes e Himalaia, além de áreas de altas latitudes, como o Ártico e a Patagônia. O recuo de geleiras, inundações por transbordamento, rompimento de lagos glaciais, as avalanches, os deslizamentos de terra e as enxurradas e inundações relacionadas à variabilidade do aporte hídrico do degelo da neve e gelo podem levar à impactos negativos ou mesmo catastróficos para as populações regionais, conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013; 2021).

Estudos sobre as regiões de montanha indicam que várias localidades estão sujeitas a inundações devido ao transbordamento de lagos e rios (Bat'ka *et al.*, 2020). Esse risco criosférico tem sido cada vez mais estudado na região da Patagônia devido à crescente preocupação da população com a retração glacial e consequente crescimento em número e tamanho de lagos proglaciais (Anaconda; Norton; Mackintosh, 2014; Wilson *et al.*, 2018; 2019).

Segundo Shugar *et al.* (2020), é verificado globalmente o aumento das áreas dos lagos glaciais para o período entre 1990 - 2018 (crescimento de volume de 48%). Os Andes Centrais e a Patagônia Norte e Sul apresentam forte tendência geral de crescimento de lagos glaciais entre 1986 e 2016 como consequência do degelo glacial (Wilson *et al.*, 2018). O informe técnico produzido pelo *Servicio Nacional de Geología y Minería* (SERNAGEOMIN, 2018), aponta que a região onde está a Villa O'Higgins, Patagônia central, sul do Chile enfrenta períodos de chuvas intensas, causando inundações no Rio Mosco. Tais inundações estão cada vez mais frequentes devido à tendência de aumento das temperaturas do ar e eventos extremos de precipitação na região nas últimas décadas (SERNAGEOMIN, 2018).

Considerando a relação entre o aumento da quantidade de lagos pelo aporte de degelo, a ocorrência de eventos de precipitação concentrada e a ocorrência de áreas inundadas a jusante, entende-se que, para diminuir os impactos negativos de uma inundação, é relevante avaliar o seu risco potencial aos desastres naturais relacionados à água (ICIMOD - *International Centre for Integrated Mountain Development*, 2011). Miranda (2016) mostra que o mapeamento dessas áreas suscetíveis ao evento de inundação é de extrema relevância para o planejamento do território, subsidiando a prevenção e o controle de desastres naturais.

A análise da suscetibilidade ambiental, o mapeamento e a espacialização dos dados de áreas que sofrem com a inundação possibilitará compreender, visualizar e buscar uma melhor gestão dos territórios expostos a situações de perigo, auxiliando no planejamento de estratégias de adaptação, no controle de desastres associados e de sua antecipação, como apontado em outros estudos (Anaconda; Norton; Mackintosh, 2014; Bertoldi *et al.*, 2024; Carrivick; Tweed, 2013), compreendendo qual camada social está exposta a esse risco. Como afirma Figueiredo (2017), a sociocriosfera andina apresenta elevada intensidade geodinâmica, por isso se faz importante o uso de estratégias para redução de possíveis desastres ambientais.

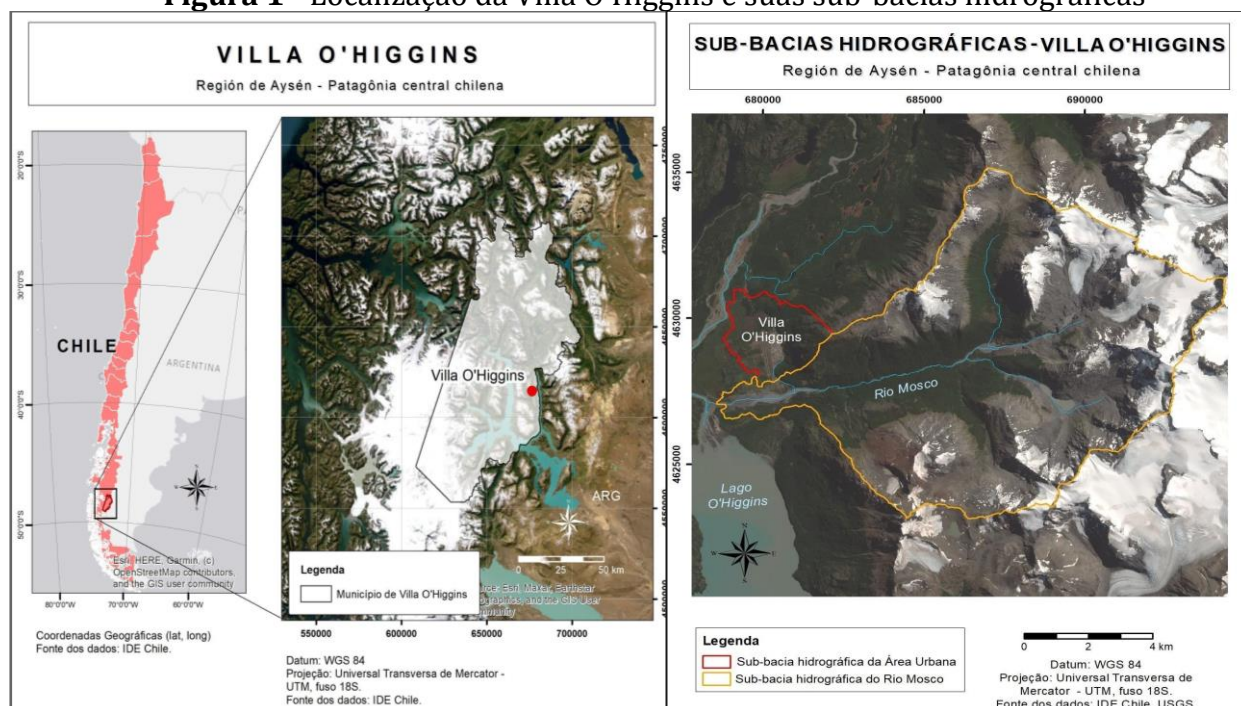
Esta pesquisa objetiva identificar as áreas de maior suscetibilidade a inundações na Villa O'Higgins (48°28'2"S, 72°33'27"O) e relacioná-las às características de uso e cobertura da terra da área, verificando as mudanças na cobertura glacial e lacustre no contexto da sub-bacia do rio Mosco, setor oeste da Sierra de Sangra, Região de Aysén, Patagônia Central, Chile.

1.1 Área de Estudo

A comunidade de Villa O'Higgins encontra-se na região mais austral de Aysén, situando-se na fronteira entre o Chile e Argentina, próximo à região de Magallanes e o Parque Nacional Bernardo O'Higgins (Figura 1). O parque está localizado no Campo de Gelo Patagônico Sul, que abrange grande extensão de geleiras patagônicas na Cordilheira dos Andes.

A sub-bacia hidrográfica do Rio Mosco tem aproximadamente 95,16 km². Esse rio percorre aproximadamente 10,7 km desde a geleira Mosco até a sua foz. A área com maior densidade demográfica está situada a 1,2 km ao norte do Rio Mosco. De acordo com o Atlas Agroclimático do Chile para a Villa O'Higgins, a temperatura média alta anual para a região é de 11.6°C e a temperatura média baixa é de 3.6°C anual. A precipitação média entre os anos de 2010 e 2018 foi de 1928,62 milímetros ao ano (ARCLIM, 2020). Conforme a classificação de Köppen, o clima é classificado como Clima temperado oceânico e úmido (Cfb), caracterizado por temperaturas mais baixas e pela inexistência de estação seca. É influenciado pela maritimidade que diminui a oscilação da temperatura. As precipitações são abundantes e homogêneas em todo o ano (Carrión, 2017). A amplitude topográfica das duas sub-bacias hidrográficas varia entre 262 metros em menor altitude, até 2.211 metros, onde estão localizadas as áreas mais montanhosas e as geleiras.

Figura 1 - Localização da Villa O'Higgins e suas sub-bacias hidrográficas



Fonte: a autora (2023)

A comunidade pode ser acessada por via aérea, terrestre ou fluvial/lacustre (Rio Mayer, Rio Mosco, Lago O'Higgins ou dos Lagunas). Sua criação é datada em 1966 com a finalidade de colonização, criação de gado e introdução da população chilena na região. Sua área urbana é de aproximadamente 0,47 km² e área total de 8.182,5 km². Sua população, em 2017, era de 625 habitantes, com uma densidade demográfica de 0,05 habitantes por km². Na comunidade, os níveis escolares alcançam o ensino médio, com uma média de 10,4 anos de estudo por pessoa. Aproximadamente 85,2% da população acima de 15 anos está em situação de trabalho, a sua maioria no setor terciário (78,4%), como mercados, estabelecimentos de artesanatos, serviços de alojamento (campings, hostels, etc), serviços de alimentação e prestação de serviços para o turismo, sendo este um dos setores de ocupação da população com idade ativa na comunidade. Contudo, segundo a *División de Planificación y Desarrollo Regional* - DPDR (2020), a maioria dos empregos disponíveis são temporários e de baixa remuneração, principalmente durante o verão quando começa a temporada turística, gerando instabilidade na economia familiar.

O setor primário (17,8%) é caracterizado principalmente pela exploração de recursos florestais sobre espécies nativas, com plano de manejo concedido pela CONAF (Corporação Florestal Nacional do Chile), tendo como finalidade a venda para uso doméstico. A agricultura não apresenta uso intensivo/extensivo devido às condições climáticas e da baixa qualidade do solo para plantio. Geralmente são realizadas atividades agrícolas de pequena escala e com a utilização de estufas.

A comunidade também é uma das principais representantes quanto às atividades relacionadas à pecuária na região de Aysén, ficando atrás somente de Cochrane (DPDR, 2020). As condições topoclimáticas da zona permitem a criação tanto de gado ovino, para a produção principal de lã para venda, e bovino, apesar do baixo nível de venda, já que os principais compradores se encontram em uma região mais afastada da comunidade, anulando a rentabilidade dos produtores devido aos gastos com transporte (DPDR, 2020).

2. Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho consiste em realizar uma análise espacial das áreas suscetíveis à inundação, integrando diferentes dados geoespaciais (Tabela 1). Desta forma, usando como base o estudo realizado por Miranda (2016), um conjunto de técnicas e procedimentos foram utilizados como instrumentos de mapeamento em questão, são eles: Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e sensoriamento remoto, e um Processo Analítico Hierárquico (PAH).

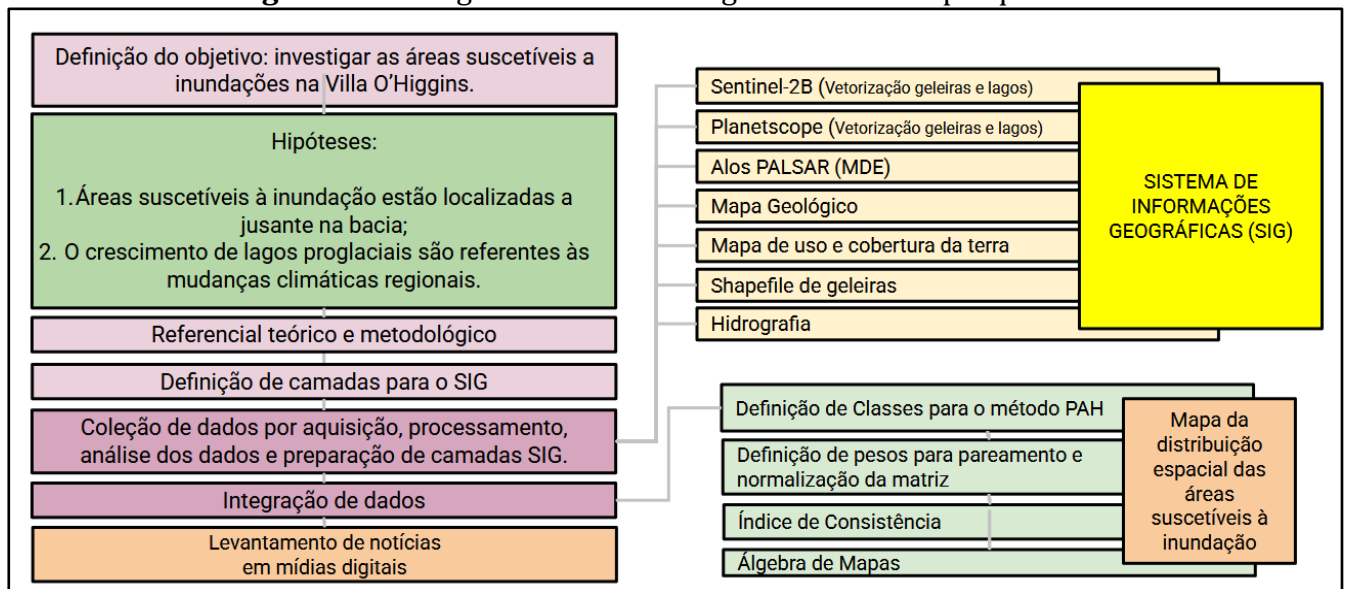
O método PAH decompõe hierarquicamente critérios escolhidos de acordo com a influência no processo de inundação da Villa O'Higgins e teve como unidade espacial de análise de suscetibilidade à inundação a sub-bacia hidrográfica do Rio Mosco e a sub-bacia hidrográfica da área urbanizada, regiões afetadas pelas inundações. A finalidade foi a produção do mapa de áreas suscetíveis à inundação através de diferentes etapas (Figura 2).

Tabela 1 - Dados adquiridos

Dado	Data	Escala/ Resolução	Fonte
Sentinel-2B (RGB 432 e RGB 832)	21/02/21	10 m	Earth Explorer-USGS
Landsat 5 (RGB 321)	27/01/1985 23/01/1994 20/02/2011	30 m	Earth Explorer- USGS
Mapa de uso e cobertura da terra	2011	1:50.000	Geoportal de Chile
Mapa Geológico	2003	1:1.000.000	SERNAGEOMIN
Mapa inundação 2018	05/02/2018 19/04/2018	1:47.222,22	SERNAGEOMIN
MDE ALOS Palsar	2000	12,5 m	ASF Data Search
Imagem de satélite PlanetScope (RGB 432) (<i>surface reflectance PSScene 4band</i>)	25/02/2021	3 m	Planet Team (2017)
Mapa de Geleiras e divisores de drenagem	2000, 2016	30 m	GLIMS
Hidrografia	1976	1:50.000	Geoportal de Chile

Fonte: a autora (2023)

Figura 2 - Fluxograma da metodologia realizada na pesquisa



Fonte: a autora (2023)

2.1 Notícias em Mídias Digitais

Esta etapa metodológica consistiu na análise de jornais digitais e/ou outras fontes que divulgaram notícias sobre as inundações na Villa O'Higgins, disponíveis digitalmente, no período 2015-2022, compilando informações como dias de ocorrência de eventos e locais atingidos. O período utilizado refere-se à disponibilidade de informações localizadas em sítios eletrônicos. Foram usadas as seguintes palavras-chaves na ferramenta digital de busca Google: *inundación*, *Villa O'Higgins*, *crecida de río* e *Río Mosco*.

2.2 Aquisição, Preparação e Processamento de Dados Geoespaciais

O *software* utilizado para a preparação e o processamento de todos os dados geoespaciais foi o *ArcGIS 10.5.1 for Desktop*, da *Esri*, e suas ferramentas. O datum utilizado é o *World Geodetic System* (WGS 84) com sistema de projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM), fuso 18S.

2.3 Modelo Digital de Elevação (MDE)

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) do satélite *ALOS* (*Advanced Land Observing Satellite*), sensor *Palsar*, com 12,5 metros de resolução espacial, foram delimitadas as sub-bacias hidrográficas através do conjunto de ferramentas *Hydrology*, em "*Spatial Analyst Tools*" (ou Ferramentas de Análise Espacial), para a extração dos dados.

Em relação ao mapa de declividade, foi usada a ferramenta de análise espacial *Fill*, cuja finalidade consiste em corrigir as imperfeições do MDE, conforme citada anteriormente, e *Slope* (ou declividade), ferramenta inclusa em *3D Analyst*, correspondendo ao cálculo de inclinação do valor de cada pixel. Também foi obtido como produto do MDE um mapa hipsométrico, que mostrou a variação de elevação da área de estudo, com valores de elevação variando entre 262 e 2.211 m.

2.4 Imagens de satélite

As imagens de satélite *Sentinel 2B* e do *Landsat 5*, foram co-registradas no *software ArcGIS* a partir da imagem de satélite *PlanetScope*, com 3 metros de resolução espacial, e da hidrografia local. O erro da medida de área foi de aproximadamente $< 0.003\text{km}^2$, baseado no cálculo de *Li et al.* (2015), que considera a resolução espacial da imagem e o erro no co-registro.

2.5 Uso e Cobertura da Terra e Hidrografia

Foram utilizadas as imagens de satélite *Sentinel-2B* (composição RGB 432, de 21 de fevereiro de 2021) e *Planetscope* (composição RGB 432, de 25 de fevereiro de 2021) para o mapeamento e atualização do polígono do uso e cobertura da terra (Geoportal de Chile, 2011) para a sub-bacia hidrográfica e atualização das classes: campo/pastagem com vegetação difusa, geleira, lago, mata nativa densa, mata nativa semi densa, leito do rio, rocha exposta, Villa O'Higgins - área urbanizada e Villa O'Higgins - Rural, vetorizando os polígonos de forma manual. As datas escolhidas estão relacionadas ao período de menor cobertura de neve na região, possibilitando uma melhor visibilidade para mapeamento da geleira. Nesse mesmo sítio eletrônico foi adquirido o arquivo vetorial da hidrografia para a região da Villa O'Higgins. Foram considerados os conceitos da chave de interpretação para o processo de interpretação de imagens para atualização da classe uso e cobertura da terra (Lillesand; Kiefer; Chipman, 2015), como análise da forma (irregular ou regular), da textura (fina, finíssima, média, grossa, lisa) e tonalidade (variação e reflectância de cores).

2.6 Geologia e geomorfologia

A geologia foi obtida através do Mapa Geológico, versão digital fornecida pelo Serviço Nacional de Geología y Minería (2003). Foi necessário co-registrar o mapa para posteriormente vetorizar o arquivo de forma manual, criando polígonos da geologia local. As unidades geomorfológicas para o 3 táxon foram geradas a partir da integração dos dados e análise visual da morfologia e morfometria.

2.7 Variação da área glacial e dos lagos alimentados por geleiras

Imagens de satélite gratuitas disponíveis no portal de dados geoespaciais do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* - USGS), *Earth Explorer*, foram adquiridas para análise da variação da área glacial e dos lagos alimentados por geleiras em décadas passadas na mesma sub-bacia hidrográfica do Rio Mosco: *Landsat 5* (Composição RGB 321, datas de 27/01/1985, 23/01/1994 e 20/02/2011) e *Sentinel-2* (Composições RGB 432 e RGB 832, data de 21/02/21), conforme composições e datas informadas na tabela 1.

A superfície glacial tem as suas próprias características de reflectância, pois é composta por neve seca e úmida, *firn* (transição da neve para gelo) e gelo (Zamorano *et al.*, 2017). Na parte visível do espectro eletromagnético, a neve possui alta reflectância, variando de 80 a 97%

(Zeng *et al.*, 1984). O gelo tem sua reflectância relativamente baixa nesse mesmo comprimento de onda, refletindo entre 40 e 70% (Zeng *et al.*, 1984). O *firn* possui uma reflectância variando entre 25 e 30% menor que a neve recém caída (Zeng *et al.*, 1984). Com isso, é possível delimitar as diferentes partes, assim como classificar o tipo de superfície e as zonas de uma geleira (Zamorano *et al.*, 2017). As sub-bacias de drenagens glaciais foram embasadas pelos polígonos mapeados e disponibilizados no sítio eletrônico do GLIMS - *Global Land Ice Measurements from Space*. A área obtida no mapeamento da imagem de 2021 foi comparada com a área obtida em décadas anteriores a partir da imagem *Landsat* e dos dados do GLIMS.

2.8 Modelo de Processo Analítico Hierárquico (PAH)

O modelo de Processo Analítico Hierárquico (PAH) foi aplicado para produzir o mapa de áreas suscetíveis à inundação após decompor hierarquicamente os critérios e variáveis que são mais relevantes a uma finalidade e que possam influenciar no processo, nesse caso, de suscetibilidade à inundação. Esse modelo ameniza a complexidade do processo de tomada de decisão e de análise, principalmente se combinado com um SIG (Miranda *et al.*, 2019).

A metodologia PAH foi escolhida porque é um modelo que processa informações para levar a uma decisão através da construção de hierarquias, considerando critérios múltiplos decisivos (Costa, 2004). Esse método foi proposto por Saaty no início dos anos 70, sendo baseado em três princípios: construção de hierarquias, definição de prioridades e consistência lógica (Costa, 2004).

Após a definição do problema, foram coletados os materiais e organizados em um banco de dados para definir as variáveis de comparação. Nessa etapa, foi construído um quadro de ponderação de variáveis e subvariáveis (classes) com base em Saaty (1977).

A variável hipsometria foi considerada devido a relevância do fator elevação no controle de áreas de inundação, assim como exposto por Das (2019). A variável geologia foi considerada, pois pode-se encontrar uma forte correlação entre a permeabilidade da rocha e a taxa de infiltração e, consequentemente, rochas impermeáveis favorecem o escoamento superficial, o que pode desencadear inundações (Das, 2019).

As classes Q1 de geologia e planície fluvial são caracterizadas por possuir depósitos aluviais, coluviais e de movimentos de massa; em menor proporção flúvio-glaciais, costeiros, deltaicos ou indiferenciados (SERNAGEOMIN, 2003) e abrange a área ocupada pela Villa O'Higgins, pois está inserida em uma área próxima à planície de inundação. Adjacentes a essa classe foram encontrados os padrões de formas de relevo em tálus de colúvio-alúvio. A variável

declividade foi escolhida, pois quanto maior a inclinação de um terreno, maior é a aceleração do escoamento superficial relacionado à precipitação. Isso significa que, maior será a quantidade de água a ser recebida nas regiões a jusante (Çelik *et al.*, 2012).

As regiões situadas a menos de 100 metros de distância do curso d'água são altamente propensas a inundações; já aquelas acima de 2000 m com potencial de inundação muito baixo (Samanta *et al.*, 2016). Na nossa pesquisa, usando como referência o trabalho realizado por Fernández e Lutz (2010), criamos um buffer para identificar as distâncias das áreas selecionadas em relação ao shapefile da hidrografia local (duas sub-bacias hidrográficas), disponibilizada gratuitamente pelo Geoportal de Chile (1976), conforme a variação da largura do leito do rio. Com o resultado da Razão de Consistência, foi possível verificar a veracidade dos pesos estatísticos utilizados. Para isso, é necessário obter um valor igual ou inferior a 0,1, representando, no mínimo, 90% de veracidade no que se refere ao julgamento das variáveis (Miranda *et al.*, 2019). Conforme se verifica, os resultados obtidos estão dentro do valor mínimo aceitável em relação ao julgamento, ou seja, estão consistentes conforme Saaty (1991). Como etapa final, foi elaborado o mapa da distribuição espacial das áreas suscetíveis à inundação através da sobreposição de mapas e dos seus respectivos pesos comparados.

2.8.1 Matriz de comparação e normalização

Para Paula e Cerri (2012), é preciso decompor o problema do topo (objetivo geral) ao último nível (fatores específicos, como as classes ou subcritérios). A estrutura do método PAH contém objetivos, variáveis (parâmetros de avaliação) e classificação das alternativas. Assim, quanto mais variáveis temos, menos importante cada variável se torna, sendo compensada através de atribuição de pesos.

A escala de conversão dos critérios em pesos numéricos, conforme Saaty (1977), aumenta conforme o grau de importância. Essa conversão dá origem a um quadro de julgamentos. Os pesos atribuídos foram de 1 a 9, sendo 9 o maior grau de importância na suscetibilidade à inundação e 1 o menor. A matriz para comparação foi realizada par a par em relação ao grau de importância no quesito de suscetibilidade à inundação, conforme apresentado na tabela 2. O limite de 9 graus nessa escala se deve ao fato de que pesquisadores concluíram que o máximo de comparações simultâneas que um indivíduo pode fazer para que a classificação fique consistente é de 9 pontos (Fernández; Lutz, 2010).

Tabela 2 - Matriz de comparação pareada (A) de critérios

Variável	Hipsometria	Declividade	Geológico	Uso e cobertura da terra	Distância ao curso d'água
Hipsometria	1	2	4	5	1/2
Declividade	1/2	1	3	4	1/3
Geológico	1/4	1/3	1	3	1/4
Uso e cobertura da terra	1/5	1/4	1/3	1	1/5
Distância ao curso d'água	2	3	4	5	1
SOMA	3,95	6,58	12,33	18,00	2,28

Fonte: a autora (2023)

Nas matrizes pareadas, ou seja, comparadas de par a par, as diagonais sempre recebem o valor 1 (Paula; Cerri, 2012). Após o pareamento das matrizes, o próximo passo consistiu em criar uma matriz ponderada dos valores obtidos para compreensão dos pesos de cada variável ou classe. Para ponderar, é necessário dividir cada elemento pela soma de sua coluna, resultando nos pesos normalizados (W), como em Paula e Cerri (2012).

A próxima etapa requer a normalização da matriz de comparação dos critérios utilizados. Assim, obtivemos os pesos normalizados de cada variável (Tabela 3; vetor de prioridades (ω), como em Paula e Cerri (2012)). Para isso, calculamos a média dos valores de cada linha dessa mesma matriz. Como resultado, tem-se o elemento de maior importância.

Tabela 3 - Matriz ponderada de critérios

Variável	Hipsometria	Declividade	Geológico	Uso e cobertura da terra	Distância ao curso d'água	Pesos normalizados (w)
Hipsometria	0,25	0,30	0,32	0,28	0,22	0,2756
Declividade	0,13	0,15	0,24	0,22	0,15	0,1780
Geológico	0,06	0,05	0,08	0,17	0,11	0,0942
Uso e cobertura da terra	0,05	0,04	0,03	0,06	0,09	0,0518
Distância ao curso d'água	0,51	0,46	0,32	0,28	0,44	0,4004

Fonte: a autora (2023)

O próximo passo consistiu em calcular o Índice de Consistência (IC, fórmula 1) dos resultados através do autovalor máximo e do número de critérios (n) analisados na pesquisa, para então calcularmos a Razão de Consistência (RC, fórmula 3) e verificarmos a coerência do julgamento na comparação pareada (Paula; Cerri, 2012). O autovalor máximo ($\lambda_{\max}$, fórmula 2) é calculado através da soma da multiplicação dos elementos da linha da matriz pareada (A) pelo vetor de prioridades (w - pesos normalizados). O resultado obtido (Aw) foi dividido pelo vetor de prioridades (w) (Saaty, 1999 *apud* Paula; Cerri, 2012). Ainda de acordo com Saaty (1991), a Razão de Consistência (RC) (fórmula 3) é calculada através da razão entre o Índice de Consistência (IC) pelo Índice de Consistência randômico médio (IC_{rm}), sendo este pré-definido em função do número de critérios e classes. Os resultados dos autovalores máximos, dos índices

e razões de consistências estão apresentados na tabela 4.

$$\text{Equação 1: } IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad \text{Equação 2: } \lambda_{max} = \frac{A * \omega}{\omega} \quad \text{Equação 3: } RC = \frac{IC}{IC_{rm}}$$

Tabela 4 - Matriz ponderada de critérios

Variável	A ω	λ_{max}	IC	RC
Hipsometria	1,4675	5,3246	0,08	0,07
Declividade	0,9390	5,2756	0,07	0,06
Geológico	0,4778	5,0708	0,02	0,02
Uso e cobertura da terra	0,2629	5,0790	0,02	0,02
Distância ao curso d'água	2,1213	5,2977	0,07	0,07

Fonte: a autora (2023)

Com o resultado da Razão de Consistência, foi possível verificar a veracidade dos pesos estatísticos utilizados. Para isso, é necessário obter um valor igual ou inferior a 0,1, representando, no mínimo, 90% de veracidade no que se refere ao julgamento das variáveis (Miranda *et al.*, 2019). Conforme verificado, os resultados obtidos estão dentro do valor mínimo aceitável em relação ao julgamento, ou seja, estão consistentes conforme Saaty (1991).

2.9 Criação do Mapa de Suscetibilidade à Inundação

Para a produção do mapa de suscetibilidade à inundação, foram utilizados arquivos em formato *raster*, com resolução de 12,5 metros. Com o uso da ferramenta *Weighted Overlay* (Ferreira; Silva, 2020), no *software ArcGIS*, associando os critérios e classes utilizados com os seus respectivos pesos estabelecidos na etapa anterior, conforme a equação abaixo, foi possível obter o mapa de suscetibilidade à inundação:

$$S = (H * \omega H) + (D * \omega D) + (G * \omega G) + (U * \omega U) + (Dis * \omega Dis)$$

$$S = ((H * 0,2756) + (D * 0,1780) + (G * 0,0942) + (U * 0,0518) + (Dis * 0,4004)) / 5$$

Sendo:

S - Mapa de suscetibilidade à inundação; H - Hipsometria; D - Declividade; G - Geologia; U - Uso e cobertura da terra; Dis - Distância em relação ao curso d'água; ω - Peso do critério (obtido pelo PAH).

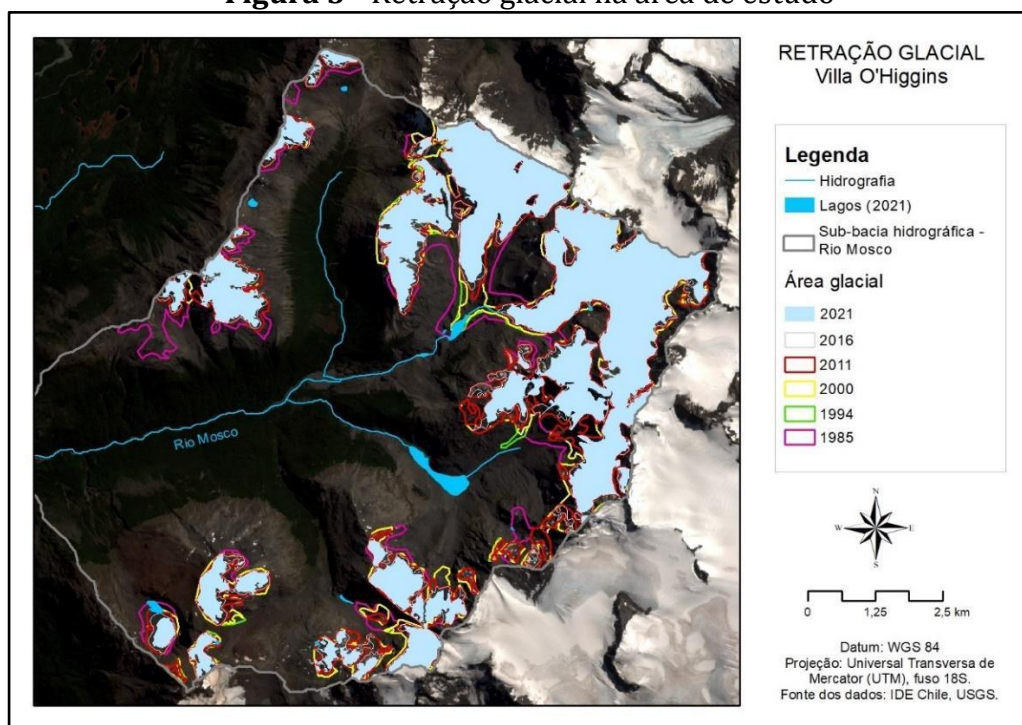
3. Desenvolvimento

3.1 Variações na cobertura glacial e lacustre nas últimas décadas

As geleiras da região da Villa O'Higgins vêm sofrendo com alterações na paisagem nas últimas décadas, apresentando recuo glacial de 11,69 km² (40,83%) de área entre 1985-2021 (Figuras 3 e 4). Nesse contexto, a cobertura glacial em 1985 era de 28,63 km², reduzindo para 16,94 km² em 2021.

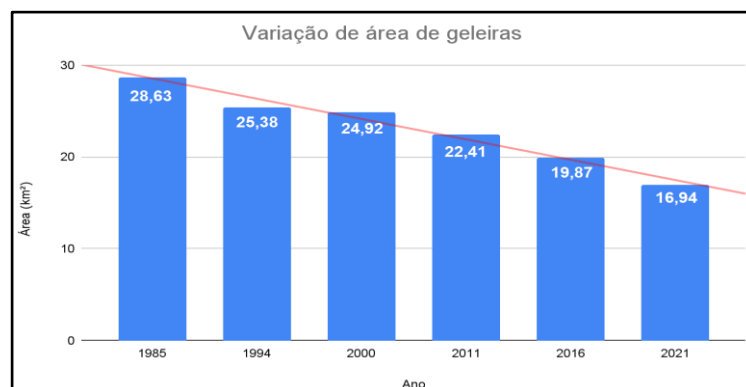
A cobertura lacustre teve um aumento de 422,22% de área entre 1985 e 2021, crescendo 0,38 km² entre 1985 e 2021. Em 1985, a área era de 0,09 km²; em 1994, 0,12 km²; em 2011, 0,28 km²; passando a 0,47 km² em 2021. Esta etapa metodológica está descrita no subitem 2.7.

Figura 3 - Retração glacial na área de estudo



Fonte: a autora (2023)

Figura 4 - Variação da cobertura glacial na sub-bacia do rio Mosco



Fonte: a autora (2023)

3.2 As inundações rápidas reportadas por notícias em meios eletrônicos

Eventos de inundação ocorreram entre os anos de 2015 e 2020. O ano de 2018 teve maior visibilidade nas mídias locais, somando um total de oito notícias encontradas. Como exemplo, no ano de 2016 (Municipalidad de O'higgins, 2016), um campesino local relata que por ter sua moradia próxima ao curso d'água, sofre com constantes inundações em seu terreno há mais de 12 anos. Como consequência, sua plantação de alimentos foi bastante afetada.

Em 2018, a direção regional da ONEMI (*Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública*) publicou em seu sítio eletrônico uma advertência informando o monitoramento em relação ao transbordamento do rio Mosco e a retirada de dois habitantes de suas residências devido à cota de inundação ter atingido esses locais. As autoridades locais auxiliaram a população atingida pela inundação através de evacuação de campesinos afetados, resgate de pessoas isoladas, criação de contenções e canalizações para que o rio não atingisse as residências. Os relatos contêm informações que remetem ao degelo glacial na região, além da precipitação que influenciou no transbordamento do rio Mosco.

Figura 5 - Reportagem abordando sobre inundações na Villa O'Higgins



Fonte: Verdejo (2018, 2020)

A notícia relatada pelo jornal Cooperativa (Aysén, 2018), traz informações referente a um deslizamento de solo na margem do rio e a alteração no curso d'água em 2018, atingindo o setor conhecido como "Fazendas do Rio Mosco". Quatro famílias foram retiradas de suas residências, que foram afetadas pela água e sedimentos, em direção a abrigos. Houve o rompimento de uma ponte com o volume d'água, além de uma residência que também foi atingida. Nos dias 24 de dezembro de 2019 e 3 e 4 de janeiro de 2020, os jornais Cooperativa (Figura 5; Verdejo, 2018; 2020) e Radio Las Nieves (Villa, 2020) informaram que ocorreram novos transbordamentos no Rio Mosco nesse setor, afetando residências na comunidade

campesina de Villa O'Higgins próximas ao curso d'água (a cota não foi identificada pela reportagem). As inundações, que ocorreram de forma subsequente em um curto período, acarretaram muitos prejuízos para algumas famílias campesinas.

Foram encontradas reportagens para todo o período 2015-2020 relatando que o rio inundou áreas com ocupação rural e de forma rápida. De acordo com as reportagens encontradas ao longo desses anos, essas populações campesinas tiveram suas plantações e casas afetadas pela invasão da água e sedimentos fluviais. Os eventos reportados mostram que os moradores da margem sul ficaram isolados durante as maiores inundações e que houve a ajuda Exército e de funcionários da CONAF (Corporação Florestal Nacional do Chile) para a remoção das pessoas.

3.3 Análise da suscetibilidade à inundação

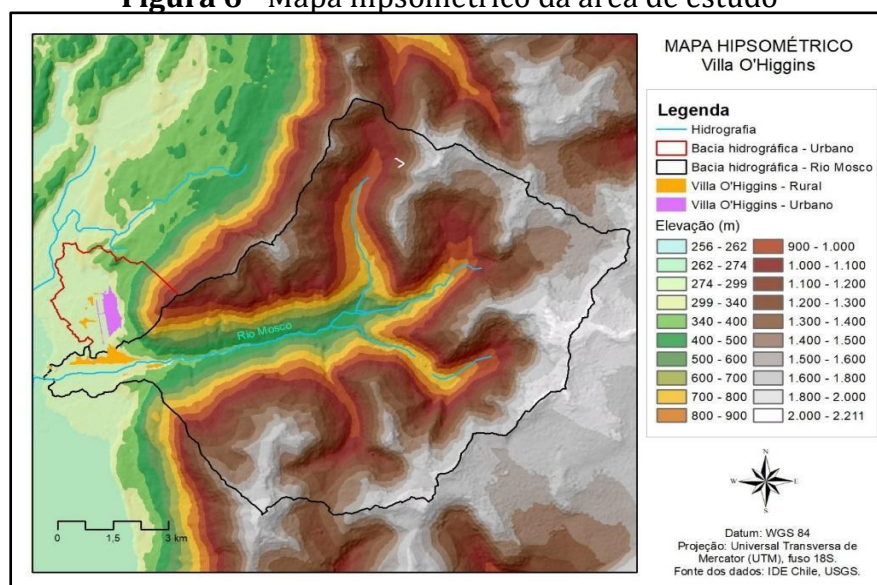
As áreas das sub-bacias hidrográficas da Villa O'Higgins apresentam setores de baixa declividade (planície de inundação) à alta declividade. A classe entre 0º e 5º, onde está localizada a maior parte da comunidade; já a classe entre 5-15º possui algumas residências em um relevo ondulado, situado a montante e no início da planície de inundação; entre 15-25º e 25-35º situam-se os relevos moderadamente ondulado e forte ondulado, respectivamente; os relevos entre 35-45º, montanhoso, e acima de 45º, escarpado, estão situados em regiões de maiores altitudes ou em áreas acentuadamente inclinadas, como é o caso próximo à área urbanizada.

As formas de relevo podem ser interpretadas como: padrão planície aluvial/depósito de colúvio-alúvio no contexto de Q1 e padrão em relevo de montanha no contexto de DC4. O padrão Q1, planície aluvial e depósito de colúvio-alúvio é caracterizado pela presença de depósitos aluviais, coluviais e de movimentos de massa (SERNAGEOMIN, 2003). O contexto da área é na Sierra de Sangra, um estratovulcão coberto por geleiras e neve, situado na Cordilheira dos Andes, marcado pela alta elevação, áreas montanhosas e de encostas íngremes.

Os resultados da atualização dos dados de uso e cobertura da terra nas duas sub-bacias hidrográficas para o ano de 2021 é caracterizado pelas seguintes classes (Figura 6): a 2,45% de campo/pastagem úmido com vegetação difusa; 17,82% de geleiras; 0,46% de lagos; 26,32% de mata nativa; 1,04% de leito do rio; 50,92% de rocha exposta; 0,53% de área rural e 0,46% de área urbana (Tabela 5). A maior parte da classe mata nativa localiza-se em áreas de maior elevação. A variável área urbanizada se localiza mais afastada em relação ao curso do rio Mosco se comparada à área rural, sendo esta de grande importância na suscetibilidade à inundação se

comparada à planície de inundação. A variável campo/pastagem úmido com vegetação difusa está mais suscetível à inundação que áreas somente de mata (nativa), pois a sua vegetação de pequeno porte influencia no nível de absorção e retenção de água no solo. Geleiras de montanha são menos suscetíveis à inundação, pois se encontram a montante de rios e lagos proglaciais, sendo este último proveniente do degelo glacial e, portanto, suscetíveis ao transbordamento e inundação. A variável leito do Rio Mosco recebe grandes quantidades de água quando o curso d'água transborda, portanto, com grande suscetibilidade à inundação. Por último, temos a rocha exposta que está menos suscetível à inundação devido a sua baixa capacidade de infiltração e por estar situada em regiões de elevada altitude.

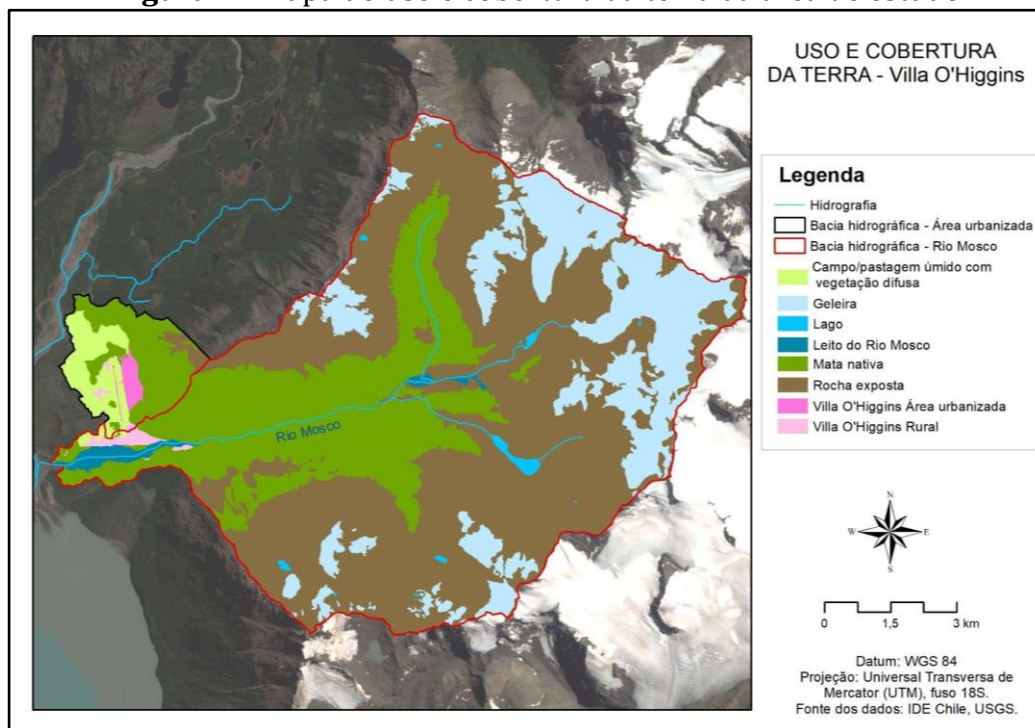
Figura 6 - Mapa hipsométrico da área de estudo



Fonte: a autora (2023)

A sub-bacia do Rio Mosco (Figura 7) possui grandes áreas de mata nativa, rocha exposta e geleiras, além da presença de alguns lagos proglaciais e de áreas inundáveis do Rio Mosco a montante do povoado. A área ocupada pela comunidade, principalmente com as habitações rurais, está muito próxima ao canal principal do Rio Mosco. Os setores de menor elevação estão diretamente conectados ao uso antrópico do solo, enquanto os setores de maior elevação estão mais preservados do uso direto da terra, contendo uma ampla área de mata nativa e rocha exposta.

Figura 7 - Mapa do uso e cobertura da terra da área de estudo



Fonte: a autora (2023)

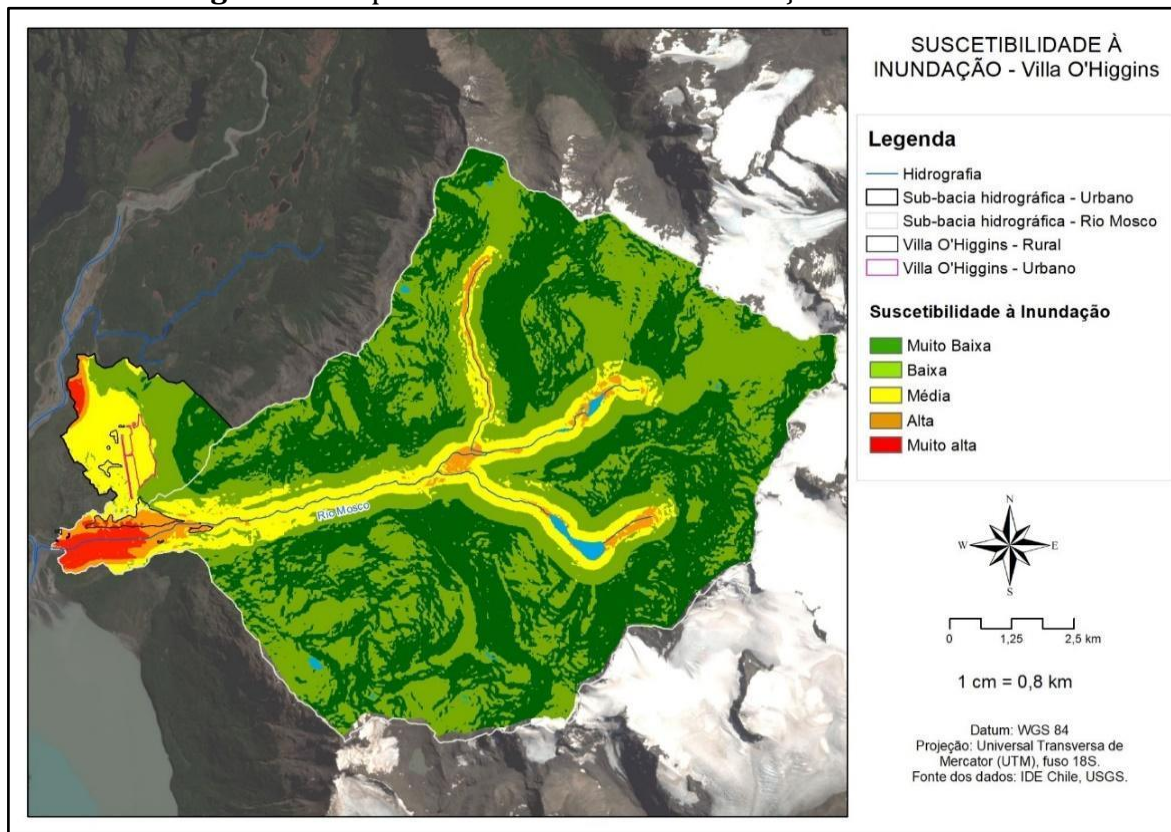
Tabela 5 - Áreas das classes do uso e cobertura da terra em 2021

Uso e Cobertura da Terra	Área Total (M ²)	Área Total (%)
Campo/pastagem e vegetação semidensa	2.498.899	2,45
Geleira	18.174.904	17,82
Lago	470.483	0,46
Leito do rio	1.061.004	1,04
Mata nativa	26.835.734	26,32
Rocha exposta	51.924.293	50,92
Villa O'Higgins Rural	539.995	0,53
Villa O'Higgins Área urbanizada	468.360	0,46
TOTAL	101.973.672 m²	100%

Fonte: a autora (2023)

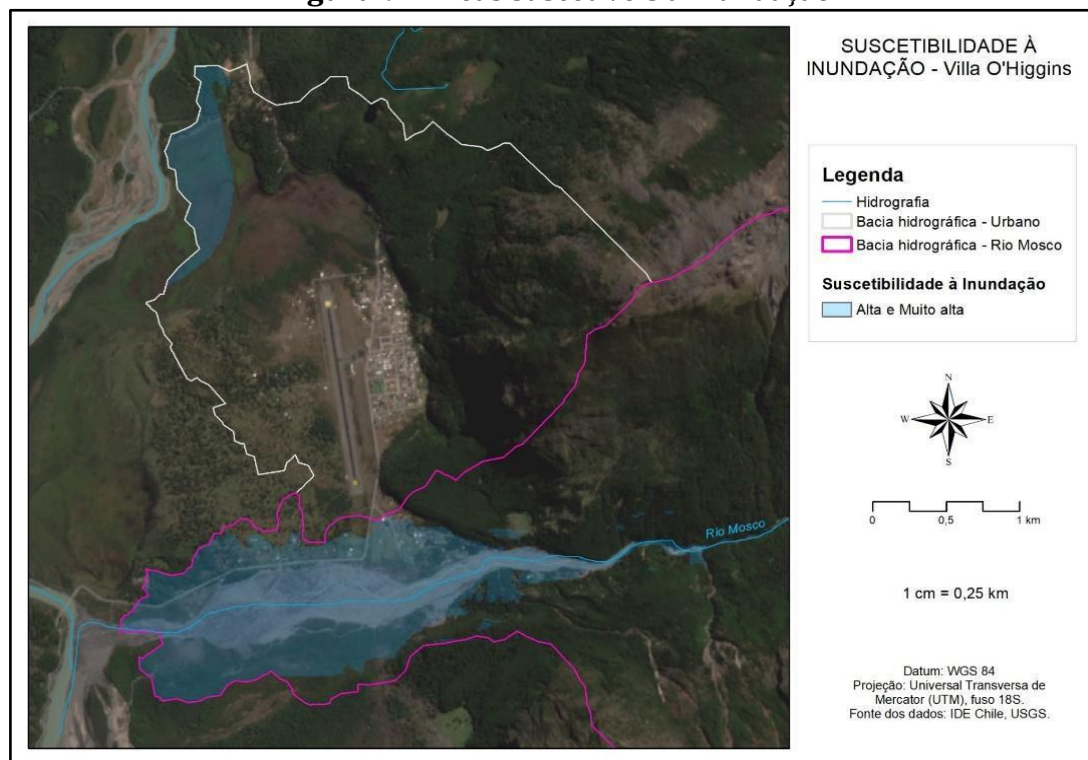
A partir da criação do mapa de suscetibilidade à inundação (subitens 2.8 a 2.9 da metodologia), os resultados evidenciam que 4,11% (4,16 km²) de área das sub-bacias estão em área de alta a muito alta suscetibilidade à inundação, localizando-se o curso inferior das sub-bacias, que correspondem a planície fluvial, à classe de baixa declividade e de menor elevação nas sub-bacias. A classe de média suscetibilidade (11,15 km²) está relacionada à classe Villa O'Higgins (urbano) e aos setores a montante da sub-bacia. Já as áreas das classes muito baixas (42,38 km²) e baixa suscetibilidade (43,22 km²) à inundação encontram-se, predominantemente, nas áreas a montante das sub-bacias onde as elevações e declividades são mais acentuadas. Também estão relacionadas à classe padrão em relevo de montanha e às classes de uso e cobertura, mata nativa, geleiras e rocha exposta (Tabela 6, Figuras 8 e 9).

Figura 8 - Mapa da suscetibilidade à inundação na sub-bacia



Fonte: a autora (2023)

Figura 9 - Áreas suscetíveis à inundação



Fonte: a autora (2023)

Tabela 6 - Estimativa da área de suscetibilidade à inundação

PESO	CLASSE	ESTIMATIVA DA ÁREA (KM ²)	ESTIMATIVA DA ÁREA (%)
1	Muito Baixa	42,38	42
2	Baixa	43,22	42,83
3	Média	11,15	11,05
4	Alta	2,91	2,88
5	Muito Alta	1,25	1,23
Total área		100,89	100

Fonte: a autora (2023)

4. Discussões

As inundações que ocorreram na comunidade são consequência direta do aumento de chuvas intensas na região, do degelo glacial e da neve na sub-bacia hidrográfica do rio Mosco, conforme afirma o *Servicio de Geología y Minería chilena* (2018). Em relação às chuvas intensas, podemos associar as datas dos eventos de inundação no povoado aos fenômenos climáticos atuantes nesse período. Para os eventos que ocorreram entre 2016 e 2020, o *El Niño* estava atuando no primeiro ano, passando para um período de neutralidade climática até 2020. Os impactos também podem estar relacionados ao aumento do número e área de lagos devido ao maior suprimento de água das geleiras ao longo dos anos, mas também ao desaparecimento de lagos com o aumento da distância dos lagos às geleiras.

Além de impactos na alteração da paisagem, no aporte hídrico e no ecossistema local, há aqueles que estão relacionados ao ambiente social. Conforme evidenciado por Figueiredo (2017), a retração glacial e o aumento de lagos glaciais torna o quadro preocupante em relação aos desastres glaciais, ultrapassando valores econômicos, pois além das perdas materiais, também implica em perdas imateriais, como a desterritorialização abrupta de um povo e de toda a sua cultura, portanto, perdas de relações pessoais e espaciais.

Para Ding *et al.* (2021), o ciclo de derretimento de neve e gelo pode ser associado às inundações nesses ambientes quando há rompimento de represas de lagos, ocorrendo principalmente na primavera e no verão. Além disso, dias do ano com anomalias de temperatura máxima podem levar ao rápido derretimento sazonal das geleiras e neve, aumentar o suprimento de água para canais fluviais e lagos, causando inundações repentinas associadas a inundações decorrentes do rompimento de lagos glaciais (GLOFs - *Glacial Lake Outburst Floods*).

Entre 1985 e 2021, as geleiras da área de estudo perderam 40,83% da área total. Uma grande quantidade de geleiras andinas, chilenas e argentinas, apresentaram retrocesso durante o século XX, assim como é possível verificar em outros estudos recentes, como em Cuzzone,

Romero e Marcott (2024), Dussailant *et al.* (2019), Fürst *et al.* (2024), Hugonnet *et al.* (2021), Minowa, Schaefer e Svarca (2023), Lannutti (2024) e Lo Vecchio *et al.* (2025) e da década anterior (Font, 2016). Segundo Aedo e Montecinos (2018), o Chile é um país montanhoso, onde 70% de sua população se abastece de água proveniente das zonas alto-andinas. Quando as populações de montanha são afetadas pela emergência climática, essas zonas desencadeiam graves consequências aos seus diversos usos da água.

Na área de estudo, a superfície total da cobertura lacustre aumentou em 422,22%% entre 1985 e 2021. A variação da área de um lago depende do equilíbrio da entrada e saída de água nessa bacia hidrográfica, que dependerá da temperatura local, da precipitação e do aumento ou diminuição da evaporação (Wang *et al.*, 2013). Isso significa que um maior aporte de água está sendo introduzido nesses ambientes, tanto por derretimento glacial, quanto por precipitações, ainda que as precipitações estejam sujeitas a variabilidade interanual. Segundo Wilson *et al.* (2018), os lagos glaciais do norte e sul da patagônia sofreram maiores mudanças absolutas de área. Para os pesquisadores, a partir de 1986, estas regiões viram o surgimento de um número muito maior de novos lagos. Em Emmer *et al.* (2016), é relatado que as geleiras estão se separando cada vez mais de seus lagos proglaciais, elevando as suas frentes. Na área de estudo desta pesquisa, não foram localizados lagos em contato direto com as geleiras. Essa informação está em concordância com Emmer *et al.* (2016), em que a partir de 2016, 84% dos lagos glaciais no norte da Patagônia não estavam em contato com o gelo. Na Patagônia norte, os lagos glaciais atingiram uma pequena estabilidade, enquanto na região sul a tendência é de crescimento e surgimento de novos lagos devido à grande extensão de muitas geleiras.

O padrão de uso e cobertura da terra pode influenciar fortemente na frequência de inundação de um local (García-Ruiz *et al.*, 2008). Se uma região sofre com constantes mudanças na forma como é ocupada, essa alteração pode acelerar a probabilidade de inundação de uma localidade (Beckers *et al.*, 2013). Na área de estudo, no setor oeste da sub-bacia hidrográfica do Rio Mosco, é forte a presença de áreas com mata nativa e essa vegetação pode influenciar na capacidade do solo em absorver água. As áreas de média, alta e muito alta suscetibilidade à inundação espacializadas na Villa O'Higgins indicam os locais em que a população está potencialmente vulnerável ao evento de inundação.

Assim, as inundações são um perigo para essa região dos Andes. E esses eventos encontram-se entre os perigos mais frequentes que afetam um grande número de pessoas em regiões de montanha, sendo que a frequência de desastres naturais mostra tendência crescente nos Andes (IPCC, 2022). Diversas investigações têm evidenciado inundações bruscas em

ambiente de montanha influenciadas pelo derretimento glacial (Thompson *et al.*, 2020). Essa pesquisa propôs tratar sobre o tema da suscetibilidade ao risco de inundação com o intuito de contribuir com as pesquisas sobre a emergência climática e os seus impactos em regiões de montanha, principalmente tentando perceber como as comunidades andinas situadas próximas e influenciadas por geleiras são afetadas. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2022), as mudanças climáticas são um dos fenômenos mais importantes da mudança global, e o seu diagnóstico pode ser permitido através do monitoramento de geleiras, neve e gelo. Na sub-bacia hidrográfica do Rio Mosco, as alterações ambientais afetam a população, sendo documentadas em reportagens de jornais e mídias digitais locais. Conforme afirma o IPCC (2019), em regiões de geleiras de montanha os impactos podem ser variados, podendo afetar até o meio de subsistência dessa sociedade, como a agricultura e o turismo. E esses impactos nesses ecossistemas estão se aproximando da irreversibilidade (IPCC, 2023).

De forma geral, os jornais abordaram sobre o impacto da emergência climática no local da Villa O'Higgins. Com certa frequência, os discursos locais produzidos pela população às mídias mostram as situações vividas em relação às alterações que estão ocorrendo na sub-bacia, como a crise climática e o aumento do degelo das geleiras Mosco e Huemula. Além disso, as consequências diretas das inundações causaram, em diferentes anos, isolamento de moradores devido ao transbordamento do rio, perda de plantação de alimentos e danificação em moradias.

O rio Mosco apresenta um regime de águas pluvio-nival, abastecido pelo derretimento da neve e de três geleiras que estão localizadas a montante da sub-bacia hidrográfica. Entre 2015 e 2020, tem-se documentado que o rio tem aumentado o seu volume de água de forma rápida e atingido a população campesina (margem sul). Essas propriedades rurais têm suas plantações e casas afetadas pela invasão da água e detritos, colocando-a em uma situação de vulnerabilidade ambiental. O ano de 2018 teve maior visibilidade nas mídias locais, somando um total de 8 notícias encontradas.

Embora esse evento tenha ocorrido com consequências significativas para os habitantes que vivem nas margens deste rio, dadas as condições da crise climática, o evento pode ocorrer novamente e atingir outras áreas e sub-bacias com características semelhantes. Esses eventos podem afetar centros populacionais, residências, infraestrutura pública isolada ou estratégica, como rede viária, rede elétrica, entre outras (Plano de Desenvolvimento da Região de Aysén, 2020).

Com a tendência ao aumento da temperatura média superficial do ar na região, esses fenômenos de inundação podem se tornar mais frequentes e mais intensos em períodos de El Niño. Com isso, o mapa de suscetibilidade à inundação pode ser uma ferramenta importante para a gestão do território e prevenção de desastres ambientais, pois espacializa as áreas que estão mais suscetíveis a esse evento, além de mapear as populações que serão atingidas diretamente por essa inundação (Khadka *et al.*, 2021).

O método PAH se mostrou uma ferramenta importante para a construção do mapa de áreas suscetíveis à inundação, decompondo hierarquicamente os critérios conforme a sua relevância e influência no processo de inundação. Esse método se mostra bastante apropriado para análises em escala regional (Msabi; Makonyo, 2021), como observamos em Bertoldi *et al.* (2024), Das *et al.* (2024), Paula e Cerri (2012) e Upadhyaya e Rai (2025).

5. Considerações Finais

Foram evidenciadas mudanças na cobertura glacial e lacustre desde 1985 no contexto da sub-bacia do rio Mosco, setor oeste da Sierra de Sangra. Entre 1985 e 2021, a área das geleiras da sub-bacia do rio Mosco recuou em 40,83% e a cobertura lacustre aumentou em 422,22%, indicando que as mudanças climáticas regionais têm influenciado no transbordamento desse rio. Se a tendência observada nas últimas décadas para as geleiras e a resposta de aumento dos lagos continuar, a paisagem da área de estudo terá diversas alterações nas próximas décadas.

A metodologia integrada utilizando geotecnologias e suas ferramentas, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto, assim como os dados de reportagens de jornais sobre a Villa O'Higgins e o método do Processo Analítico Hierárquico, proporcionou resultados satisfatórios, visto que espacializou as áreas mais suscetíveis aos eventos de inundação. As inundações que ocorreram na comunidade são consequência direta do aumento de chuvas intensas na região, do degelo glacial e da neve na sub-bacia hidrográfica desse rio. As sub-bacias possuem áreas com características físico-naturais que levam a eventos de inundação na planície de inundação. Os setores de alta suscetibilidade e muito alta suscetibilidade à inundação localizam-se na planície fluvial, englobando principalmente a classe área rural da Villa O'Higgins. Esses trechos do rio são influenciados pelo grande volume d'água e sedimentos dos afluentes do rio Mosco, escoando as águas que se deslocam a partir de uma maior declividade. A classe de uso e ocupação urbana está localizada em uma área de média suscetibilidade à inundação. A área urbanizada da Villa O'Higgins, consequentemente

com maior número de casas, se encontra mais afastada do rio principal (Mosco). Entretanto, na área rural, é possível encontrar moradias bastante próximas ao rio, como na distância aproximada de 20 metros.

Sobre as limitações do estudo gerado, alguns dados disponíveis gratuitamente não dispunham de uma resolução adequada para trabalhos com uma maior escala, como é o caso do mapa de geologia da região (1:1:000.000). Portanto, o nível de detalhamento e precisão para a comunidade é baixo, podendo acarretar num deslocamento de pixels da feição em relação à sua posição verdadeira. Ademais, em relação a todos os outros resultados obtidos, é necessário fazer a validação em campo para verificar a exatidão dos dados utilizados e, assim, adequá-los à realidade e fornecer melhores bases para tomadas de decisão. O levantamento de dados existentes sobre os pontos de inundação anteriores foi relevante no estudo. A geração e aplicação de informações geoespaciais como o tipo de solo, densidade da drenagem e geomorfologia também podem ajudar a aprimorar os limiares de cada classe em relação ao mapeamento gerado. Após algumas adequações nos pesos para que permanecessem coerentes no cálculo da RC (Razão de Consistência), esta metodologia se mostrou adequada para auxiliar na decomposição de prioridades em relação a uma questão principal da pesquisa e a geração de dados dentro de um SIG, fornecendo resultados de confiança. Ademais, a mensuração da cobertura glacial e lacustre na sub-bacia do Rio Mosco para o ano de 2021 possui menores incertezas do que as anteriores devido a maior resolução espacial e ao melhor RMSE (desvio padrão residual) de co-registro. Diante disso, é relevante a realização do detalhamento temporal para compreender melhor as mudanças observadas ao longo dos mapeamentos dessas áreas.

6. Referências

AEDO, M. P.; MONTECINOS, T. **Glaciares**: Reservas Estratégicas de Agua Dulce Para La Sociedad Y Los Ecosistemas en Chile. Glaciares andinos, recursos hídricos y cambio climático: desafíos para la justicia climática en el Cono Sur. Universidad de Santiago. 2018.

ANACONA, P.I.; NORTON, K. P.; MACKINTOSH, A. Moraine-dammed lake failures in Patagonia and assessment of outburst susceptibility in the Baker Basin. **Nature Hazards Earth System Science Discussion**, v. 2, p. 4765–4812. 2014.

ARCLIM. **Atlas de Riesgos Climáticos para Chile**. Ministério del Medio Ambiente del Gobierno de Chile. 2020.

AYSÉN: Evacúan a anciano de 84 años por crecida tras deshielo de glaciar. **Cooperativa**, 20 de Abril de 2018. Disponível em: <<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/desastres-naturales/inundaciones/aysen-evacuan-a-anciano-de-84-anos-por-crecida-tras-deshielo-de-glaciar/2018-04-20/182939.html>>. Acesso em: 04 de setembro de 2020.

BAT'KA, J.; VILÍMEK, V.; ŠTEFANOVÁ, E.; COOK, S.J.; EMMER, A. Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) in the Cordillera Huayhuash, Peru: Historic Events and Current Susceptibility. **Water**, v. 12, p. 2664. 2020.

BECKERS, A.; DEWALS, B.; ERPICUM, S.; DUJARDIN, S.; DETREMBLEUR, S.; TELLER, J. Contribution of land use changes to future flood damage along the river Meuse in the Walloon region. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** 13, p. 2301–2318. 2013.

BERTOLDI, S.; ROSA, K.K.; RIBEIRO, R. R.; PETSCH, K. Susceptibility to Glacial Lake Outburst Flood in the Chajolpaya subbasin, northern Cordillera Real, Bolivia. **Rev. Geociênc. Nordeste**, Caicó, v.11, n.1, p. 28-41. 2024.

CARRIÓN, P. S. **Tendencias Climáticas y sus Efectos en el Golfo de Ancud por Medio de las Series de Precipitación y Temperatura más Largas**. Memoria para optar a título profesional de Geógrafa, Universidad de Chile. 2017.

CARRIVICK, J. L.; TWEED, F. S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34-52. 2013.

ÇELİK, H.E.; COSKUN, G.; CIGIZOĞLU, H.K.; AĞIRALIOĞLU, N.; AYDIN, A.; ESIN, A.İ. The analysis of 2004 flood on Kozdere stream in Istanbul. **Nature Hazards**, v. 63, p. 461-477. 2012.

CUZZONE, J.; ROMERO, M.; MARCOTT, S. Modeling the timing of Patagonian Ice Sheet retreat in the Chilean Lake District from 22–10 ka. **The Cryosphere**, v. 18, p. 1381–1398. 2024.

DAS, S. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. Remote Sensing Applications: **Society and Environment**, v. 14, p 60–74. 2019.

DAS, A.; SINGH, S.K.; KANGA, S.; SAJAN, B.; MERAJ, G.; KUMAR, P. Glacial Lake Outburst Flood Susceptibility Mapping in Sikkim: A Comparison of AHP and Fuzzy AHP Models. **Climate**, v.12, 19 p., 173. 2024.

DING, Y.; MU, C.; Wu, T.; Hu, G.; Zou, D.; Wang, D.; LI, W.; WU, X. Increasing cryospheric hazards in a warming climate. **Earth-Science Reviews**, vol. 213. 2021.

DPDR. DIVISIÓN DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO REGIONAL. **Plan de Desarrollo Territorio Provincia de Los Glaciares**. Política Nacional Para Zonas Rezagadas en Materia Social. Gobierno Regional de Aysén, 257 p. 2020.

DUSSAILLANT, I.; BERTHIER, E.; BRUN, F.; MASIOKAS, M.; HUGONNET, R.; FAVIER, V.; RABATEL, A.; PITTE, P.; RUIZ, L. Two decades of glacier mass loss along the Andes. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 10, p. 802-808. 2019.

EMMER, A.; KLIMES, J.; MERGILI, M.; VILIMEK, V.; COCHACHIN, A. 882 lakes of the Cordillera Blanca: an inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. **Catena**, 147, 269–279. 2016.

FERNÁNDEZ, D.S.; LUTZ, M.M. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, v. 111, p. 90–98. 2010.

FIGUEIREDO, A.R. **A Sociocriosfera nos Andes Centrais**: Percepções, Adaptações e Impactos dos Desastres Glaciais no Callejón de Huaylas, Peru. Dissertação de Mestrado, UFRGS, p. 128, Porto Alegre. 2017.

FONT, E. V. **Glaciares de Chile**. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2016.

FÜRST, J.J.; FARÍAS-BARAHONA, D.; BLINDOW, N.; *et al.* The foundations of the Patagonian icefields. **Commun Earth Environ** 5, v. 142. 2024.

GARCÍA-RUIZ, J.M.; REGÜÉS, D.; ALVERA, B.; LANA-RENAULT, N.; SERRANO-MUELA, P.; NADALROMERO, E. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. **J. Hydrol.** 356, p. 245–260. 2008.

GEOPORTAL DE CHILE. **Catastros de Uso de Suelo y Vegetación**. Catálogo Nacional de Información Geoespacial, Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile. 2011. Disponível em: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/35194/Catastros%20de%20Uso%20de%20Suelo%20y%20Vegetaci%C3%B3n>. Acesso em: 15 de agosto de 2021.

GEOPORTAL DE CHILE. **Hidrografía de la Región de Aysén**. Catálogo Nacional de Información Geoespacial, Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile. 1976. Disponível em: <https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/30519/Hidrograf%C3%ADa%20de%20la%20Regi%C3%B3n%20de%20Ays%C3%A9n>. Acesso em: jan. de 2022.

HUGONNET, R.; MCNABB, R.; BERTHIER, E.; MENOUNOS, B.; NUTH, C.; GIROD, L.; FARINOTTI, D.; HUSS, M.; DUSSAILLANT, I.; BRUN, F.; KÄÄB, A. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. **Nature** 592 (7856), p. 726–731. 2021.

ICIMOD. **International Centre for Integrated Mountain Development**. Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods in Nepal, Nepal. 2011.

MINOWA M.; SCHAEFER, M.; SVARCA, P. Effects of topography on dynamics and mass loss of lake-terminating glaciers in southern Patagonia. **Journal of Glaciology**, v. 69, 278, p.1580–1597. 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge. 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021**: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge. 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2022**: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 3056. 2022.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. 2023. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva: IPCC, 182 p.

KHADKA, N.; CHEN, X.; NIE, Y.; THAKURI, S.; ZHENG, G.; ZHANG, G. Evaluation of Glacial Lake Outburst Flood susceptibility using multi-criteria assessment framework in Mahalangur Himalaya. **Frontiers in Earth Science**, v. 8, p. 601288. 2021.

LANNUTTI, E. **Ice flow line maps of three large freshwater calving glaciers in the Southern Patagonian Icefield**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-2/W6-2024 Workshop "Geomatics in Environmental Monitoring – GEM24", Mendoza, Argentina (online event). Outubro de 2024.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, ed. 7. 2015.

LO VECCHIO, A.; VILLALBA, R.; FALASCHI, D.; RUIZ, L.; VACAFLOR, P.; VARGAS, S. Glacier fragmentation on the Southern Patagonian Icefield: a comprehensive analysis of the Upsala Glacier. **Journal of Glaciology** 71, v. 16, p. 1–12. 2025.

MIRANDA, N.M.G. **Análise Espacial da Suscetibilidade à Inundação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Lipa, Cuibá - MT**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MSABI, M.M.; MAKONYO, M. Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 21. 2021.

MUNICIPALIDAD DE O'HIGGINS. **Municipio de Villa O'Higgins realiza gestiones para encauzar caudal del río Mosco**. 2016. Disponível em: <<http://www.municipalidadohiggins.cl/web/2016/02/10/municipio-de-villa-ohiggins-realiza-gestiones-para-encauzar-caudal-del-rio-mosco/>>. Acesso: 08 de setembro de 2022.

ONEMI - Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública. **Aumento de caudal del Río Mosco, comuna de O'Higgins, Región de Aysén**. 2018. Disponível em: <<https://www.onemi.gov.cl/informate/aumento-de-caudal-del-rio-mosco/>>. Acesso: 08 de setembro de 2022.

PAULA, B.L.; CERRI, L.E.S. Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) para Priorização de Obras de Intervenção em Áreas e Setores de Risco Geológico nos Municípios de Itapeverica da Serraz e Suzano (SP). **Geociências**, v. 31, n. 2, p. 247-257. 2012.

PROGRAMA GESTIÓN TERRITORIAL, ZONAS REZAGADAS. **Plan de Desarrollo Territorio Provincia de los Glaciares**. Política Nacional para Zonas Rezagadas en Materia Social. División de Planificación y Desarrollo Regional, Gobierno Regional de Aysén. 2020.

SAATY, T.L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Publisher, 367 p. 1991.

SAMANTA, S.; KOLOA, C.; KUMAR PAL, D.; PALSAMANTA, B. Flood Risk Analysis in Lower Part of Markham River Based on Multi-criteria Decision Approach (MCDA). **Hydrology**, p. 29. 2016.

SERNAGEOMIN - SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. **Remoción en masa en Río Mosco e Inundación en Villa O'Higgins, Provincia de Capitán Prat, Región de Aysén.** Oficina Técnica Puerto Varas. 2018.

SERNAGEOMIN - SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. **Mapa Geológico de Chile:** versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería. Publicación Geológica Digital, n. 4, Santiago. 2003. Disponível em: <<https://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2022.

SHUGAR, D. H.; BURR, A.; HARITASHYA, U. K.; KARGEL, J. S.; WATSON, C. S.; KENNEDY, M. C.; BEVINGTON, A. R.; BETTS, R. A.; HARRISON, S.; STRATTMAN, K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. **Nature Climate Change**, vol. 10, p. 939–945. 2020.

THOMPSON, I.; SHRESTHA, M.; CHHETRI, N.; AGUSDINATA, D.B. An institutional analysis of glacial floods and disaster risk management in the Nepal Himalaya. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 47. 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Earth Explorer.** U.S. Department of the Interior. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 2022.

UPADHYAYA, A.; RAI, A. Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Susceptibility in the Northwest Himalayas using AHP-TOPSIS and AHP-COPRAS. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, p. 11126-11144. 2025.

VERDEJO, J.P. **Vecinos de Villa O'Higgins fueron rescatados tras inundaciones por crecida del río Mosco.** Cooperativa, 24 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-aysen/vecinos-de-villa-o-higgins-fueron-rescatados-tras-inundaciones-por/2019-12-24/144837.html>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.

VERDEJO, J.P. **Pobladores de río Mosco en Villa O'Higgins exigen apoyo tras crecida.** Cooperativa, 03 de fevereiro de 2020. Disponível em: <<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-aysen/pobladores-de-rio-mosco-en-villa-o-higgins-exigen-apoyo-tras-crecida/2020-01-03/153704.html>>. Acesso em: 09 de setembro de 2020.

VILLA O'Higgins: **Nueva crecida del Río Mosco generó destrucción total de viviendas.** RLN - Radio Las Nieves, Puerto Aysén, 05 de janeiro de 2020. Disponível em: <<https://www.rln.cl/destacado/67358-villa-ohiggins-nueva-crecida-del-rio-mosco-genero-destruccion-total-de-viviendas>>. Acesso em: 09 de setembro de 2022.

WANG, X.; DING, Y.; LIU, S.; JIANG, L.; WU, K.; JIANG, Z.; GUO, W. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010. **Environmental Research Letters**, v. 8. 2013.

WILSON, R.; GLASSER, N. F.; REYNOLDS, J. M.; HARRISON, S.; ANACONA, P. I.; SCHAEFER, M.; SHANNON, S. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. **Global and Planetary Change**, v.162, p. 275-291. 2018.

WILSON, R.; HARRISON, S.; REYNOLDS, J.; HUBBARD, A.; GLASSER, N.F.; WÜNDRICH, O.; ANACONA, P. I.; MAO, L.; SHANNON, S. The 2015 Chileno Valley glacial lake outburst flood, Patagonia. **Geomorphology**, v. 32. p. 51-65. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.01.015>.

ZAMORANO, C.R.; MAIER, E.; ARIGONY-NETO, J.; ESPINOZA, J. M. A.; JAÑA, R.; GONZALEZ, I. Mapeamento da superfície de neve na Cordilheira Darwin através de imagens de satélite óticas e sua relação com dados climáticos (2005-2016). **Revista Brasileira de Cartografia**, Edição Desastres Naturais e Impactos Ambientais, ed. 69/4, p. 743-758. 2017.

ZENG, Q.; CAO, C. M.; FENG, X.; LIANG, F.; CHEN, X.; SHENG, W. Study on reflection characteristics of snow, ice and water of northwest China. **IAHS Publication**, v.23. 1984.